NÖHÜ MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ
NOHU JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

ISSN: 2564-6605

Cilt: 13 Sayı: 1 2024

Volume: 13 Issue: 1 2024





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

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

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
ISSN: 2564-6605
Cilt/Volume: 13 Sayı/Issue: 1 2024
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.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 Korkanç
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*

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
ISSN: 2564-6605
Cilt/Volume: 13 Sayı/Issue: 1 2024
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

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 Atiş
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*

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
ISSN: 2564-6605
Cilt/Volume: 13 Sayı/Issue: 1 2024
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Editör Kurulu/ *Editorial Board*

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

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
ISSN: 2564-6605
Cilt/Volume: 13 Sayı/Issue: 1 2024
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Mizanpaj Editörleri/*Composition Layout Editors*

Arş. Gör. Kıvanç Karacan	Mekatronik Mühendisliği *Mechatronics Engineering*
Arş. Gör. Metehan Bulut	İnşaat Mühendisliği *Civil Engineering*
Arş. Gör. Emre Uçar	Makine Mühendisliği *Mechanical Engineering*
Arş. Gör. Kübra Nur Gül	Elektrik-Elektronik Mühendisliği *Electrical Electronics Engineering*
Arş. Gör. Ayşe Erdoğmuş	Bilgisayar Mühendisliği *Computer Engineering*
Arş. Gör. Kemal Ulusoy	Çevre Mühendisliği *Enviromental Engineering*

İngilizce Dil Editörleri/*English Language Editors*

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

Türkçe Dil Editörleri/*Turkish Language Editors*

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

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
ISSN: 2564-6605
Cilt/Volume: 13 Sayı/Issue: 1 2024
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

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*

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
ISSN: 2564-6605
Cilt/Volume: 13 Sayı/Issue: 1 2024
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

İÇİNDEKİLER/*CONTENTS*

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Üzerinde fotovoltaik panele sahip olan elektrikli araçları içeren bir şarj otoparkının çok amaçlı optimum enerji yönetim stratejisi

Multi-objective optimum energy management strategy of a charging parking lot including electric vehicles with on-board photovoltaic panels

Burak Şafak, Deniz Özekinci, Alper Çiçek

001-009

Research Article /*Araştırma Makalesi*

Seismic behavior assessment of RC buildings controlled by passive and active techniques

Pasif ve aktif tekniklerle kontrol edilen betonarme binaların sismik davranışlarının değerlendirilmesi

Mustafa Ergün, Mehmet Uyar

010-027

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Türkiye'deki yaralanmalı iş kazalarının sektörel dağılımı ve analizi

Sectoral distribution and analysis of occupational injury accidents in Turkey

Sertaç Dündar, Atiye Bilim, Niyazi Bilim

028-033

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Turbo kompresörlerin çalışma hızını etkileyen faktörlerin makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak modellenmesi

Modelling of the factors affecting the working speed of turbo compressors using machine learning methods

Sema Atasever, Uğur Sorgucu

034-040

Research Article /*Araştırma Makalesi*

Microthermometric characteristics of ore forming solutions in Şaphane (Oğuzlar-Çorum) Au mineralization, Turkey

Şaphane (Oğuzlar-Çorum) Au cevherleşmesinin sıvı kapanım özellikleri, Türkiye

Çağlar Kulaman, Esra Ünal Çakır

041-048

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Depresyonda motor aktivitenin makine öğrenmesi ile değerlendirilmesi

Evaluation of motor activity in depression with machine learning

Selim Aras, Neriman Aras, M. Alptekin Engin

049-059

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Bor arsenit bazlı nano-transistörlerde elektrot genişliğinin enerji aralığı üzerindeki etkisinin incelenmesi, bir DFT çalışması

Investigating the width effect on energy gaps of electrodes in boron arsenide based nano-transistors, a DFT study

Nilüfer Ertekin

060-064

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
ISSN: 2564-6605
Cilt/Volume: 13 Sayı/Issue: 1 2024
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Güncel tasarım standartlarına göre soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerin eğilme dayanımlarının hesabı

Calculation of flexural strength of cold formed steel sections according to current design standards

Yakup Bölükbaş

065-073

Research Article /*Araştırma Makalesi*

Usage of boroxide and ulexite ores in ferromanganese production

Boroksit ve üleksit cevherlerinin ferromangan üretiminde kullanımı

Mustafa Engin Kocadağistan, Mehmet Zinnur Ayşen, İsmail Seçkin Çardaklı

074-083

Research Article /*Araştırma Makalesi*

Thermal and structural analysis of oil-based type transformer

Yağlı tip transformatörde termal ve yapısal analiz

Beyza Nur Dursun, Bülent Ekici

084-093

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Al-13.6Cu-6Si alaşımının elektriksel ve ısıl özelliklerinin incelenmesi

Investigation of the electrical and thermal properties of Al-13.6Cu-6Si alloy

Erkan Üstün, Mehmet İzzettin Yılmazer, Emin Çadırlı

094-098

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Turbofan motorlarının kestirimci bakımında makine öğrenimi algoritmaları performanslarının karşılaştırılması

Comparison of machine learning algorithms performance in predictive maintenance of turbofan engines

Osman Güler

099-106

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Aksaray ilinde küçükbaş ve kanatlı hayvan gübresi temelinde biyogaz potansiyelinin belirlenmesi

Determination of biogas potential based on ovine and poultry manure in Aksaray province

Hatice Et Yapılcan, Hülya Bakırtaş

107-115

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Euler Lagrange sistemlerinin uyarlamalı sinir ağları tabanlı çıkış geri beslemeli denetiminde konum sinyalinin sınırlandırılması

Limitation of position signal in output feedback control based on adaptive neural networks of Euler Lagrange systems

Bayram Melih Yılmaz

116-122

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
ISSN: 2564-6605
Cilt/Volume: 13 Sayı/Issue: 1 2024
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Research Article /*Araştırma Makalesi*

Response of trigger type to circular CFRP crash box energy absorption performance

Tetikleyici tipinin dairesel KFTP çarpışma kutusu enerji emilim performansına etkisi

Ertan Kösedağ

123-130

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Doğal yumurta kabuğu kullanılarak reaktif siyah 5 adsorpsiyonunun yapay sinir ağları ile modellenmesi

Modelling of reactive black 5 adsorption with artificial neural networks using natural eggshell

Özgül Çimen Mesutoğlu

131-138

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Kanalizasyon optimizasyonu için kısıt yönetimi mekanizmalarının karşılaştırılması

Comparison of constraint-handling mechanisms for sewer optimization

Mustafa Erkan Turan, Tülin Çetin, Mümin Emre Şenol

139-148

Research Article/*Araştırma Makalesi*

Flotation of low-rank coal slimes

Düşük dereceli kömür şlamlarının flotasyonu

Vildan Önen, Mustafa Kutkan Karaoğlan

149-155

Research Article/*Araştırma Makalesi*

Estimation of economic costs of air pollution from road vehicle transportation in Turkey

Türkiye'de karayolu taşımacılığından kaynaklanan hava kirliliğinin ekonomik maliyetinin tahmini

Eda Ustaoglu

156-168

Research Article/*Araştırma Makalesi*

The effect of basalt fiber reinforcement at different ratios on the unconfined compressive strength of kaolin

Farklı oranlardaki bazalt fiber takviyesinin kaolinin serbest basınç dayanımına etkisi

Yasemin Aslan Topçuoğlu, Zülfü Gürocak

169-175

Araştırma Makalesi/*Research Article*

3B yazıcıda üretilen plakaların sürtünme karıştırma kaynak parametrelerinin YSA ile tahmini

Estimation of friction stir welding parameters of 3D printed sheets using ANN

Nergizhan Anaç, Oğuz Koçar, Erhan Baysal

176-187

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Düzlem çerçeve modelinin hasar tespit sonuçlarının belirsizlik ölçümü

Uncertainty quantification of damage detection results for a plane frame model

Umut Yücel, Erkan Durmazgezer

188-195

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
ISSN: 2564-6605
Cilt/Volume: 13 Sayı/Issue: 1 2024
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Research Article/*Araştırma Makalesi*

An unconditional generative model with self-attention module for single image generation

Tek görüntü üretimi için öz-dikkat modüllü koşulsuz üretken bir model

Eyyüp Yıldız, Mehmet Erkan Yüksel, Selçuk Sevgen

196-204

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Fotovoltaik termal güneş kolektörlü soğutma sisteminin yaşam döngüsü iklim performansı (LCCP) analizi

Life cycle climate performance (LCCP) analysis of photovoltaic thermal solar collector refrigerating system

Burak Aktekeli, Mustafa Aktaş, Süleyman Erten, Melis Öder, Fatma Nur Erdoğmuş, Yaren Güven

205-215

Araştırma Makalesi/*Research Article*

2023 Maraş depremleri ve Niğde'deki yer hareketliliği

2023 Maras earthquakes and ground motion in Nigde

Hakan Karaca

216-222

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Al_2O_3 nanoparçacıklarının ve çeşitli antioksidan katkı maddelerinin dizel motor karakteristiklerine etkilerinin araştırılması

Investigation of the effects of Al_2O_3 nanoparticles and various antioxidant additives on a diesel engine characteristic

Abdülvahap Çakmak

223-235

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Maden galerilerinde farklı kaya kütle sınıflama sistemleri ile durabilite analizi uygulaması: Yahyalı/Kayseri Pb-Zn ocağı örneği

Application of durability analysis with different rock mass classification systems in mine galleries: A case study of Yahyalı/Kayseri Pb-Zn quarry

Ahmet Teymen

236-247

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Yangının mod birleştirme analizi sonuçlarına etkisi

Effect of fire on mode superposition analysis results

Hakan Erdem, Emine Erdem

248-252

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Kesikköprü baraj gölü havzası yayılı kirlilik kaynaklarının ve kirlilik yüklerinin tahmini

Estimating of non-point pollution sources and pollution loads in Kesikköprü reservoir basin

Kağan Cebe, Olcay Gülçiçek Uysal

253-261

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Çeşitli görüntülerin sınıflandırılması için yeni bir Evrişimsel Sinir Ağı önerisi

A new Convolutional Neural Network proposal for classifying various images

Yeşim Tiraki, Hasan Temurtaş, Soydan Serttaş, Çiğdem Bakır

262-278

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
ISSN: 2564-6605
Cilt/Volume: 13 Sayı/Issue: 1 2024
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Research Article/*Araştırma Makalesi*

Examining the environmental and economic dimensions of producing fuel from medical waste plastics

Tıbbi atık plastiklerden yakıt üretiminin çevresel ve ekonomik boyutlarının incelenmesi

Çağrı Ün

279-293

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Alüminyum ve çelik malzemelerin TIG kaynak ve sert lehimleme yöntemleriyle kaynak edilebilirliğinin incelenmesi

Investigations of weldability with TIG welding and brazing of aluminium and steel

Aydın Kan, İbrahim Çayıroğlu

294-300

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Zonguldak'ta $PM_{2.5}$ odaklı hava kirliliği-mortalite ilişkisinin incelenmesi

Investigation of $PM_{2.5}$ focussed air pollution-mortality relationship in Zonguldak

Kemal Ulusoy

301-308

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Geçici kenar koruma sistemleri kullanımının inşaat proje maliyetine etkisi

Impact of the use of temporary edge protection systems on construction project cost

Reşat Akyüz, Hakan Kuşan, Osman Aytekin

309-317

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Sabit kanatlı bir İHA'nın model öngörülü kontrolü için döngüde yazılım simülasyonu

Software-in-the-loop simulation of model predictive control applied to a fixed-wing UAV

Zülfü Kuzu, Fatma Yıldız Taşçıkaraoğlu

318-324

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Ses analizi ile müzik türlerinin sınıflandırılmasına yönelik kapsamlı bir çalışma

A comprehensive study of classification of music genres with voice analysis

Zekeriya Anıl Güven

325-333

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Entegre sabit biyofilm sistem ile karbon, azot ve fosfor gideriminin araştırılması

Investigation of carbon, nitrogen and phosphorus removal with integrated fixed biofilm systems

Jamila Mohamad, Mustafa Işık

334-341

Research Article/*Araştırma Makalesi*

Comparative analysis of various machine learning and deep learning approaches for car resale price prediction in the Turkish market

Türk piyasasında araba ikinci el fiyat tahminleri için çeşitli makine öğrenmesi ve derin öğrenme yaklaşımlarının karşılaştırmalı analizi

Fatih Uysal

342-349

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
ISSN: 2564-6605
Cilt/Volume: 13 Sayı/Issue: 1 2024
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Görsel kelime tabanlı ses sahteciliği tespit yöntemi

Audio forgery detection method based on visual word

Beste Üstübioğlu, Arda Üstübioğlu

350-358

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Mevcut betonarme yapı üzerine çelik ve betonarme ek kat tasarımı ve deprem performanslarının karşılaştırılması

Comparison of earthquake performances between steel and reinforced concrete additional floor design on existing reinforced concrete structure

Tuğba Dilek, Tuna Ülger

359-369

Araştırma Makalesi/*Research Article*

X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliğinde menevişleme ve kriyojenik işlemin mikroyapı ve tribolojik özelliklere etkisi

Effect of tempering and cryogenic treatment on microstructure and tribological properties in X40CrMoV5-1 hot work tool steel

Fulya Kahrıman

370-375

Derleme Makalesi /*Review Article*

Atık lastik tozuna uygulanan yüzey işlemleri ve atık lastik tozunun polimer/orijinal kauçuk bileşimlerinde kullanımının incelenmesi

Surface treatments applied to waste tire powder and review of the use of waste tire powder in polymer/original rubber compounds

İlker Erzincanlı, Fazliye Karabörk

376-384

Derleme Makalesi /*Review Article*

Türkiye'de yetişen ticari değere sahip kekik türlerine ait uçucu yağ bileşenlerinin GC-MS yöntemiyle karakterizasyonu

Characterization of essential oil components of commercially valuable thyme species grown in Turkey by GC-MS method

Emine Nakilcioğlu, Harun Reşit Özdal

385-392

Derleme Makalesi /*Review Article*

İncirde (*Ficus carica* L.) in vitro doku kültürü tekniklerinin uygulanma potansiyelinin değerlendirilmesi

*Evaluation of the application potential of in vitro tissue culture techniques in fig (*Ficus carica *L.)*

Altın Kardelen Abacı, Begüm Güler, Aynur Gürel

393-412

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 001-009
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
Araştırma makalesi / Research article
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Üzerinde fotovoltaik panele sahip olan elektrikli araçları içeren bir şarj otoparkının çok amaçlı optimum enerji yönetim stratejisi

Multi-objective optimum energy management strategy of a charging parking lot including electric vehicles with on-board photovoltaic panels

Burak Şafak[1], Deniz Özekinci[2], Alper Çiçek[3*]

[1,2,3] *Trakya Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 22030, Edirne Türkiye*

Öz

Dünyada taşımacılık sektörünün enerji ihtiyacının önemli bir bölümünün fosil yakıtlardan karşılandığı bilinmektedir. Bu sebeple hem sürdürülebilirliğin sağlanması hem de çevresel sorunların giderilmesi amacıyla elektrikli araçların (EA) sayısının her geçen gün arttığı gözlenmektedir. EA'ların enerjisinin fosil kaynaklardan karşılanması yerine yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması da önemli konulardan birini oluşturmaktadır. Bu açıdan üzerinde fotovoltaik panelli EA'lar gelecekte bu konuya bir çözüm sunabilir. Ayrıca çok sayıdaki EA'nın şarj durumu şebekede yük faktörünün azalması başta olmak üzere sistem veriminin azalmasına sebep olabilir. Bu çalışmada fotovoltaik panele sahip EA'ları da içeren bir şarj otoparkının çok amaçlı optimum enerji yönetim modeli karışık tam sayılı doğrusal programlama yöntemi aracılığı ile sunulmaktadır. Otopark işletmesinin hem maliyet minimizasyonu sağlanabilirken hem de yük faktörü maksimizasyonu ayrı ayrı ya da her ikisi de birlikte dikkate alınarak yönetimi sağlanabilmektedir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre sunulan model uygulanan amaç doğrultusunda otopark işletmesini yönetmektedir. Sadece maliyetinin azaltılmak istendiği durumunda maliyet en aza inerken, sadece yük faktörünün arttırılmak istendiği durumunda yük faktörü 0.091 değerinden 0.92'ye çıkartılabilmektedir. Ayrıca her iki amaç da uygulanmak istediğinde hem maliyet hem de yük faktörü arada bir değer alarak istenen sonuçların elde edilmesini sağlayabilmektedir. Gerçekleştirilen çalışma için araçların fotovoltaik panele sahip olmasının toplam maliyet üzerinde %4.5'luk etkisi söz konusudur.

Anahtar kelimeler: Elektrikli araç, Araç üzeri fotovoltaik panel, Elektrikli araç şarj otoparkı, Optimum enerji yönetimi, Yük faktörü

Abstract

It is widely recognized that a significant portion of the transportation sector's energy demand is met by fossil fuels. As a result, there has been a notable increase in the electric vehicles' (EVs) number to promote sustainability and address environmental concerns. Shifting the energy source for EVs from fossil fuels to renewables is a critical matter. In this regard, EVs equipped with photovoltaic hold the potential to offer a solution in the future. However, the charging infrastructure for a large fleet of EVs can lead to decreased system efficiency, particularly a reduction in the grid's load factor. This study presents multi-objective optimal energy management model for a charging parking lot that incorporates EVs with photovoltaics. The model is developed using the mixed-integer linear programming. By employing the model, both cost minimization and load factor maximization can be achieved separately or simultaneously, addressing the management needs of the parking lot. The results obtained from the study demonstrate that the proposed model effectively manages the parking lot operations according to the intended objectives. When the objective is solely to reduce costs, the model minimizes expenses. Alternatively, if the objective is to increase the load factor, it can be enhanced from 0.091 to 0.92. Furthermore, when both objectives are pursued simultaneously, a balance can be achieved between cost reduction and load factor optimization, resulting in desired outcomes. For the conducted study, the inclusion of photovoltaic panels on EVs has a 4.5% impact on the overall cost.

Keywords: Electric vehicle, Electric vehicle charging station, Load factor, Optimal charge management, On-board photovoltaic panel

1 Giriş

1.1 Motivasyon

Dünyadaki toplam enerji tüketiminin yaklaşık %30'unu taşımacılık sektörü oluşturmaktadır [1]. Taşımacılık sektöründe kullanılan toplam enerjinin yaklaşık %95'i fosil yakıtlı araçlar tarafından tüketilmektedir [2]. Dünya ekonomisi ve siyasetinde fosil yakıtların kullanılması önemli bir rol almaktadır. Fosil yakıtlardan elde edilen enerji yerine yenilenebilir, çevreci enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin çoğunluklu olarak kullanılmasının dünya ekonomisini önemli ölçüde etkileyeceği öngörülmektedir. Ancak devletlerin ekonomik ve siyasi çıkarlarını göz ardı edip doğa ve çevre dostu enerji kaynaklarının kullanımına

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: alpercicek@trakya.edu.tr (A. Çiçek)
Geliş / Recieved: 05.07.2023 Kabul / Accepted: 05.10.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngmuh.1323236

öncelik vermesi gerekmektedir. Devletlerin fosil yakıtlı araçları tercih etmekten kaçınma sebeplerinden bazıları; fosil yakıtların yenilenebilir olmaması, atmosferi ve su kaynaklarını kirletmesi, atmosfere karışan zararlı gazların ozon tabakasının incelmesine ve bununla birlikte keskin iklim değişikliklerine sebep olması, canlı sağlığına ciddi zararlar vermesi, küresel ısınmaya sebep olması, maliyetlerinin yüksek olması, fosil yakıtla çalışan motorların verimsiz ve bakım maliyetlerinin yüksek olması şeklinde belirtilebilir.

Fosil yakıtların kullanımının neden olduğu birçok olumsuz durumun sonucunda doğaya zararı sıfıra yakın ve verimleri oldukça yüksek olan elektrikli araçların (EA) kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır. EA'ların ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisinin karşılanması için oldukça temiz ve verimli olan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması tavsiye edilmektedir [3]. Bu durum hem elektrik enerjisinin üretiminde hem de EA'ların kullanımında doğa için oluşturabilecek tehditlerin sıfıra indirgenmesini sağlamaktadır.

EA'ların kullanımının yaygınlaşması, fosil yakıt tüketimini ve dışarıdan sağlanan fosil kaynaklar dikkate alındığında da ülkelerin dışa bağımlılığını azaltmaktadır. Ayrıca ülkeler yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına arttırılması amacıyla birçok teşvik politikası uygulamaktadırlar [4]. Uluslararası Enerji Ajansı'nın EA'lar üzerinde yaptığı bir araştırma raporunda, toplam EA sayısının 2030'a kadar 8 milyon araçtan 245 milyon araca ulaşması öngörülmektedir [5]. Fakat EA sayısının günden güne artmasına rağmen dünya genelinde EA şarj istasyonu alt yapı eksikliklerinin olduğu söylenebilir. Bu açıdan devletlerin EA şarj istasyonlarına yatırım desteği verilmesi gerektiği ifade edilmelidir.

Çok sayıda EA'nın aynı anda şarj edilmesiyle elektrik şebekelerinin işleyiş ve kontrolünde birtakım değişiklikler meydana gelebilmektedir. Elektrik şebekelerinde yük dalgalanmaları ve düşük yük faktörü durumu ortaya çıkmaktadır. Bu durumlar kayıpların ve maliyetin artması ile verimliliğin düşmesi başta olmak üzere sistem performansını olumsuz etkilemektedir. Elektrik şebekelerinde işletimin sağlıklı olarak yürütülebilmesi için şebekelerde oluşan bu olumsuz durumlar giderilmesi gerekmektedir.

EA şarj istasyonlarının genel olarak otopark olarak çalıştığı kabul edilmektedir. Uzun süre park durumu dikkate alındığından maliyet ve elektrik şebeke yük dağılımı en verimli şekilde optimize edilebilmektedir. Kullanıcılar hem araçlarını park etmek hem de araçlarını şarj etmek amacıyla EA şarj otoparklarını kullanabilmektedirler. EA şarj otopark işletmesi, birim elektrik fiyatlarının düşük olduğu saatlerde araçları şarj etmeye odaklanacaktır. Araçların şarj olma saatlerini düzenlenmesi için uygun çalışma modellerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Fakat diğer yandan da tüm araçların aynı anda şarj edilmesi isteği elektrik şebekelerinin pik yüklenme gibi olumsuz bir durumla karşılaşmasına sebep olacaktır.

1.2 Literatür taraması

Fosil yakıt kaynaklarının her geçen gün azalmasıyla ve fosil yakıt kaynaklarının kullanımıyla da karbon salınımının artmasıyla birlikte çevre dostu politikalar ve teşviklerin yer aldığı yeni bir düzen oluşturulmaktadır. Taşımacılık sektöründe EA'ların tercih edilmesi fosil yakıt kullanımını ve beraberinde karbon salınımını azaltmayı amaçlamaktadır. Çevre dostu EA'ların sayısı günden güne artış gösterdiği de belirtilmelidir. EA'ların sayısındaki artışlar, EA şarj istasyonlarının optimum bir şekilde planlanması, yönetilmesi ve elektrik şebekelerinde oluşabilecek olumsuz durumlar gibi konularda yapılan araştırmaların ve çalışmaların sayısının giderek artmasına neden olmaktadır.

Neyestani vd. [6] dağıtım sistemi operatörü ve EA otopark sahibi arasındaki etkileşimde karar verme aşamasında yaşanabilecek çatışmaların da dikkate alındığı iki seviyeli bir problemi çözmek amacıyla denge kısıtlamalarının da yer aldığı bir matematiksel programlama modeli açıklamışlardır. Amaç fonksiyonu dağıtım sistemi operatörü ve EA sahibi açısından kârı maksimize etmek olarak belirlenmiştir. Bingöl ve Yıldız [7] 4x4 tekerlek içi motorlu bir EA'nın süspansiyon sistemi için genetik algoritma II kullanarak bulanık mantık ve oransal integral türev tabanlı çok amaçlı bir optimizasyon modeli sunmuşlardır. Çalışmada önerilen yöntem ile EA süspansiyon sisteminin titreşim genliğinin azaltıldığı ifade edilmiştir. Chen vd. [8] bir konut otoparkı için EA'ların varışının Poisson dağılımını takip ettiğini varsayarak şarj yükü talebinin analizi için optimum şarj modeli önermişlerdir. Çalışmada şarj yükü profillerini üretmek için bir simülasyon aracı sunulmuştur. Ayrıca, şarj başlangıç zamanı için stokastik yapıyı dikkate alarak EA'ların şarj işleminin neden olduğu güç dalgalanma seviyelerini azaltmak amacıyla geliştirdikleri modelde optimum şarj stratejisinin elde edilmesi için parçacık sürü optimizasyonu algoritmasını kullanmışlardır. Mohammadi vd. [9] yaptıkları çalışmada ilk olarak, bir EA otoparkının 24 saatlik periyotta şarj ve deşarj yaklaşımlarını tanımlamışlardır. İkinci olarak enerji kaybını azaltmak ve gerilim kararlılığını iyileştirmek için optimum konumu belirlemişlerdir. Önerdikleri yöntemi IEEE 33-baralı standart dağıtım sisteminde test etmişlerdir. Wu vd. [10] bir EA otoparkının elektrik maliyetini minimize etmek için yeni bir EA şarj planlama ve kontrol sistemi önermişlerdir. Bu yöntemde gelen her EA için optimum şarj planlaması tanımlanmıştır. Güneş vd. [11] yaptıkları çalışmada EA şarj istasyonlarının elektrik dağıtım şebekelerinin güvenilirlik indislerinde yarattığı etkileri incelemişlerdir. Mevcut yüklerin geçmiş yıllara ait yüklenme verileri ile birlikte olasılıksal modelleme yöntemlerinden yararlanılarak gerçek bir elektrik dağıtım sistemi üzerindeki etkilerini göstermişlerdir. Çiçek ve Erdinç [12] PV-batarya hibrit sistem içeren bir otoparkta EA'ların şarj yönetiminde ekonomik kazancın elde edilmesi için bir karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli oluşturmuşlardır. Yapılan çalışmada EA otoparkında dinamik elektrik fiyatları ile enerji satın alınmıştır. PV sistemde üretilen fazla enerji ve elektrik fiyatının düşük olduğu zamanlarda elektrik şebekesinden satın alınan enerji bataryada depolanabilmektedir. Bataryadaki depolanan enerji, PV üretiminin olmadığı ya da şebeke elektrik fiyatının pahalı olduğu periyotlarda sisteme enjekte edilmiştir. Fakat bu çalışmada hızlı şarj üniteleri yer almamaktadır. PV sistem araçların üzerinde değil şarj otoparkına aittir. Ayrıca

problem çok amaçlı olarak modellenmemiştir, yük faktörü maksimizasyonu konusu ele alınmamıştır. Kırat ve Çiçek [13] nesnelerin interneti uygulamaları, rezervasyon sistemi ve ceza sisteminin de yer aldığı Trakya Üniversitesi öğrencileri ve personeline hizmet eden PV sisteme sahip bir EA şarj istasyonu için optimum işletim modelini açıkladılar. Fakat bu çalışmada EA'lar PV sisteme sahip değillerdir ve problem çok amaçlı olarak ele alınmamıştır. Sunulan modelde EA şarj istasyonunun şarj işlemleri sırasında şebeke gereksinimleri yani şebekeden çekilen pik yüklenme durumu ve yük faktörü dikkate alınmamıştır. Jiang ve Zhen [14] yaptıkları çalışmada enerji depolama sistemi ve fotovoltaik sistem içeren bir EA şarj otoparkının optimizasyonuna odaklanmıştır. İlk olarak akıllı bir şarj yönetim sistemi kurmuşlardır. Daha sonra ise toplam sistem maliyetini minimize etmek için bir optimizasyon problemi oluşturmuşlardır. Ardından, en uygun çözümü bulmak için gri kurt optimizasyonu (Gray wolf optimization - GWO) yöntemi tanıtılmış ve modele uygulanmıştır. Lakshminarayanan vd. [15] yaptıkları çalışmada bir iş yeri için EA'dan şebekeye enerji durumunu da dikkate alarak gerçek zamanlı bir optimum enerji yönetim modeli sunmuşlardır. Önerilen bu enerji yönetim şemasında EA'nın bataryasının şarjı ve deşarjı, rastgele orman metodolojisi kullanılarak EA seyahat modeli tahmini tarafından planlanmıştır. Ek olarak bu enerji yönetim şeması, iş yerindeki enerji tüketim maliyetini minimize etmek için tahmini EA seyahat bilgilerini içeren optimizasyon problemi olarak tasarlanmıştır. Bu enerji yönetim şeması, EA sahibi ve iş yeri için ekonomik faydalar göz önünde bulundurularak geliştirilmiştir. Şengör vd. [16] yaptıkları çalışmada doğrusal programlama kullanarak EA otoparkı için gerçek zamanlı optimizasyon tabanlı bir enerji yönetim modeli önermişlerdir. Önerilen enerji yönetim modelinde işletme maliyetinin minimizasyonu ve yük faktörü maksimizasyonunu amaçlanmıştır. EA'ların hareketliliği, belirsiz varış ve ayrılış zamanları ve geldikleri andaki enerji seviyelerine daha gerçekçi bir yaklaşım sağlamak için geçmiş veriler göz önünde bulundurulmuştur. Mohammad vd. [17] yaptıkları çalışmada EA şarj sistemi ve çatı tipi fotovoltaik sistem ile donatılmış ticari otopark için bir enerji yönetim sistemi önermişlerdir. Sunulan enerji yönetim sistemiyle öncelikli olarak şarj talebini arz ile dengelemek amacıyla optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca enerji yönetim sistemini daha gerçekçi hale getirmek için batarya bozulma maliyeti ve seviyelendirilmiş fotovoltaik enerji maliyeti dikkate alınmıştır. Zanvettor vd. [18] yaptıkları çalışmada araç davranışlarının belirsizliği altında enerji fiyatlandırma sorununu ele almışlardır. Özel olarak, otoparkın günlük kârının garanti altına alındığı yeni bir enerji fiyatlandırma stratejisi önerilmiştir. Fotovoltaik ve enerji depolama sistemi tesislerinden yararlanılarak optimum satış fiyatını hesaplamak ve uzaklaşan ufuk çerçevesini işletmek için prosedürler ve algoritmalar formüle edilmiştir.

Bu çalışmada fotovoltaik panele sahip EA'lara da hizmet eden bir şarj otoparkının enerji yönetim konusu dikkate alınmaktadır. Otopark işletimi için minimum maliyet ve elektrik şebekesi için maksimum yük faktörü elde edilmesi amaçlanarak bir karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli önerilmektedir. Çalışmanın literatüre katkıları aşağıdaki gibidir:

- Fotovoltaik panele sahip EA'larında yer aldığı EA şarj otoparklarının çok amaçlı optimum şarj yönetimi gerçekleştirilmektedir.
- Önerilen yapıyla EA şarj otoparkının ekonomik işletimi sağlanabilirken, şebeke yük faktörü minimizasyonu da gerçekleştirilebilmektedir.
- EA şarj otoparkında 50 kW maksimum güce sahip hızlı DC şarj ünitelerinin yer aldığı düşünülmektedir.
- Bu çalışma gelecekte şarj istasyonu kurmak isteyecek yatırımcıların ve mevcut işletmecilerin de faydalanabileceği matematiksel modellemeler ve durum çalışmalarını içermektedir. Bu açıdan ilgili alanda bir yol haritası sunma potansiyeline de sahiptir.

2 Materyal ve metot

Bu çalışmada, fotovoltaik panele sahip olan EA'ların da yer aldığı bir şarj otoparkında yer alan EA'ların şarj düzeyleri, otoparka gelme ve ayrılma zamanları ve günlük elektrik birim fiyatları dikkate alınarak bir optimum işletim stratejisi açıklanmaktadır. İşletme maliyetlerinin minimizasyonu açısından optimum şarj durumlarının belirlendiği ve aynı zamanda elektrik dağıtım sistemlerinden sağlanan elektrik enerjisinin verimliliğini ve sürekliliğini sağlamak için maksimum elektrik gücünün minimuma indirildiği, bir diğer deyişle yük faktörünün maksimize edildiği, bir yapı sunulmaktadır. Önerilen yapıya ait genel bir görünüm Şekil 1'de verilmektedir. Otopark sisteminin tercih edilmesinin sebepleri arasında EA'ların aynı zaman dilimi içerisinde hem park edilebilmesi hem de şarj edilebilmesi yer almaktadır. Fotovoltaik panele sahip olan EA'lar gün şarj ünitelerinin yanı sıra fotovoltaik panel aracılığı ile de bir miktar şarj edilebilmektedir. Bu durum sayesinde EA'ların şarj maliyetinin ve şebekeden çekilen güç miktarının azaldığı söylenmelidir.

Önerilen model çok amaçlı optimizasyon problemi olarak ele alınmaktadır. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünün genel olarak daha zor olduğu söylenebilir çünkü fonksiyon içerisinde minimizasyon ve/veya maksimizasyon içeren değişik amaç fonksiyonları yer alabilmektedir. Bu problemlerin çözümünde ilk olarak amaçların birleştirildiği yapı dikkate alınabilir. İkinci olarak amaç fonksiyonları tek tek değerlendirilebilir. Bir amacın dikkate alındığı durumda diğer amaç fonksiyonları kısıtlarda ifade edilir. Üçüncü metot ise pareto optimizasyonudur. Bu yöntemde amaç fonksiyonundaki bileşenlere ağırlıklar verilerek problemin çözümü gerçekleştirilir [19]. Bu çalışmada da amaç fonksiyonunu oluşturan bileşenlere farklı ağırlıklar verilerek çeşitli durum çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada fotovoltaik panele sahip olan EA'ların da şarj hizmeti almak için geldiği bir EA şarj otoparkının optimum şarj ve yük faktörü yönetimi esas alınarak işletme maliyeti ile elektrik dağıtım sisteminden çekilen maksimum elektrik gücünün minimize edilmesi amaçlanmaktadır. Amaç fonksiyonu Denklem (1)'de ifade edilmektedir. Amaç fonksiyonunun ilk kısmı elektrik maliyetini minimize

ederken, ikinci kısmı ise yük faktörünün arttırılmasını sağlamaktadır. a ve β değerleri doğrultusunda otopark farklı amaçlar doğrultusunda çalıştırılabilmektedir.

Sistemin güç dengesini ifade eden eşitlik Denklem (2) yer almaktadır. Bu eşitlikte EA'nın fotovoltaik panel içerip içermemesi durumu göz önüne alınarak fotovoltaik panelin EA'ya sağladığı elektriksel gücün ve elektrik dağıtım sisteminden çekilen elektriksel gücün toplamının EA'ların t anındaki toplam şarj gücünün ve fotovoltaik panelde üretilip araçta kullanılmayan gücü ifade eden $P_{e,t}^{direnç}$'in toplamına eşit olduğu belirtilmektedir.

$$minimum\left[\sum_{t} a\cdot(\lambda_t^{fiyat}\cdot P_t^{top\_şarj}\cdot \Delta T) + \beta \cdot (C_{ters}^{yükfak})\right] \quad (1)$$

β = Amaç fonksiyonunda yük faktörü için kullanılan parametre [0-1].
a= Amaç fonksiyonunda işletme maliyeti için kullanılan parametre [0-1].
$C_{ters}^{yükfak}$= Elektrik dağıtım sistemine ait yük faktörünün minimize edilmesi için kullanılan değişken (1/yük faktörü değeri).
ΔT= Zaman çözünürlüğü.
$P_t^{top\_şarj}$ = Elektrikli araçların t anındaki toplam şarj gücü [kW].
λ_t^{fiyat}= Saatlik elektrik birim fiyatları [TL/kWh].

$$U_e\cdot\left[\sum_{e}(P_{e,t}^{PV})\right] + \sum_{e} P_{e,t}^{şarj} = P_t^{top\_şarj} + \sum_{e} P_{e,t}^{direnç} \quad ,\forall t \quad (2)$$

$P_{e,t}^{şarj}$ = e elektrikli aracının elektrik dağıtım sisteminden t anında çektiği şarj gücü [kW].
$P_{e,t}^{direnç}$ = Fotovoltaik panelin ürettiği fazla gücün
$P_{e,t}^{PV}$ = e elektrikli aracının fotovoltaik sisteminde t anında üretilen güç [kW].

EA'ların şarj durumları ise Denklem (3)'te ifade edilmektedir. Burada (t-1) anındaki enerji durumunun üzerine t anındaki fotovoltaik panelden elde edilen güç ya da şarj ünitesinden sağlanan güç eklenmektedir. Bataryanın enerji kapasitesinin tam dolması durumunda ise fotovoltaik panelde üretilen gücün teorik olarak direnç üzerinde harcandığı kabul edilmektedir. Denklem (4) EA'ların otoparka geldiği andaki enerji ifadeleri tanımlanmaktadır. Denklem (5) ise araçların otoparktan ayrıldıkları periyottaki enerji durumu belirlenmektedir. Araç bataryalarının en çok batarya kapasitesi kadar enerji doldurulabileceği Denklem (6)'da ifade edilirken, teorik olarak fazla enerjinin harcandığı direnç elemanında en çok fotovoltaik panelde üretilen güç tüketilebildiği Denklem (7)'de belirtilmektedir. EA otoparkı için ortalama şarj gücünün maksimum şarj gücüne oranı olan yük faktörü Denklem (8)'de tanımlanırken, ilgili ifade minimize edilmesi hedeflenen amaç fonksiyonunda yer alabilmesi için Denklem (9)'daki gibi düzenlenmiştir. Bu yöntemin [14]'de de kullanıldığı belirtilmelidir. Ayrıca ortalama gücün nasıl elde edildiği Denklem (10)'da ifade edilmektedir.

Denklem (11) ise yük faktöründe kullanılan maksimum güç ifadesini tanımlamaktadır.

$$ED_{e,t} = ED_{e,t-1} + U_e\cdot P_{e,t}^{PV}\cdot \Delta T + P_{e,t}^{şarj}\cdot \eta^{şarj}\cdot \Delta T - U_e\cdot P_{e,t}^{direnç}, \forall e,t>1 \quad (3)$$

$ED_{e,t}$ = e elektrikli aracının bataryasının t anındaki enerji düzeyi [kWh].
U_e = Elektrikli araçların fotovoltaik panele sahip olup olmadığında dair parametre [0-1].
$\eta^{şarj}$ = Elektrikli araçların şarj verimliliği [%].

$$ED_{e,t} = ED_e^{başlangıç}, \quad \forall e,t = T^{EAvarış} \quad (4)$$

$ED_e^{başlangıç}$ = e elektrikli aracının bataryasının başlangıçtaki enerji düzeyi [kWh].
$T_e^{EAvarış}$ = e elektrikli aracının otoparka varış zamanı.

$$ED_{e,t} = ED_e^{son}, \ \forall e,t = T^{EAayrılış} \quad (5)$$

ED_e^{son} = e elektrikli aracının bataryasının gün sonundaki enerji düzeyi [kWh].
$T_e^{EAayrılış}$ = e elektrikli aracının otoparktan ayrılış zamanı.

$$ED_{e,t} \le ED_e^{maksimum}, \forall e,t \quad (6)$$

$ED_e^{maksimum}$ = e elektrikli aracının maksimum enerji düzeyi [kWh].

$$P_{e,t}^{direnç} \le P_{e,t}^{PV}, \forall e,t \quad (7)$$

$$C^{yük\_fak} = \frac{P_{ort}}{P_{maks}} \quad (8)$$

P_{ort} = Elektrik dağıtım sisteminden çekilen saatlik ortalama güç [kW/saat].
$C^{yük\_fak}$ = Elektrikli araç şarj otoparkına ait yük faktörü
P_{maks} = Elektrik dağıtım sisteminden çekilen maksimum güç [kW].

$$C_{ters}^{yükfak} = P_{maks} - P_{ort} \quad (9)$$

$$P_{ort} = \frac{P_t^{top\_şarj}}{\Delta T\cdot 24}, \ \forall t \quad (10)$$

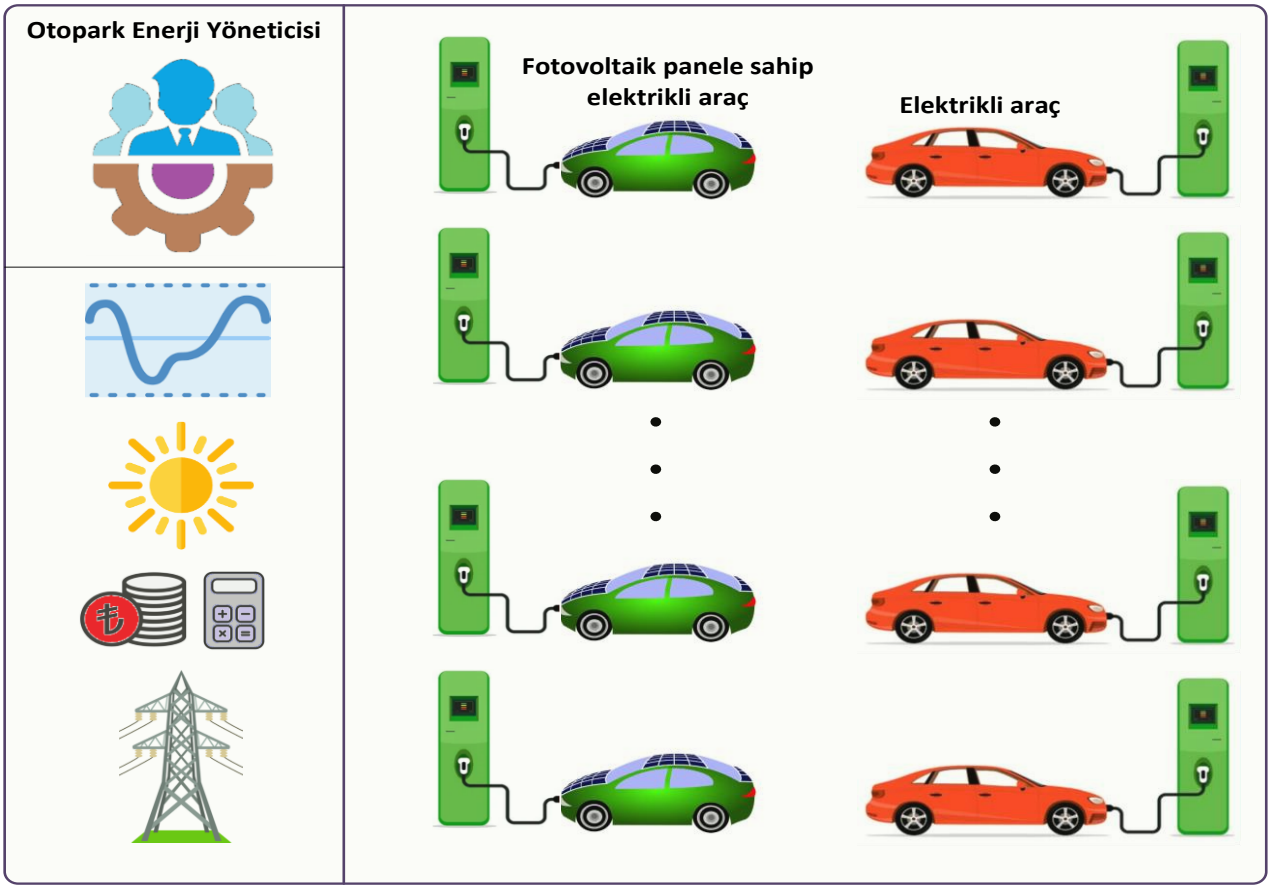
$$P_{maks} \ge P_t^{top\_şarj}, \forall t \quad (11)$$

3 Bulgular ve tartışma

Çalışmada önerilen yapının etkinliğini göstermek için GAMS v.24.1.3 yazılımı ve CPLEX v.12 çözücüsü kullanılarak test çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Problem 3,4 saniyede çözülebilmektedir. Bu bölümde sırasıyla giriş verileri ve test sonuçları ile bunların detaylı karşılaştırmaları sunulmaktadır.

3.1 Giriş verileri

EA şarj otoparkına 140'ı kendi fotovoltaik paneline sahip olmak üzere toplamda 200 aracın geldiği varsayılmaktadır. BMWi3, Audi e-tron, Kia Soul EV, Nissan Leaf Plus EA'larından her birinden 50 adet olmak üzere toplamda 200 EA'nın şarj otoparkına geldiği kabul edilmektedir. Şarj talebi için otoparka gelen 36 BMWi3'ün, 40 Audi e-tron'ın 30 Kia Soul EV'nin, 34 Nissan Leaf Plus'ın çatısında PV panel olduğu varsayılmaktadır. EA şarj otoparkında 180 şarj ünitesinin olduğu kabul edilmektedir. Bu ünite sayısı otoparka gelen EA'ların şarj taleplerini karşılayabilecek sayıda olduğu belirtilmelidir

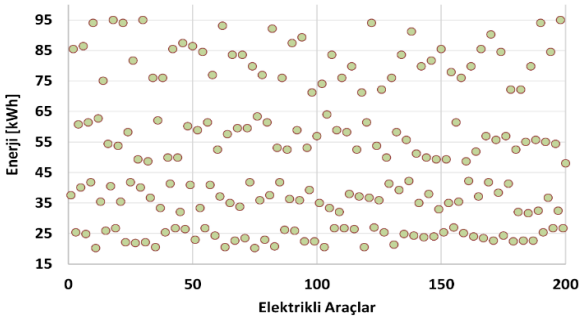


Şekil 1. Fotovoltaik panele sahip EA'lara da hizmet eden bir elektrik araç şarj otoparkının enerji yönetimin modeline ait genel bir yapı

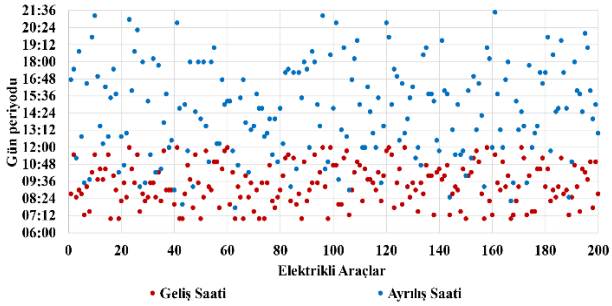
Buradaki araçlar kümesi Tablo 1'de teknik özellikleri sunulan EA'lardan oluşmaktadır. Otoparkta hızlı şarj ünitelerinin olduğu varsayılmaktadır. Hızlı şarj ünitesi DC özellikte olduğu için verimi %95 olan bir AC-DC dönüştürücünün olduğu düşünülmektedir. Her bir aracın otoparka gelme zamanı, otoparktan ayrılma zamanı ve otoparka geldiği andaki enerji durumunun farklı olduğu ifade edilmelidir. İlgili veriler normal dağılım yöntemi ile oluşturulmuştur [20]. Şekil 2'de EA'ların bataryalarının istenen şarj durumlarına ait veri sunulmaktadır. Ayrıca EA'ların şarj otoparkına geliş ve otoparktan ayrılış zamanlarına ilişkin veri Şekil 3'te verilmektedir.

Tablo 1. EA'ların bataryalarının teknik özellikleri

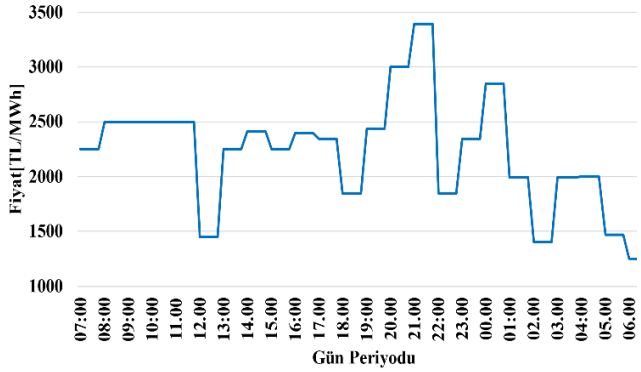
EA'lar	Minimum Batarya Kapasitesi [kWh]	Maksimum Batarya Kapasitesi [kWh]	Şarj Verimliliği
BMW i3	8.44	42.2	%95
Audi e-tron	19	95	%95
Kia Soul EV	5.4	27	%95
Nissan Leaf Plus	12.8	64	%95



Şekil 2. EA bataryalarının şarj edilmesi istenen enerji miktarları



Şekil 3. EA'ların otoparka geliş ve ayrılış saatleri



Şekil 4. Saatlik birim elektrik fiyatları

Tablo 2. Gerçekleştirilen durum çalışmalarına ait detaylar

Durum	α	β	Araç üzeri fotovoltaik panel
Durum-1	1	0	✓
Durum-2	0	1	✓
Durum-3	1	1	✓
Durum-4	1	0	X
Durum-5	0	1	X
Durum-6	1	1	X

Tablo 3. Durum çalışmalarında ortaya çıkan maliyetler

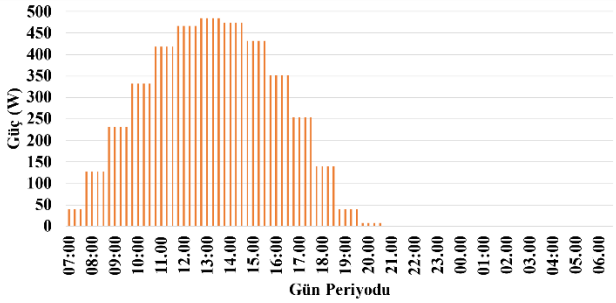
Durum	Maliyet
Durum-1	₺10370.885
Durum-2	₺14438.612
Durum-3	₺12517.572
Durum-4	₺10845.788
Durum-5	₺14882.167
Durum-6	₺13096.167

EA otoparkının araçları şarj etmek için Türkiye elektrik piyasasından gün öncesi elektrik fiyatları ile elektrik enerjisi satın aldığı kabul edilmektedir. İlgili fiyat verisinin 13 [21] Temmuz 2022 tarihine ait olduğu ve Şekil 4'te verildiği ifade edilmelidir.

Fotovoltaik panele sahip olan EA'ların maksimum 500 W'lık bir güç üretimi gerçekleştirebildiği varsayılmıştır. Tüm araçların aynı karakteristikteki PV panele sahip olduğu ve PV güç üretimlerinin aynı olduğu düşünülmektedir. EA otoparkının Edirne il merkezinde olduğu düşünülmektedir. 13 Temmuz 2022 tarihli Edirne merkez güneş radyasyonu verisi [22] kullanılarak elde edilen veri Şekil 5'te verilmektedir.

3.2 Test ve sonuçlar

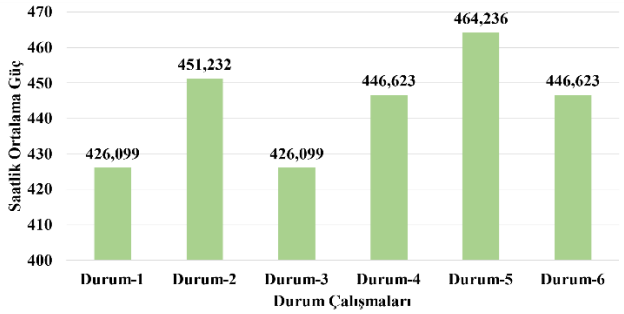
Çalışmada önerilen yöntemin etkinliğini göstermek amacıyla amaç fonksiyonda yer alan maliyet minimizasyonu α ve yük faktörü maksimizasyonu β parametreleri ile EA'ların fotovoltaik panele sahip olma durumları dikkate alınarak 6 farklı durum çalışması gerçekleştirilmiştir. Durum çalışmalarına ait detaylar Tablo 2'de verilmektedir.



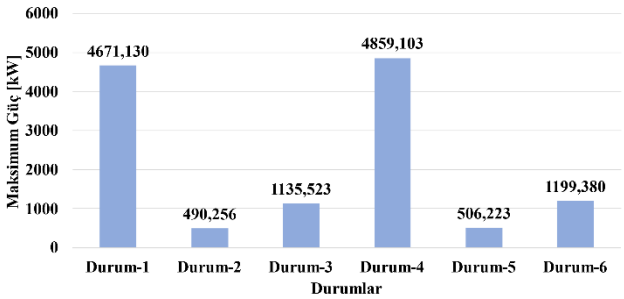
Şekil 5. EA'ların sahip olduğu fotovoltaik panellerin bir günlük güç üretim verisi

Her bir durum çalışmasında ortaya çıkan enerji satın alma maliyeti Tablo 3'te verilmektedir. Burada en az maliyetin amaç fonksiyonunun sadece enerji maliyetini minimize edilmesi istenen ve fotovoltaik panellerin de düşünüldüğü Durum-1'de 10370.885 TL ile gerçekleştiği ifade edilmelidir. En fazla maliyetin ise yük faktörünün maksimize edilmek istendiği ve fotovoltaik panellerin yer almadığı Durum-5'te 14882.167 TL ile ortaya çıktığı belirtilmelidir. Durum-1 ve Durum-4, Durum-2 ve Durum-5, Durum-3 ve Durum-6 karşılaştırıldığında bir başka ifadeyle EA'larda fotovoltaik panellerin kullanılmasının etkisine bakıldığında sırasıyla 475, 444, 579 TL'lik kazançların elde edildiği belirtilmelidir. Bu da Durum-1 ve Durum-4 arasında %4.5'luk maliyet farkı anlamına gelmektedir. Fotovoltaik panelin olup olmadığı fark etmeksizin aslında beklendiği gibi sadece α değerinin 1 olduğu durumda maliyetler düşüktür. Sadece β değerinin 1 olduğu durumda ise maliyetlerin yük faktörünü arttırılmaya çalışılması sebebiyle arttığı belirtilmelidir. Hem maliyetin hem de yük faktörünün iyileştirilmek istendiği yani α ve β değerlerinin 1 olduğu durumlarda ise maliyetlerin orta değerde olduğu söylenebilir.

Her bir durum çalışmasında saatlik ortalama güç değerleri Şekil 6'da açıklanmaktadır. Burada yük faktörünün maksimize edilmesi istenen Durum-2 ve Durum-5'te optimizasyon programından elde edilen sonuçlara göre ortalama güç değerlerinin daha yüksek olduğu belirtilmelidir. Çünkü ortalama güç değerinin yüksek maksimum güç değerinin düşük olduğu durumda yük faktörünün değeri artmaktadır. Hem maliyet minimizasyonu hem de yük faktörü maksimizasyonunun istendiği Durum-3'te ise ortama güç Durum-1 ile aynıdır. Benzer şekilde Durum-6 ve Durum-4'te ortalama güç değerleri aynı olarak gerçekleşmiştir. Bu durum çalışmalarında farklılık maksimum güç değerlerinde meydana gelmektedir ki yük faktörü değerinin değeri değişmektedir. Ayrıca fotovoltaik panelli araçların yer aldığı durum çalışmalarında yer almadığı durum çalışmalarına göre ortalama güç değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Durum-2 ve Durum-5'te ki farklılık ise yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmayıp bunun yerine şebekede yük faktörünü arttırmak için şebekeden enerji çekilmesi sonucunda ortaya çıkmıştır. Fakat Durum-1, Durum-3, Durum-4 ve Durum-6'da fotovoltaik panellerde üretilen tüm gücün kullanıldığı belirtilmelidir.



Şekil 6. Durum çalışmalarında elektrik şebekesinden çekilen ortalama güç değerleri

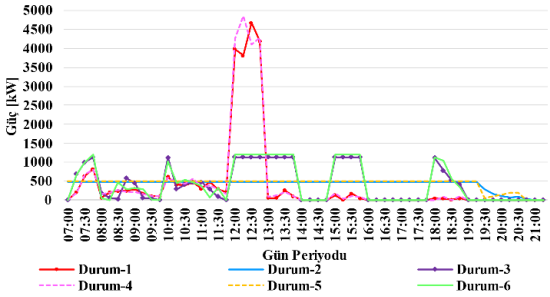


Şekil 7. Durum çalışmalarında elektrik şebekesinden çekilen maksimum güç değerleri

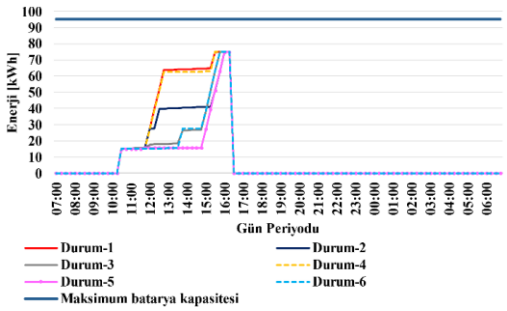
Her bir durum çalışmasında şebekeden çekilen güçlerin maksimum değerleri Şekil 7'de sunulmaktadır. Burada en yüksek güç değeri araçların üzerinde fotovoltaik panellerin düşünülmediği ve maliyet minimizasyonunun istendiği Durum-4'te 4859.103 kW ile gerçekleştiği belirtilmelidir. Maliyet minimizasyonu gerçekleşen durum çalışmalarında maksimum güç değerinin yüksek olduğu söylenebilir çünkü şebekeden satın alınan elektriğin ucuz olduğu saatlerde maliyetin azaltılması amacıyla yüksek güç tüketimi gerçekleştirilmektedir. Yük faktörünün maksimize edilmek istendiği ve araçların üzerinde fotovoltaik panellerin yer aldığı Durum-2'de ise maksimum güç tüketimi 490.256 kW ile gerçekleşmektedir. Optimizasyon programı yük faktörünü maksimize etmek için maksimum güç tüketim değerini en aza indirmeye çalışmaktadır. Bu doğrultuda Durum-2'de Durum-1'e göre maksimum güç değerinin önemli miktarda azaldığı ifade edilmelidir. Aynı durum Durum-5 ve Durum-4 için de söylenebilir. Hem maliyet minimizasyonu hem de yük maksimizasyonu gerçekleşen Durum-3'te ise maksimum değerin Durum-1 ve Durum-3'e göre arada bir değer aldığı görülmektedir. Aynı sonucun Durum-6 için de söylenebileceği belirtilmelidir.

Tablo 4. Durum çalışmalarında ortaya çıkan yük faktörü değerleri

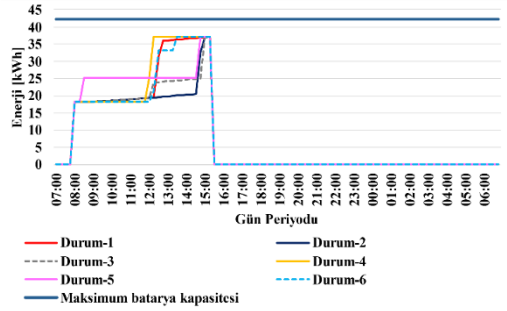
Durumlar	Yük Faktörü [0-1]
Durum-1	0.09122
Durum-2	0.920399
Durum-3	0.375244
Durum-4	0.091915
Durum-5	0.917058
Durum-6	0.372378



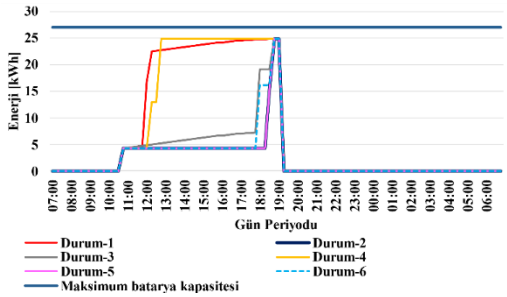
Şekil 8. Her bir durum çalışmasında elektrik şebekesinden çekilen güçler



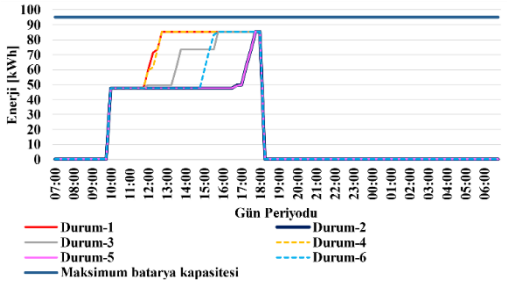
Şekil 9. EA 14'ün bataryasının enerji değişimi



Şekil 10. EA 61'in bataryasının enerji değişimi



Şekil 11. EA 135'in bataryasının enerji değişimi



Şekil 12. EA 166'nın bataryasının enerji değişimi

Tablo 4'te durum çalışmalarına ait yük faktörü değerleri yer almaktadır. Yük faktörünün güç sistem işletiminde çok önemli olduğu belirtilmelidir. Çünkü düşük yük faktörü üretilen elektriğin birim başına daha yüksek maliyet ile karşılandığı anlamına gelmektedir. Bu açıdan verimli ve ekonomik bir güç sistemi işletimi için yük faktörünün yüksek değerde olması önem arz etmektedir. İlgili yük faktörü verileri otoparkın 07:00-21:00 saatleri arasında çalıştığı düşünülerek bu duruma göre gerçekleştirilmiştir. Maliyetin minimize edilmek istendiği Durum-1'de yük faktörü değeri 0,09122 iken, amaç fonksiyonu değiştirilip yük faktörü minimize edilmek istendiğinde ise yük faktörü 0,920399 gibi yüksek bir değere çıkartılabilmiştir. Benzer şekilde Durum-4 ve Durum-5 için de aynı sonuçlar geçerlidir. Hem yük faktörünün maksimizasyonu hem de maliyet minimizasyonu olan durum çalışmalarında (Durum-3 ve Durum-6) ise her iki amacın da karşılanması sebebiyle arada bir değerde oldukları söylenebilir. Tablo 3 ve 4 incelendiğinde otoparkın işletiminin istenen amaç doğrultusunda maliyeti düşürmek ya da yük faktörünü maksimize etme hedefini gerçekleştirdiğinin altı çizilmelidir. Ayrıca otopark işletmecisi her iki amacı da aynı anda gerçekleştirmek istiyorsa da maliyet ve yük faktörünün arada bir değerde gerçekleştiği belirtilmelidir. Buradan önerilen yöntemin etkinliği açık bir şekilde görülebilmektedir.

Durum çalışmalarında EA'ları şarj etmek için elektrik şebekesinden satın alınan enerji miktarları Şekil 8' de verilmektedir. Durum-1'te Durum-4'te toplam şarj maliyeti minimize edilmek istendiği için elektrik birim fiyatının ucuz olduğu 12:00-13:00 aralığında şarj gücünün önemli derecede arttığı görülmektedir. Durum-2 ve Durum-5'te ise şebekede çekilen güç miktarı yük faktörünü maksimize etmek için 19:30'a kadar sabit olarak gerçekleşmiştir. Maliyetin ve yük faktörünün ikisinin de dikkate alındığı Durum-3 ve Durum-6'da ise her iki amacında gerçekleştirilmesi için şebekeden çekilen gücün her iki durumdaki karakteristiğe de benzediği söylenebilir. Örneğin elektrik fiyatının en ucuz olduğu 12:00-13:00 aralığında maksimum seviyede güç çekilirken diğer periyotlarda da bu seviyeye yakın güç çekilmeye çalışıldığı söylenebilir. Ayrıca, Durum-1'de bir günlük işletim sonucunda şebekeden 5965.38 kWh'lik enerji çekildiği belirtilmelidir.

Seçilen bazı EA'ların otoparkta kaldıkları süre içerisindeki enerji durumları Şekil 9, 10, 11 ve 12'de verilmektedir. Fotovoltaik panele sahip EA 14, EA 61 ve EA 135 ile panele sahip olmayan EA 166'nın enerji durumlarına ait veri sırasıyla bu şekillerde verilmektedir. Elektrik maliyetinin minimize edildiği Durum-1 ve Durum-4'te araçların elektrik fiyatının ucuz olması sebebiyle bataryalarının önemli bir miktarının 12:00-13:00 aralığında doldurulduğu belirtilmelidir. Fotovoltaik panellerin şarj için az miktarda da olsa bir katkı sağladığı sonucuna ulaşılabilir. Burada yüzey alanı daha büyük bir panelin kullanımı yani araç üzerindeki tasarımın değişmesi ile üretilecek güneş enerjisi miktarı artacağı için ekonomik açıdan daha verimli şarj gerçekleştirilebilir. Hatta araç uzun süre güneş alan bir konumda ise şebekeden hiç şarj olmadan da bataryası dolabilir. EA'ların otoparktan ayrıldıkları anda bataryalarının istedikleri enerji durumunda olduğu belirtilmelidir. Şekillerde enerji durumundaki az eğilimli artış fotovoltaik enerjiden şarjı temsil etmektedir. Diğer durum çalışmalarında ise otoparktaki tüm araçlarda göz önünde bulundurularak belirtilen amaç doğrultusunda şarj işlemi gerçekleştirilmektedir. Şekil 9, 10, 11 ve 12'de EA bataryalarının enerji durumunun sıfır olması EA'nın henüz şarj istasyonuna gelmediğini ya da şarj işlemi sonrası istasyondan ayrıldığını ifade etmektedir. EA bataryalarının sadece istasyonda olduğu süre için enerji değerleri mevcuttur.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada fotovoltaik panellere sahip olan EA'lara da hizmet veren bir EA şarj otoparkının enerji maliyet minimizasyonu ve yük faktörü maksimizasyonunu dikkate alan çok amaçlı bir işletim stratejisi önerilmektedir. Sunulan yapı karışık tam sayılı doğrusal programlama yöntemi ile modellenmiştir. Çalışmanın etkinliğinin kanıtlanması için 140'ını fotovoltaik panele sahip olduğu ve toplam 200 aracın geldiği bir otopark düşünülerek test çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Elektrik fiyatları için Türkiye gün öncesi elektrik fiyatları kullanılırken, fotovoltaik panellerdeki güç üretimi için Edirne iline ait gerçek küresel radyasyon verisi değerlendirilmiştir. Otopark enerji yöneticisi amaç fonksiyonunu enerji maliyeti azaltma olarak belirlemesi durumunda maliyet en az seviyede iken işletimi yük faktörünün iyileştirme olarak belirlediği durumda ise şebekeden çekilen maksimum güç miktarının önemli derecede azalmaktadır ve yük faktörü değeri artmaktadır. Ekonomik işletimdeki 0.091 olan yük faktörü değeri 0.92 değerine çıkartılabilmektedir. Burada yük faktörünün artması sonucuyla maliyetin arttığı da ifade edilmelidir. Otopark yöneticisinin her iki amacı da birlikte gerçekleştirmek istediği durumda ise maliyet ve yük faktörü ara değerlerde yer almaktadır. Elde edilen sonuçlara göre önerilen yöntemin otopark için istenen sonucu sağlayabildiği görülmektedir. Bu çalışma ile otoparklar hem ekonomik olarak işletilebilmekte hem de elektrik şebekesinin verimli bir şekilde işletilebilmesi için önemli bir parametre olan yük faktörü iyileştirilebilmektedir.

Gelecek çalışmalarda EA'lardan şebekeye enerji desteğinin, EA davranışlarına ait belirsizliklerin, farklı türdeki EA'ların üzerindeki farklı teknik özelliklere sahip PV panel yapılarının, araçların şarj durumunda üzerinde açılır yapıya sahip PV panel tasarımının ve gölgeleme durumlarının da dikkate alındığı bir çalışma gerçekleştirilebilir.

Teşekkür

Bu çalışmayı Burak Şafak ve Deniz Özekinci lisans eğitiminde almış oldukları mühendislik projesi dersi kapsamında ve Doç. Dr. Alper Çiçek danışmanlığında gerçekleştirmişlerdir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

[1] International Energy Agency (IEA), Technology needs in long-distance transport. https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020/technology-needs-in-long-distance-transport, Accessed 10 June 2023.

[2] F. Leach, G. Kalghatgi, R. Stone, and P. Miles, The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines. Transportation Engineering, 1, 100005, 2020. doi: https://doi.org/10.1016/j.treng.2020.100005.

[3] S. TURAN ve S. B. Efe, Elektrikli bisiklet paylaşımı: çanakkale onsekiz mart üniversitesi terzioğlu yerleşkesi örneği. Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi, 3 (2), 112-122, 2020.

[4] A. Çiçek, S. Güzel, O. Erdinç, and J. P. S. Catalão, Comprehensive survey on support policies and optimal market participation of renewable energy. Electric Power Systems Research, 201, 107522, 2021. doi: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107522.

[5] International Energy Agency (IEA), Global EV Outlook 2020. https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020, Accessed 10 June 2023.

[6] N. Neyestani, M. Y. Damavandi, M. Shafie-Khah, J. P. S. Catalão, and J. Contreras, PEV parking lot behavior equilibria in energy and reserve markets, IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp. 1-5, Denver, CO, USA, 26-30 July 2015.

[7] Ö. Bingöl and A. Yıldız, Fuzzy logic and proportional integral derivative based multi-objective optimization of active suspension system of a 4×4 in-wheel motor driven electrical vehicle, Journal of Vibration and Control, 29 (5-6), 1366-1386, 2023. doi: https://doi.org/10.1177/1077546321106269.

[8] L. Chen, C. Y. Chung, Y. Nie, and R. Yu, Modeling and optimization of electric vehicle charging load in a parking lot, IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), pp. 1-5, Hong Kong, China, 08-11 December 2013.

[9] E. Mohammadi, R. Fadaeinedjad, M. Rashidinejad, and A. Mahdavinia, Optimal placement and charge/discharge scheduling of electric parking lots considering reactive power generation capability, Smart Grid Conference (SGC), pp. 1-6, Tehran, Iran, 20-21 December 2017.

[10] H. Wu, G. K. H. Pang, K. L. Choy, and H. Y. Lam, A scheduling and control system for electric vehicle charging at parking lot, 11th Asian Control Conference (ASCC), pp. 13-18, Gold Coast, QLD, Australia, 17-20 December 2017.

[11] D. Güneş, İ. G. Tekdemir, M. Ş. Karaarslan, ve B. Alboyacı, Elektrikli araç şarj istasyonu yüklerinin güvenilirlik indisleri üzerine etkilerinin incelenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33 (3), 1073-1084, 2018. doi: https:/10.17341/gazimmfd.416408.

[12] A. Çiçek ve O. Erdinç, PV-batarya hibrit sistemi içeren elektrikli araç otoparkının şarj yönetimi, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 15, 466-474, 2019, doi:https://doi.org/10.31590/ejosat.527350.

[13] O. Kırat ve A. Çiçek, Nesnelerin interneti uygulamalarıyla rezervasyon sistemli ve PV destekli bir elektrikli araç şarj istasyonunun işletimi: bir üniversite örneği, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 25 (75), 659-674, 2023. doi: https://doi.org/10.21205/deufmd.2023257512.

[14] W. Jiang and Y. Zhen, A real-time EV charging scheduling for parking lots with PV system and energy store system, IEEE Access, 7, 86184-86193, 2019. doi: https:/10.1109/ACCESS.2019.2925559.

[15] V. Lakshminarayanan, V. G. S. Chemudupati, S. K. Pramanick, and K. Rajashekara, Real-time optimal energy management controller for electric vehicle integration in workplace microgrid, IEEE Transactions on Transportation Electrification, 5 (1), 174-185, 2019. doi: https:/10.1109/TTE.2018.2869469.

[16] İ. Şengör, S. Güner, and O. Erdinç, Real-time algorithm based intelligent EV parking lot charging management strategy providing PLL type demand response program, IEEE Transactions on Sustainable Energy, 12 (2), 1256-1264, 2021. doi: https://doi.org/10.1109/TSTE.2020.3040818.

[17] A. Mohammad, R. Zamora, and T. T. Lie, Transactive energy management of PV-based EV integrated parking lots, IEEE Systems Journal, 15 (4), 5674-5682, 2021. doi: https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.3043327.

[18] G. G. Zanvettor, M. Casini, R. S. Smith, and A. Vicino, Stochastic energy pricing of an electric vehicle parking lot, IEEE Transactions on Smart Grid, 13 (4), 3069-3081, 2022. doi: https://doi.org/10.1109/TSG.2022.3160229.

[19] S. Kaya ve N. Fığlalı, Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde pareto optimal kullanımı', Social Sciences Research Journal, 5 (2), 9-18, 2016.

[20] A. Çiçek, İ. Şengör, S. Güner, F. Karakuş, A. K. Erenoğlu, O. Erdinç, M. Shafie-Khah, and J. P. S. Catalão, Integrated rail system and EV parking lot operation with regenerative braking energy, Energy Storage System and PV Availability', 13 (4), 3049-3058, 2022. doi: https://doi.org/10.1109/TSG.2022.3163343.

[21] Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. (EPİAŞ), Piyasa Takas Fiyatı,https://seffaflik.epias.com.tr/electricity/electricity-markets/day-ahead-market-dam/market-clearing-price-mcp, Accessed 10 June 2023.

[22] NASA, Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER). https://power.larc.nasa.gov/, Accessed 10 June 2023.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 010-027
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
Araştırma makalesi / Research article
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Seismic behavior assessment of RC buildings controlled by passive and active techniques

Pasif ve aktif tekniklerle kontrol edilen betonarme binaların sismik davranışlarının değerlendirilmesi

Mustafa Ergün[1,*], Mehmet Uyar[2]

[1] *Bayburt University, Department of Civil Engineering, 69000, Bayburt, Türkiye*
[2] *Bayburt University, Department of Mechanical Engineering, 69000, Bayburt, Türkiye*

Abstract

In this paper, a numerical study was carried out on the effectiveness of the active earthquake control method in improving the earthquake response of RC buildings. High damping rubber bearing design was made according to the criteria of the Uniform Building Code. Three different types of isolators were obtained geometrically. Passive earthquake control of the building was provided by placing these isolators under the columns. For active earthquake control of the building, controller design was realized by integrating it into the FE transient analysis in ANSYS. The active earthquake control design was studied using a force-based and displacement-based controller with acceleration and displacement feedback. The linear dynamic earthquake analysis in the time history of all three states of the building (un-controlled, passive, and active-controlled) was made using the acceleration record of the Seferihisar (İzmir) earthquake. When the results are examined, it is seen that the active earthquake control method provides almost all of the positive behavior expected from the passive earthquake control method. In addition, it eliminates some of the disadvantages of the passive earthquake control method.

Keywords: Reinforced concrete building, High damping rubber bearing, Passive earthquake control, Active earthquake control, Actuator type, Actuator location

Öz

Bu makalede, betonarme binaların deprem davranışını iyileştirmede pasif deprem kontrol yöntemine bir alternatif olarak aktif deprem kontrol yönteminin etkinliği üzerine sayısal bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Binanın pasif kontrolü için gerekli olan yüksek sönümlü kauçuk izolatörlerin tasarımı Uniform Bina Yönetmeliği kriterlerine göre yapılmıştır. Geometrik olarak üç farklı tip izolatör elde edilmiştir. Bu izolatörler kolonların altına yerleştirilerek binanın pasif deprem kontrolü sağlanmıştır. Binanın aktif kontrolü için kullanılan kontrolör tasarımı, ANSYS'te sonlu eleman tabanlı zaman tanım alanında analizlere entegre edilerek gerçekleştirilmiştir. Aktif deprem kontrol tasarımı, ivme ve yer değiştirme geri beslemeli kuvvet tabanlı ve yer değiştirme tabanlı bir kontrolör kullanılarak incelenmiştir. Yapının her üç durumunun (kontrolsüz, pasif kontrollü ve aktif kontrollü) zaman tanım alanında doğrusal deprem analizi, Seferihisar (İzmir) depreminin ivme kaydı kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde aktif deprem kontrol yönteminin pasif deprem kontrol yönteminden beklenen olumlu davranışların tamamına yakınını sağladığı ve bununla birlikte pasif deprem kontrol yönteminin bazı dezavantajlarını da ortadan kaldırdığı görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme bina, Yüksek sönümlü kauçuk izolatör, Pasif deprem kontrolü, Aktif deprem kontrolü, Aktüatör tipi, Aktüatör konumu

1 Introduction

Earthquakes occur as due to compression, friction, and sliding movements that occur along the boundary lines of the plates that make up the Earth's crust (Figure 1a). According to the Global Earthquake Risk Map, it can be said that the earthquakes occurring on the Earth are concentrated in a specific region. Generally, earthquakes occur at the borders of the plates that make up the Earth's crust (Figure 1b). This supports the Elastic Rebound Theory, which argues that the energy accumulated in the Earth's crust of the earthquake is released by fault action. The regions where earthquakes are observed intensely are gathered in three main belts on Earth; Pacific Seismic Belt, Alpine-Himalayan Seismic Belt, and Atlantic Seismic Belt.

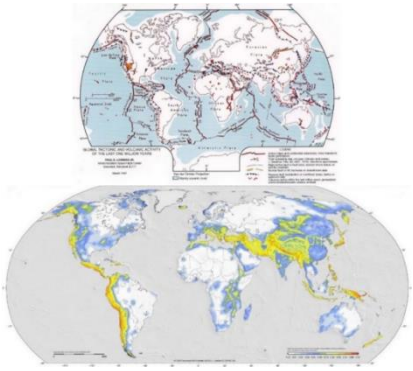


Figure 1. Plate tectonics map [1], Global earthquake risk map [2]

* Corresponding author, e-mail: mustafaergun@bayburt.edu.tr (M. Ergün)
Geliş / Recieved: 22.06.2023 Kabul / Accepted: 09.10.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngmuh.1318649

The seismotectonic structure of Turkey, located on the Alpine-Himalayan seismic belt, one of the most active seismic belts in the world, is formed mainly by the movements of the African-Arabian plates. Due to the spreading of the mid-Atlantic ridge toward both sides, the African-Arabian plates are moving towards the north-northeast. In addition, the northward movement of the Arabian plate due to the seafloor spreading along the Red Sea forces the Anatolian plate to subduct under the Eurasian plate (Figure 2).

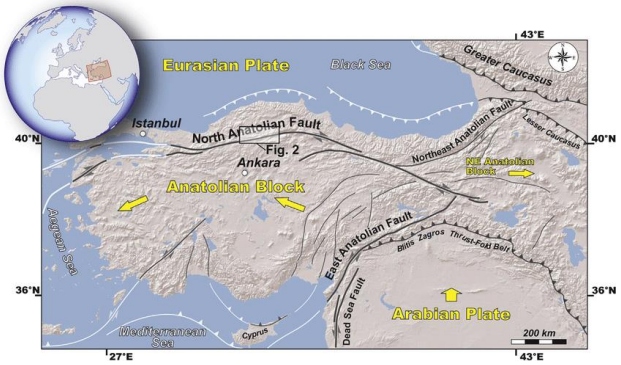


Figure 2. Position and directions of motion of the Anatolian plate [3]

Such a movement of the Anatolian plate creates numerous faults and, as a result, earthquakes. As a result of this migration, two major faults developed: the North Anatolian Fault and the East Anatolian Fault. Compression movement has occurred in these faults for millions of years, Turkey's primary cause of earthquakes. In the Greece-Aegean geography, the Earth's crust tries to stop the Anatolian plate from moving westward. This obstacle forces Western Anatolia to expand, resulting in depressions and elevation zones known as graben and horst. The fault that developed due to this migration is known as the West Anatolian Fault.

Turkey’s lands, population, and industrial facilities are in active earthquake zones. Since the establishment of the Republic of Turkey, severe earthquakes have occurred in these lands over the years, and as a result, many people have lost their lives. In addition, many buildings have been destroyed or severely damaged. As a result, it is of great importance for Turkey, which is an earthquake country, to take some precautions against earthquakes that cause the death of hundreds of people and the destruction of thousands of buildings on average every year.

Many studies have been carried out in earthquake engineering and earthquake-resistant structure design to minimize these adverse effects of earthquakes on all living creatures for years. One of the most critical developments in this field is the seismic isolation systems that protect the buildings against the earthquake's devastating effects by reducing the earthquake forces transferred to the building. The load-bearing capacity, stiffness, ductility, stability, and inelastic deformation of a building can be increased by modifications to the structural system (conventional methods). Developed as an alternative to these traditional methods, seismic isolation systems are applied to minimize the destructive effects of earthquakes by increasing the energy consumption capacity and period of buildings [4,5].

The seismic isolation system, based on the idea of separating the foundation and ground, is applied to the structure with various types of isolators, extending the period of the structure, reducing the incoming earthquake load, and reducing the relative story drift. For this reason, the seismic isolation system has been widely used for years worldwide, both in designing new buildings against earthquakes and increasing the earthquake performance of existing buildings [6-44].

In addition to all these positive aspects of the seismic isolation system, some disadvantages should be considered. For example, (i) If the building is exposed to a more giant earthquake than the design earthquake, there may be permanent damage to the isolators and rupture. (ii) The costs of seismic isolators are pretty high. In addition, the need for an extra basement floor, deeper excavation of the foundation, and the surrounding of the foundation with retaining walls so that the structure can make displacement increase the cost of insulated buildings. (iii) Since seismic isolation systems prolong the periods of the structures, they are not suitable for buildings resting on soft soils. The seismic isolation system for buildings resting on soft ground will increase the earthquake load on the structure. In addition, considering the hammer effect that may occur during an earthquake in adjacent structures, seismic isolation system can cause significant damage to such buildings. (iv) Isolators cannot be partially applied to a building. It is applied to the building as an isolation system, such as an isolator group. Therefore, implementation efficiently is complex and often requires highly skilled laborers and engineers. (v) The seismic isolation system causes large displacements in the building. If the displacement values exceed the regulations' limits, risky situations may occur for the building.

One of the most important aims of this study is to use an alternative method that will both include the advantages of the seismic isolation system and eliminate the disadvantages mentioned above to enhance the seismic performance of RC buildings. For this purpose, an active earthquake control (AEC) system has been applied to the building.

Vibration control is one of the most effective methods for damping vibrations caused by earthquakes to protect people’s lives and ensure safety. ATMD achieves the AEC by creating a vibration response in the opposite direction to the movement of the building through the control force created with the actuator to dampen seismic vibrations. Many studies have been carried out on active and passive vibration control in buildings to minimize seismic vibrations caused by earthquakes. Umutlu et al. [45] designed a robust adaptive controller to suppress the undesired vibrations from an earthquake on multistory buildings. Soleymani et al. [46] proposed a new robust control approach, a two-loop sliding mode controller with a dynamic state predictor to suppress the vibrations of a high-rise building. Collette and Chesné [47] proposed a hybrid mass damper (HMD) design consisting of passive and active elements. To reduce the vibration amplitudes of a multi-degrees-of-freedom structure, the power consumption and vibration reduction

amounts are presented in comparison with the direct speed feedback controller and the classical control method. Mamat et al. [48] compared the effectiveness of sliding mode control and fuzzy logic controller applied the structural vibration control. Guclu and Yazici [49] designed the fuzzy logic and PD controllers with an ATMD to reduce the effect of earthquake vibrations in a multi-degree-of-freedom building. Also, PID and sliding mode controller (SMC) are separately improved to simulate the ground motion of the Marmara earthquake for a multi-degree-of-freedom structural system. Xu et al. [50] studied an ATMD-based vibration control that considers the actuator saturation to reduce vibrations generated against seismic excitations in adjacent buildings. Heidari et al. [51] simulated seismically excited structures to compare the performance of a hybrid active control method consisting of PID and LQR control algorithms. Karami et al. [52] designed a new semi-ATMD controller that combines damage detection and semi-active control approach due to structural frequency variations.

When all these studies are examined, it can be seen that the AEC method with an actuator gives significant results in damping earthquake vibrations in buildings. In addition to the results from these studies, this study demonstrates that AEC is a powerful alternative to passive earthquake control (PEC) in improving the seismic performance of RC buildings, with a case study on an actual RC building model. Active vibration control studies in the literature are generally based on frame systems. Studies on real 3D building models are limited. In this study, a real 3D building model was used. Besides, some problematic situations of PEC mentioned above have been eliminated by AEC.

This study has been completed by completing the following basic steps: i) Linear dynamic earthquake analyses in the time history of the uncontrolled building were performed using the acceleration record of the Seferihisar (İzmir) earthquake. ii) The design of the high-damping rubber bearing (HDRB) was made by the Uniform Building Code (UBC-97) [53] and Turkey Earthquake Building Code (TEBC-2018) [54] criteria. iii) Linear dynamic earthquake analyses in the time history of the passive earthquake-controlled building were performed using the acceleration record of the Seferihisar (İzmir) earthquake. iv) The active force-based and displacement-based control designs were proposed with acceleration and displacement feedback. The control design was adopted for the proportional-integral-derivative (PID) control system for the building excited to the earthquake. Linear dynamic earthquake analyses in the time history of the active earthquake-controlled building were performed using the acceleration record of the Seferihisar (İzmir) earthquake. v) As a result of the analysis made for all three cases, the maximum displacement, velocity, and acceleration values along the height of the building were obtained as the earthquake behavior parameters of the structure. Besides, displacement, velocity, and acceleration values read in time history from selected nodes were taken. vi) By comparing the obtained results, it has been revealed that AEC can be a powerful alternative to PEC in improving the seismic performance of RC buildings. It has also been shown that AEC can eliminate some of the known disadvantages of PEC.

1.1 Model description

The studies in this paper were carried out on an RC building. The skeleton system of the building consists of a traditional frame system. The building, whose plan, longitudinal section, and 3D views are given in Figure 3, has three floors, each 3 m high, and has two spans of 5 m in the x and y directions.

The vertical carrier system of the building consists of only columns. Reinforced concrete shear walls were not used. The dimensions of the columns are the same throughout the height of the building, and the value is 40/40. There are 36 beams in total in the building. The dimensions of the beams are 25/50. Except for the attic beams, all have brick walls 13 cm thick. The value of the constant load transferred from the walls to the beams is 0.25 t/m^2. The building consists of 12 slabs in total. The thickness of the slabs is 15 cm. There are dead and live loads on all slabs with values of 0.15 t/m^2 and 0.2 t/m^2, respectively. The same type of material was used for all the structural elements; C25/B420C. The effect of the rebar on the structural behavior was neglected; only its weight was considered in the analyses. C25 concrete class, whose characteristic features are shown in Table 1, has been selected considering the code criteria. Because according to TEBC-2018, there is a condition that concrete cannot be used in a class lower than C25 in the construction of RC buildings.

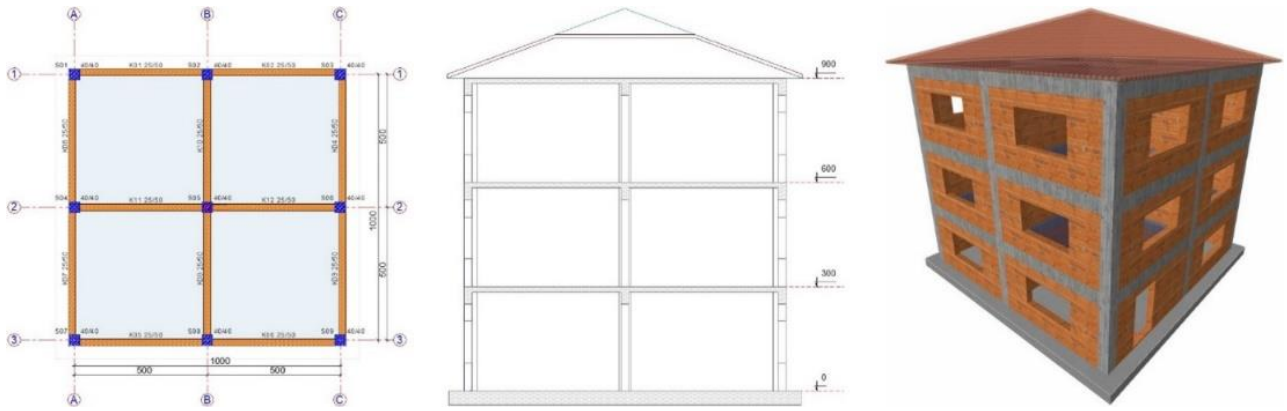


Figure 3. Geometric characteristics of building

Table 1. C25 concrete

Characteristic cylinder compressive strength (MPa)	25
Mean tensile strength (MPa)	1.75
Factor of safety	1.5
Elastic modulus (MPa)	30250
Shear modulus (MPa)	12604.167
Poisson's ratio	0.2
Density (N/mm^3)	0.000025
Coefficient of linear thermal expansion	10^{-5}

Seferihisar district of İzmir province was chosen as the region where the building will be constructed. The reason for choosing this region is that one of the last devastating earthquakes in Turkey occurred in this region in 2020. As a result, including a region with seismic activity in the analysis produced more realistic results. In the section that follows, specific details regarding the area's seismic activity are provided.

1.2 Seismicity of the region

Under the Western Anatolian Opening Regime, Izmir province is positioned at the western end of the Gediz Graben system. E-W trending normal faults are located near the west end of the Gediz Graben, as seen in the active fault map of Turkey created by the General Directorate of Mineral Research and Exploration (MTA) in 2011. In contrast, NE-SW and NW-SE faults are concentrated around Izmir (Figure 4). Also, the active faults of Gumudur, Yeni Foca, Seferihisar, Guzelhisar, Gulbahce, Kiraz, Menemen, Tuzla, Izmir, and Mordagan may be a source of earthquake activity in the region.



Figure 4. Distribution of active faults in the region [55]

Since 1900, 695 M>=4.0 earthquakes, the largest of which is 6.8, have occurred in the region. In addition, there are 332 historical earthquake records for the region before 1900 (Figure 5).

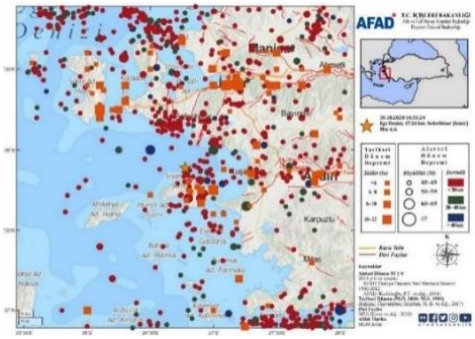


Figure 5. Historical and instrumental period earthquake activity of the region [56].

According to the previous Turkey Regional Earthquake Map, İzmir is in the earthquake zone I category (Figure 6a). The new map depicts peak ground acceleration values depending on the distances to the faults rather than dividing the country into earthquake zones with specific boundaries (Figure 6b). It was published in March 2018 with more detailed seismic hazard analysis, including next-generation mathematical algorithms, instrumental and historical earthquake catalogs, and the most recent earthquake source parameters. In the Turkey Earthquake Hazard Map, the maximum acceleration value of İzmir province PGA 475(year) varies between 0.3-0.5g. This parameter shows that the region's earthquake risk is relatively high, and the earthquake phenomenon must be considered in designing new buildings to be built here.

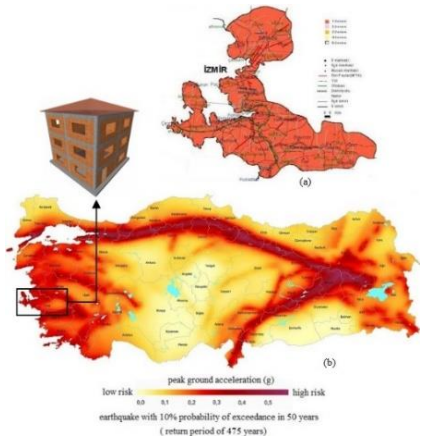


Figure 6. Regional earthquake map (a) and Turkey's new earthquake hazard map (b) [56]

2 Studies

Various numerical analyses were carried out in the studies section of the paper following the previously specified purpose and objectives. This section was split into three main subheadings; i) studies on dynamic earthquake analysis of RC buildings fixed to the ground (Un-controlled), ii) studies on the dynamic earthquake analysis of RC buildings with seismic isolation (passive earthquake control) at foundation level, iii) studies on dynamic earthquake analysis of reinforced concrete building under the influence of active earthquake control method. All building analyses considered in this study were carried out simultaneously using SAP2000 [57] and ANSYS [58] package programs. The studies carried out under these sub-headings are explained in detail in the following sections.

2.1 Dynamic earthquake analysis of un-controlled RC building

The dynamic earthquake analysis of the building considered in this section was made using ANSYS. The building was modeled in three dimensions, adhering to the geometric and material properties in the previous section and the finite element method (FEM) criteria. Shell components represented slabs in the FEM, while frame elements represented beams and columns. The FEM had 372

connection points, 300 shell elements, and 153 frame elements. The model has 10 m, 10 m, and 9 m dimensions in the X, Y, and Z axes, respectively (Figure 7).

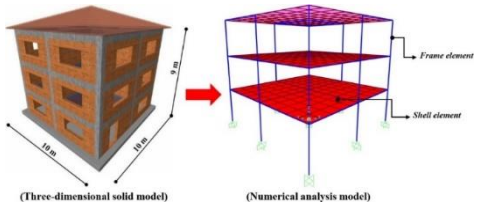


Figure 7. Three-dimensional solid and numerical models of the un-controlled RC building

For the frame and shell elements on the numerical analysis model, BEAM188 and SHELL181 element types from the ANSYS library were preferred, respectively. The geometric properties of both elements are given in Figure 8.

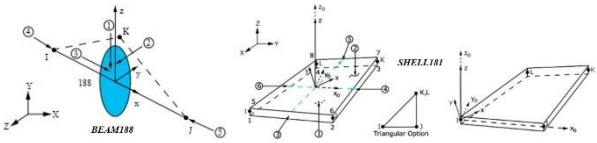


Figure 8. Geometric properties of BEAM188 and SHELL181 elements, respectively [58]

BEAM188 is an element used to analyze particularly thin and, in some cases, reasonably stubby/thick frame elements. The numerical model for this element is based on the Timoshenko beam theory, which considers shear-deformation effects. It contains six degrees of freedom at each node, including rotations around the x, y, and z axes and translations in the x, y, and z directions—this element best serves linear, large rotational, and nonlinear strain applications [58].

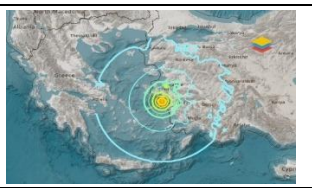
SHELL181 is an element type that can study moderately thick shell elements. It is a four-node element with six degrees of freedom at each node, including rotations around the x, y, and z axes and translations in the x, y, and z directions. This element best serves linear, large rotational, and nonlinear strain applications [58].

The seismic sensitivity evaluation of the building considered in this study was evaluated under the influence of the Seferihisar (Izmir) earthquake. It happened offshore in the Aegean Sea on October 30, 2020, at 14:51 Turkish time, between Samos Island's north and Doganbey-İzmir. The earthquake's moment magnitude was recorded at 6.6, and the focal depth is around 15 km. The closest community, Doanbey Payamli village in Izmir's Seferihisar district, is 23.38 kilometers from the earthquake's epicenter. The precise duration of the quake was determined as 15.68 seconds. A large area encompassing the Aegean and Marmara areas and the province and districts of İzmir felt the effects of the earthquake. According to the intensity map produced using the Earthquake Preliminary Damage Estimation System (AFAD-RED) [56], the earthquake's intensity in the settlement closest to the earthquake's epicenter, within Turkey's borders, was calculated as MMI VII.

The characteristics of the Seferihisar (İzmir) earthquake are given in Table 2. The graphs of the acceleration, velocity, and displacement records for both horizontal components of the earthquake are shown in Figures 9-11, respectively. The earthquake records were taken from the Aydın (Kusadasi) station (PGA: 18.279 cm/s2, PGV: 7.845 cm/s, PGD: 2.257 cm).

Table 2. The characteristics of the Seferihisar (İzmir) earthquake [56].

PGA (cm/s^2)	179.31 (TK.0905 NS, Repi:49.38 km)
PGV (cm/s)	22.53 (TK.3519 NS, Repi:73.08 km)
PGD (cm)	5.16 (TK.3518 UD, Repi:72.48 km)



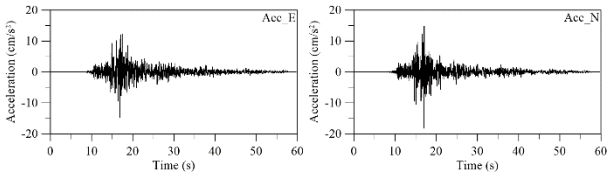


Figure 9. Acceleration records of the Seferihisar (İzmir) earthquake [56]

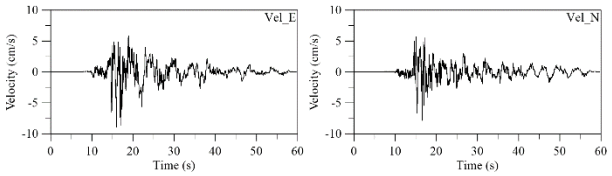


Figure 10. Velocity records of the Seferihisar (İzmir) earthquake [56]

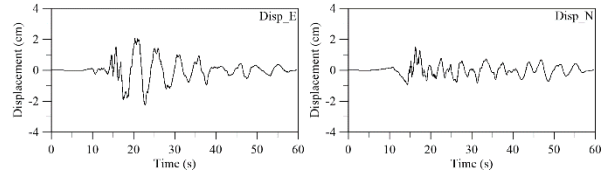


Figure 11. Displacement records of the Seferihisar (İzmir) earthquake [56]

Free vibration analysis was made to define the modal manner of the building to be necessary before starting the earthquake analysis in the time history of the building. The adequate number of vibration modes to be considered in the free vibration analysis should be established according to the total of the effective modal masses of the base shear force calculated for each mode in the (X) and (Y) directions. This value cannot be less than 95% of the building's overall mass. [54]. As a result of the analysis, this criterion was met for the first ten modes. Total mass participation rates in the building's X and Y directions were calculated to be 99% for each (Figure 12). The first three mode shapes and dynamic properties of the structure are also given, respectively, in Figure 13 and Table 3.

Table 3. Comparison of dynamic characteristics of the building according to different package programs.

Packaged Software	Mode I			Mode II			Mode III		
	Frequency (Hz)	Period (s)	Angular Freq. (rad/s)	Frequency (Hz)	Period (s)	Angular Freq. (rad/s)	Frequency (Hz)	Period (s)	Angular Freq. (rad/s)
ANSYS	2.427	0.412	15.249	2.427	0.412	15.249	3.052	0.328	19.176
SAP2000	3.033	0.330	19.057	3.033	0.330	19.057	3.876	0.258	24.354
ideCAD	2.328	0.430	14.627	2.328	0.430	14.627	2.800	0.357	17.593

Dynamic characteristics give us essential information about whether the numerical model of any structure is correct. In this study, the dynamic characteristics of the building were calculated numerically. No model validation was performed with an experimental study such as operational modal analysis. For this reason, free vibration analysis of the building was performed using three different software package programs. When the data given in Table 3 are examined, it is seen that the results are consistent and very close to each other. This shows that the numerical model of the building is correct.

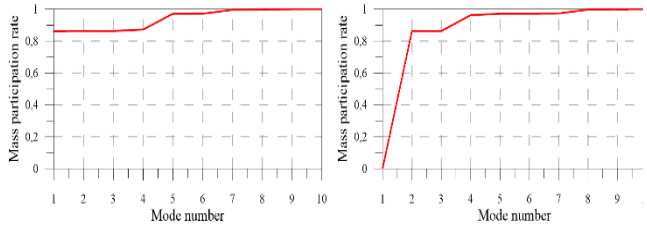


Figure 12. Total mass participation ratios in the X and Y directions, respectively

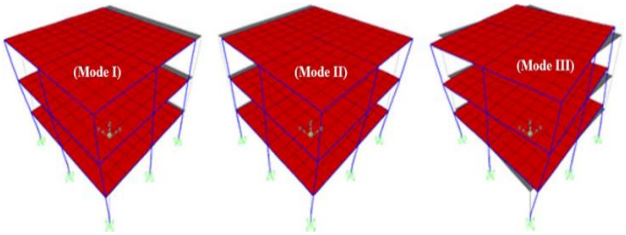


Figure 13. The first three mod shapes of the building

It was observed that the structure's concrete and rebar materials remained in the liner-elastic region as a result of the preliminary dynamic analysis. In addition, the second-order effects that occurred were also within the allowable limit values. When the structural behavior parameters obtained as a result of both linear and nonlinear analyzes were examined, it was seen that there were no meaningful differences between the results. In addition to all these reasons, linear analysis was chosen as the dynamic earthquake analysis method to save time and labor.

Linear dynamic earthquake analyses in the time history of the building were performed using the Acc_E record of the Seferihisar (İzmir) earthquake with the help of the ANSYS program. The reason for using this earthquake record is that the PGA value of this record is greater than one of the Acc_N records (Figure 9). The five-second period with the peak acceleration values was used to shorten the analysis time. The earthquake effect was applied in the X-direction, which is the dominant vibration mode direction of the structure. As a result of the analysis, the maximum displacement, velocity, and acceleration values along the height of the structure were obtained as the earthquake behavior parameters of the building. Besides, displacement, velocity, and acceleration values read in time history from A, B, and C nodes were taken. These results are shown in Figures 14-17.

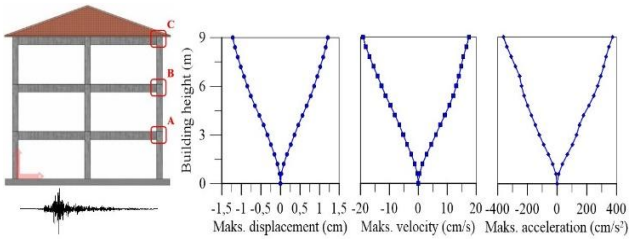


Figure 14. Distribution of maximum displacement, velocity and acceleration values along the height of the building

Figure 14 indicates the maximum amplitudes of displacement, velocity, and acceleration responses at each node along the stories in the building. For uncontrolled situations, maximum displacement, velocity, and acceleration values are approximately ±1.5 cm, ±20 cm/s, and ±400 cm/s2, respectively. As seen in Figure 14, vibration amplitudes tend to increase almost linearly along the height of the building. This situation causes the relative structural behavior to be large and the internal forces to increase accordingly.

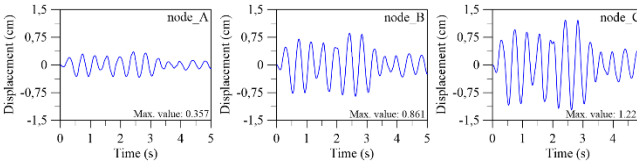


Figure 15. Time history displacements at nodes A, B, and C, respectively

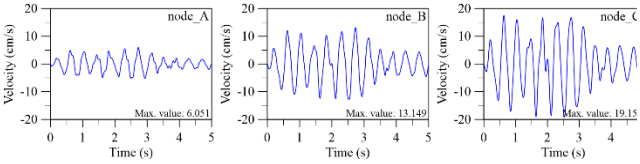


Figure 16. Time history velocities at nodes A, B, and C, respectively

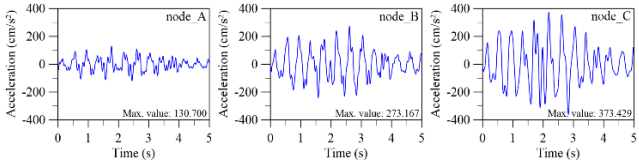


Figure 17. Time history acceleration at nodes A, B, and C, respectively

Figures 15-17 represent the displacement, velocity, and acceleration results at nodes A, B, and C, separately, for the uncontrolled situation of the building. Maximum displacement values were found as 0.357 cm, 0.861 cm and 1.221 cm while velocity values were calculated as 6.051 cm/s, 13.149 cm/s and 19.152 cm/s for node A, B and C, respectively. Also, maximum acceleration values of 130.700 cm/s^2, 273.167 cm/s^2 and 373.429 cm/s^2 at node A, B and C were obtained. As can be seen from the figures, it is seen that the maximum vibration oscillation occurs at the top floor, and this oscillation is relatively lower on the first and second floors.

2.2 Dynamic earthquake analysis of seismic-isolated (passive earthquake controlled) RC building

In countries such as Turkey, where the majority of the population is at risk of earthquakes, the most critical natural event that should be considered in the design of almost all structures is the earthquake phenomenon. Depending on the gains obtained from years of experience, various studies have been carried out in earthquake engineering to protect structures against earthquake effects. One of the most important results of these studies, the concept of seismic isolation, also known as PEC, has emerged, and it has been widely preferred as a carrier system type, especially in the design of buildings. The seismic isolation system, based on the idea of separating the foundation and ground, is applied to the structure with different types of isolators, extending the period of the structure, reducing the incoming earthquake load, and reducing the relative story drift.

This study used HDRB to convert the existing building to a seismic isolation system. HDRB has been produced by the British institution "Malaysian Rubber Producer Research Association" against the disadvantages of low-damped and lead core isolators. The essential advantages of HDRB compared to other isolators can be listed as providing the necessary flexibility and damping without the need for another element, easy design, and easy production.

The effective behavior of the seismic isolation system in the event of an earthquake is highly dependent on the mechanical properties of the selected isolators. For this reason, it is essential to design a structure-specific isolator system instead of the existing isolators in the market. In this study, the design of building-specific HDRB was made by the Uniform Building Code (UBC-97) [53] and Turkey Earthquake Building Code (TEBC-2018) [54] criteria.

The steps followed in the design of high-damping rubber bearings are given below, step by step and in detail. Before starting the isolator design, it is necessary to collect some preliminary information required for the design. This information is used as input data in the isolator design. Data are taken both from the structure and the relevant codes. The data taken for the design of HDRB are given in Table 4.

Table 4. Input data for HDRB design

First vibration period of the building (T_1)	0.412 s
Target (design) period (T_D)	1.236 s
Target maximum period (T_M)	1.5 s
Number of isolators	9 (total number of columns)
Total weight of the building (W)	1972.608 kN
Seismic zone factor (Z)	0.4 for 0.3-0.5g
Ground profile type	S_D (Hard soil)
Seismic source type	A
Near-source factors	N_v=1.6 / N_a=1.2
Seismic coefficients	C_{AM}=0.634 / C_{VM}=1.229
Damping coefficient	$B_{D,M}$=1.2 ($\beta_{D,M}$=10%)
Structural system behavior coefficient	R=8.5 / R_1=2

There are nine columns in total in the building. An isolator was placed under each column. The axial load on the columns is the primary data in the isolator design. Considering these data, it was seen that three different types of isolators were needed for the building; i) Type_A for S01, S03, S05, and S07 columns, ii) Type_B for S02, S04, S06, and S08 columns, iii) Type_C for S05 column (Figure 18).

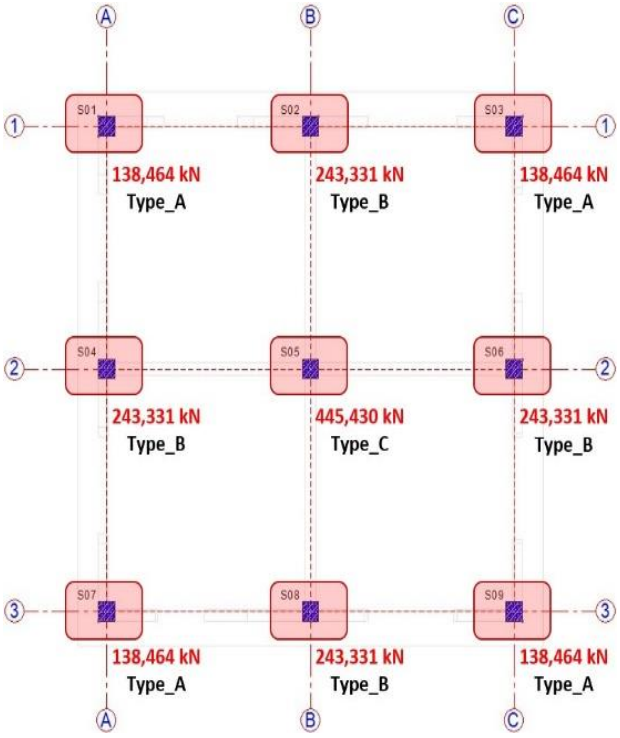


Figure 18. Axial loads on the columns and isolator types depending on this load

Considering the equations and criteria in the relevant codes, the mechanical properties defining the structural behavior of the HDRB in the event of an earthquake, in other words, the design outputs, were calculated and given in Table 5.

Table 5. Output data for HDRB design

Design displacement (D_D)	0.262 m
Maximum displacement (D_M)	0.382 m
Minimum horizontal stiffness (k_D)	364.746 kN/m for Type_A, 640.990 kN/m for Type_B 1173.365 kN/m for Type_C
Isolator height (t_r)	25 cm
Isolator diameter (R)	35 cm for Type_A 45 cm for Type_B 60 cm for Type_C
Horizontal stiffness (K_H)	384.845 kN/m for Type_A 636.173 kN/m for Type_B 1130.973 kN/m for Type_C
Effective vibration period (T_D)	1.231 s
Vertical stiffness (K_V)	105656.843 kN/m for Type_A 265409.582 kN/m for Type_B 722553.191 kN/m for Type_C
Vertical design displacement (Δt)	0.0009 m
Plastic stiffness (K_2)	384.845 kN/m for Type_A 636.173 kN/m for Type_B 1130.973 kN/m for Type_C
Elastic stiffness (K_1)	2309.070 kN/m for Type_A 3817.038 kN/m for Type_B 6785.838 kN/m for Type_C
Isolator shear force (Q)	48.462 kN for Type_A 85.166 kN for Type_B 155.901 kN for Type_C
Yield displacement (D_y)	0.025 for Type_A 0.027 for Type_B 0.028 for Type_C
Equivalent stiffness (K_{eff})	569.814 kN/m for Type_A 961.234 kN/m for Type_B 1726.015 kN/m for Type_C
Yield strength (F_Y)	57.727 kN for Type_A 103.060 kN for Type_B 190.003 kN for Type_C

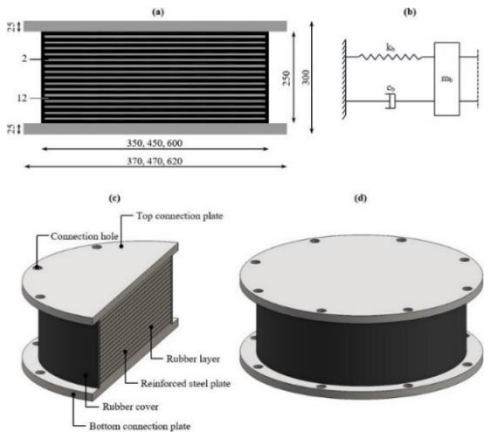


Figure 19. High damping rubber bearing (HDRB): (a) dimensional properties; (b) analytical model; (c) components; (d) three dimensional model

One of the crucial parameters describing the behavior of an isolator under the influence of earthquakes is the force-displacement curves. Force-displacement curves obtained for Type_A, Type_B, and Type_C isolators are shown in Figure 20.

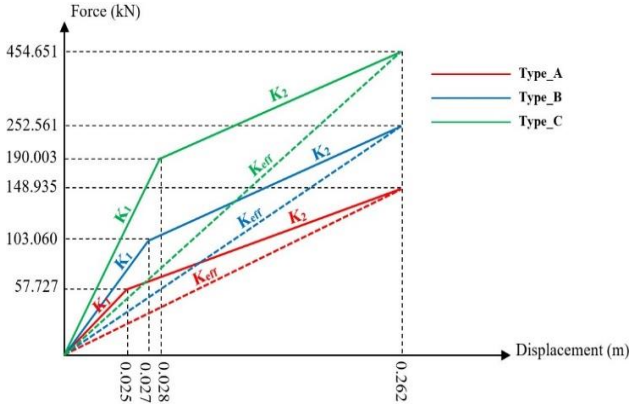


Figure 20. Force-displacement curves of isolators

The suitable element type for HDRB in ANSYS is COMBIN39. The non-linear behavior of the element operates only in static and non-linear transient dynamic analyses [58]. However, in this study, the linear dynamic analysis type was preferred for the reasons explained in the previous sections. The linear dynamic analysis for the whole structure in the SAP2000 program does not affect the non-linear behavior of the isolators. For this reason, the SAP2000 program was preferred in this section. According to the TEBC-2018, only the isolation units can be modeled for non-linear behavior in the building model, while the superstructure and substructure can be modeled as linear elastic [54].

Shell components represented slabs in the FEM, while frame elements represented beams and columns. The FEM had 381 connection points, 300 shell elements, and 153 frame elements. The model has dimensions of 10 m, 10 m, and 9 m in the X, Y, and Z axes, respectively (Figure 21).

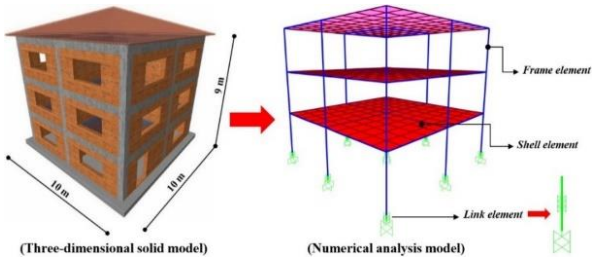


Figure 21. Three-dimensional solid and numerical models of the seismic-isolated RC building

For the frame, shell, and link elements on the numerical analysis model, FRAME, SHELL, and LINK objects from the SAP2000 library were preferred, respectively. The geometric properties of the elements are given in Figure 22.

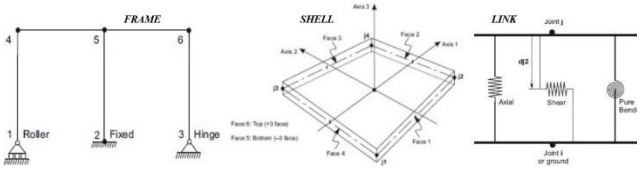


Figure 22. Geometric properties of FRAME, SHELL and LINK objects, respectively [57]

FRAME objects are straight lines connecting two nodes that model beams, columns, and truss elements in two- and three-dimensional systems. Torsion, axial deformation, biaxial bending, and biaxial shear are considered in the beam-column formulation characterizing the frame behavior [57].

SHELL objects with three or four nodes simulate the behavior of membranes and plates that bend. Shell objects help model components inside structural members of buildings, such as floors, walls, and 3D curved surfaces [57].

LINK objects connect two joints so that specialized structural behavior may be modeled. The SAP2000 program library has a special case of the LINK object defined for highly damped rubber bearings; High-Damping Rubber Isolator Link. This is a model for the high-damping rubber bearing in rubber isolators that undergo uniaxial or biaxial shear deformation. This model employs a time-independent deformation-history integral type model. The model's shear behavior is unaffected by axial deformation, while the axial behavior is linearly elastic [57].

Some mechanical properties of the isolator must be entered into the program to define HDRB in SAP2000. The considered mechanical properties for Type_A, Type_B, and Type_C are given in Table 6.

Before making dynamic earthquake analyses in the time domain of the building, free vibration analysis of the structure was carried out to determine whether the effective vibration period (1.231 s) specified during the isolator's design phase could be reached. As a result of the analysis showed that the vibration period of the seismic-isolated RC concrete building was 1.205 seconds, with an error rate of approximately 2% (Figure 23). This indicates that the isolator has been modeled correctly and exhibits the targeted structural behavior.

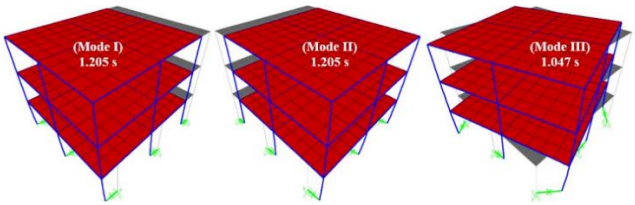


Figure 23. The first three mod shapes of the seismic-isolated RC building

Linear dynamic earthquake analyses in the time history of the building were performed using the Acc_E record of the Seferihisar (İzmir) earthquake with the help of the SAP2000 program. The earthquake effect was applied in the X-direction, which is the dominant vibration mode direction of the structure. As a result of the analysis, the maximum displacement, velocity, and acceleration values along the height of the structure were obtained as the earthquake behavior parameters of the building. Besides, displacement, velocity, and acceleration values read in time history from A, B, and C nodes were taken. These results are shown in Figures 24-27.

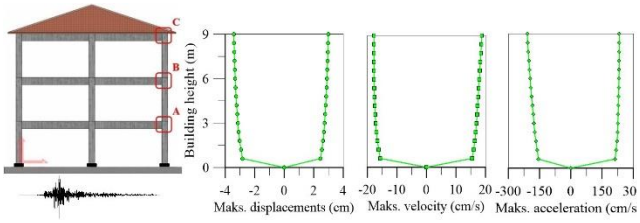


Figure 24. Distribution of maximum displacement, velocity and acceleration values along the height of the building

Figure 24 indicates the maximum amplitudes of displacement, velocity, and acceleration responses at each node along the stories in the building. For PEC, maximum displacement, velocity, and acceleration values are approximately ±4 cm, ±20 cm/s, and ±300 cm/s^2, respectively. As seen in Figure 24, the vibration amplitudes are distributed almost as a constant value along the height of the building. Thus, the relative structural behavior remains at low levels, and accordingly, there are significant decreases in the values of the internal structural forces. This is expected behavior from a seismically isolated system.

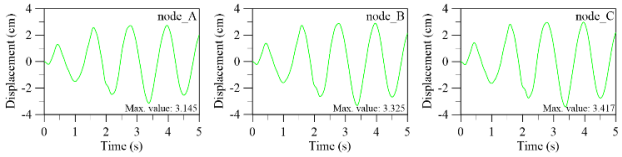


Figure 25. Time history displacements at nodes A, B, and C, respectively

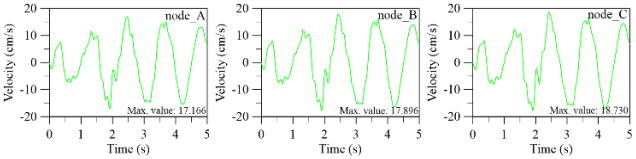


Figure 26. Time history velocities at nodes A, B, and C, respectively

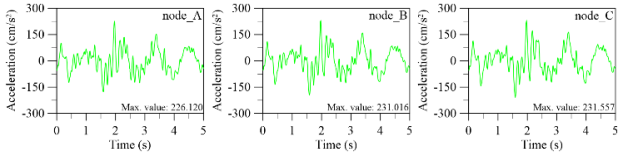


Figure 27. Time history acceleration at nodes A, B, and C, respectively

Table 6. Mechanical properties of isolators.

Isolator Type	Vertical Stiffness [kN/m]		Horizontal Stiffness [kN/m]		Yield Strength [kN]		K_2/K_1	
	Linear	Nonlinear	Linear	Nonlinear	Linear	Nonlinear	Linear	Nonlinear
Type_A	105656.843	-	569.814	2309.07	-	57.727	-	0.167
Type_B	265409.582	-	961.234	3817.038	-	103.060	-	0.167
Type_C	722553.191	-	1726.015	6785.838	-	190.003	-	0.167

Figures 25-27 represent the displacement, velocity, and acceleration results at nodes A, B, and C, separately, for the PEC situation of the building. Maximum displacement values were found as 3.145 cm, 3.325 cm and 3.417 cm while velocity values were calculated as 17.166 cm/s, 17.896 cm/s and 18.730 cm/s for node A, B and C, respectively. Also, maximum acceleration values of 226.120 cm/s^2, 231.016 cm/s^2 and 231.557 cm/s^2 at node A, B and C were obtained. As can be seen from the figures, it is seen that the maximum vibration oscillation occurs on the top floor, but there is no significant difference between floors in terms of these values.

2.3 Analysis of active earthquake control

In this section, the active force-based and displacement-based control designs were proposed with acceleration and displacement feedback. The control design was adopted for the proportional-integral-derivative (PID) control system used for a three-story building excited to the earthquake.

The active control block diagram is shown in Figure 28.

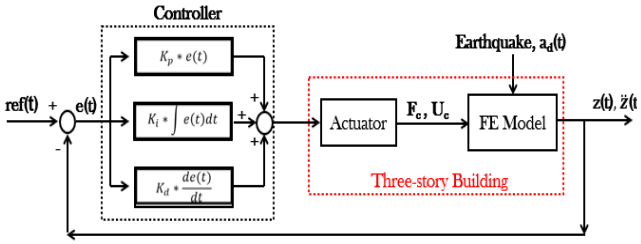


Figure 28. Active control block diagram

In the block diagram, ref(t) is defined as the reference signal, which is equal to zero to eliminate the vibrations from earthquake excitation. e(t) is the error signal, while the displacement and acceleration signals are denoted by z(t) and $\ddot{z}$(t), respectively. The force-based Fc and displacement-based Uc actuators were chosen for AEC, while the earthquake excitation ad(t) was the disturbance input. Closed-loop control was realized in the FE solution in ANSYS. Nodes of inputs and outputs in the FE model are defined as shown in Figure 29.

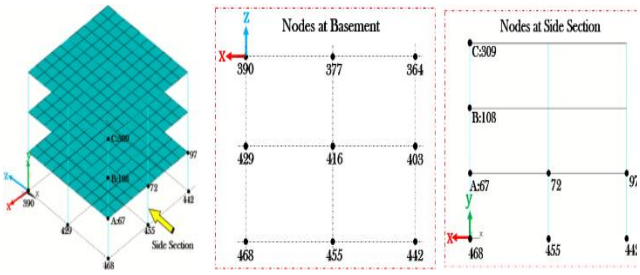
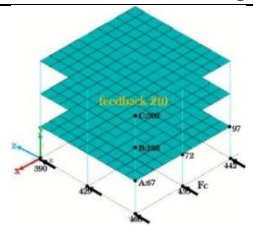
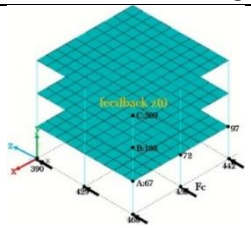


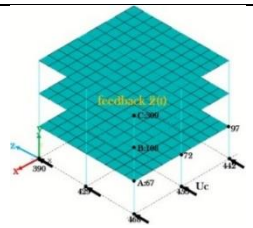
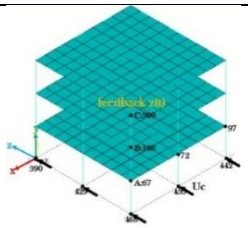
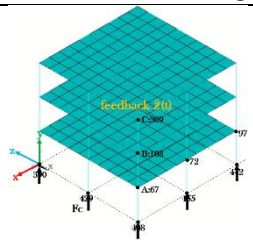
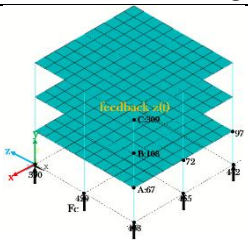
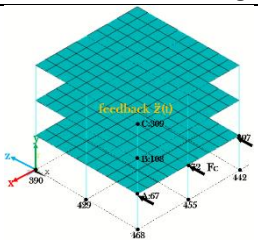
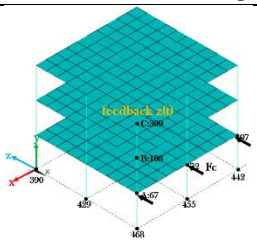
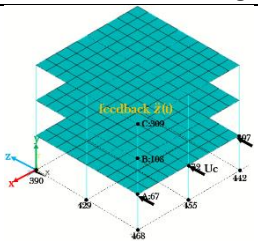
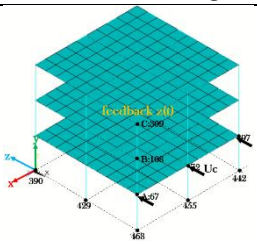
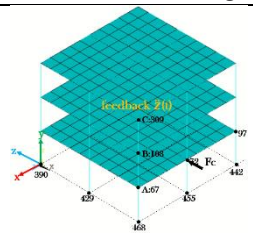
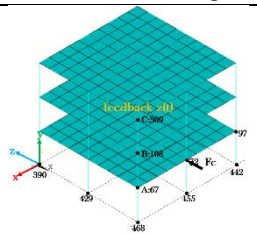
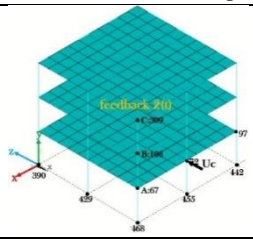
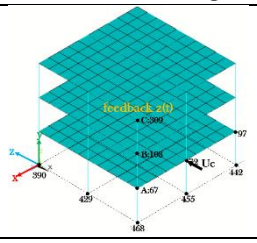
Figure 29. Defining nodes for AEC

Figure 29 indicates the determined nodes for the AEC. Nodes A, B, and C numbers 67, 108, and 309 are the displacement, acceleration, and velocity response nodes of the first, second, and third floors, separately. Also, node C was selected as the feedback node to reduce the vibrations on the high floor of a three-story building. Earthquake excitation was applied to the nodes (390, 377, 364, 429, 416, 403, 468, 455, and 442) at the basement of the building to define the ground motion. The force-based and displacement-based actuators were utilized with acceleration and displacement feedback signals. The configuration of the actuators and feedback signals shown in Table 7 is specified to determine the best control performance for the optimum actuator location and feedback types.

All fourteen configurations were determined according to the actuator type and location using displacement and acceleration feedback. For example, for Configuration-1 (C1), the actuator type was selected as the forced-based Fc actuator in the z-direction, while all nodes in the basement were used for the actuator location. The acceleration signal at node C was used for feedback in AEC. Similarly, the actuator type and location for C14 were defined as the displacement-based Uc actuator in node 72. At the same time, the feedback signal was the displacement signal at node C. Generally, the acceleration or displacement vibration responses in the z-direction at node C were denoted as feedback for all configurations. To evaluate the effectiveness of AEC for all configurations, the displacement, velocity, and acceleration responses of nodes A, B, and C were selected as response nodes.

Table 7. Configuration of the actuator type with the applied location and the selected feedback

Configuration-1 (C1)		**Configuration-2 (C2)**	
	Actuator type: **Fc (z-direction)** **All nodes at Basement** Feedback: **$\ddot{z}$(t) at node C**		Actuator type: **Fc (z-direction)** **All nodes at Basement** Feedback: **z(t) at node C**
Configuration-3 (C3)		**Configuration-4 (C4)**	
	Actuator type: **Uc (z-direction)** **All nodes at Basement**		Actuator type: **Uc (z-direction)** **All nodes at Basement**

	Feedback: **$\ddot{z}$(t) at node C**		Feedback: **z(t) at node C**
Configuration-5 (C5)		**Configuration-6 (C6)**	
	Actuator type: **Fc (y-direction) All nodes at Basement** Feedback: **$\ddot{z}$(t) at node C**		Actuator type: **Fc (y-direction) All nodes at Basement** Feedback: **z(t) at node C**
Configuration-7 (C7)		**Configuration-8 (C8)**	
	Actuator type: **Fc (z-direction) Nodes 67, 72, 97** Feedback: **$\ddot{z}$(t) at node C**		Actuator type: **Fc (z-direction) Nodes 67, 72, 97** Feedback: **z(t) at node C**
Configuration-9 (C9)		**Configuration-10 (C10)**	
	Actuator type: **Uc (z-direction) Nodes 67, 72, 97** Feedback: **$\ddot{z}$(t) at node C**		Actuator type: **Uc (z-direction) Nodes 67, 72, 97** Feedback: **z(t) at node C**
Configuration-11 (C11)		**Configuration-12 (C12)**	
	Actuator type: **Fc (z-direction) Node 72** Feedback: **$\ddot{z}$(t) at node C**		Actuator type: **Fc (z-direction) Node 72** Feedback: **z(t) at node C**
Configuration-13 (C13)		**Configuration-14 (C14)**	
	Actuator type: **Uc (z-direction) Node 72** Feedback: **$\ddot{z}$(t) at node C**		Actuator type: **Uc (z-direction) Node 72** Feedback: **z(t) at node C**

A macro code in the transient analysis was integrated into the FE analysis in ANSYS for the AEC action. The earthquake excitation was applied to the basement nodes at each time step. Then, the active control loop began at time t=dt in transient analysis after the feedback signal yf(t) is read from the feedback node with the following macro code: "*get,dz,node,309,u,z" for displacement feedback, and "*get,az,node,309,a,z" for acceleration feedback. dt is the time step. e(t) is calculated as e(t)=ref(t)-yf(t). In order to obtain the actuator signal u(t), e(t) is multiplied by proportional gain Kp, its integral is multiplied by integral gain Ki, its derivative is multiplied by derivative gain Kd. Then, u(t) is calculated by summing these signals. Kp, Ki, and Kd are defined as the controller gains. For Fc and Uc,

the actuator signal is found. According to the forced-based and displacement-based actuators, Fc or Uc are applied to the three-story buildings. Then, the closed-loop with "*do-*enddo" command proceeds until the steady-state value of the system is attained the number of samples through the defined analysis time. The macro program for the active control was developed with ANSYS Parametric Design Language.

The AEC control with the acceleration and displacement feedback was performed for the selected actuator locations in different configurations using FE analysis. Closed-loop control implementation was carried out with two different actuator types force-based and displacement-based. Firstly, controller gains were found by using the trial-and-error method. Then, according to the feedback signal and vibration responses at response nodes, controller gains were optimized with minimum displacement and acceleration vibration responses. When the active analysis results were compared according to the actuator locations and the feedback signals, the best vibration suppression results were found for C13, obtained in the vibration results of the displacement-based actuator used at node 72. With the AEC for C13, the maximum displacement, velocity, and acceleration values along the height of the structure with controller gains of Kp=0.000015, Ki=0, and Kd=0.0000002 were obtained as shown in Fig. 30. Also, the displacement, velocity, and acceleration responses obtained from nodes A, B, and C for the first, second, and third floors of the building are shown in Figures 30-33.

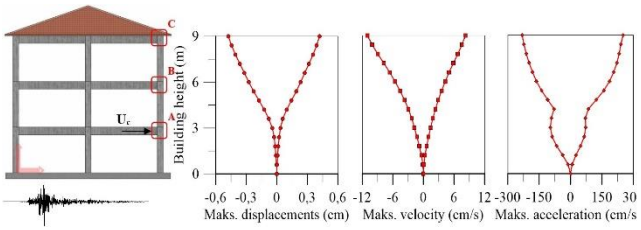


Figure 30. Distribution of maximum displacement, velocity and acceleration values along the height of the building

Figure 30 indicates the maximum amplitudes of displacement, velocity, and acceleration responses at each node along the stories in the building. For the AEC, maximum displacement, velocity, and acceleration values were approximately ±5 cm, ±12 cm/s, and ±225 cm/s2, respectively. As seen in Figure 30, the amplitudes of vibrations are the highest for the top floor in the building, while those are relatively lower for the first and second floors according to the top point of the building.

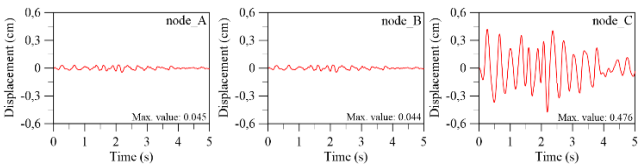


Figure 31. Time history displacements at nodes A, B, and C, respectively

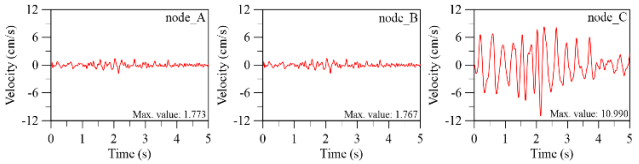


Figure 32. Time history velocities at nodes A, B, and C, respectively

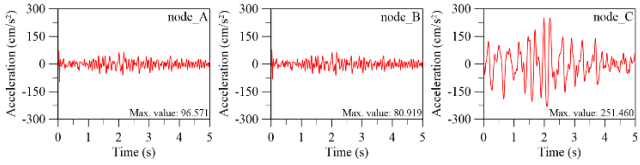


Figure 33. Time history acceleration at nodes A, B, and C, respectively

Figures 31-33 separately represent the displacement, velocity, and acceleration results at nodes A, B, and C for the actuator location, and acceleration feedback obtained better control performance. For the AEC of the building, maximum displacement values were found as 0.045 cm, 0.044 cm, and 0.476 cm, while velocity values of 1.773 cm/s, 1.767 cm/s, and 10.990 cm/s for nodes A, B, and C, respectively. Also, maximum acceleration values 96.571 cm/s^2, 80.919 cm/s^2, and 251.460 cm/s^2 at nodes A, B, and C were obtained. As seen from the figures, it is clear that the maximum vibration oscillation occurs at the top floor, and this oscillation on the first and second floors is relatively weak.

To comparatively evaluate the performance of PEC and AEC, the distribution of the maximum displacement, velocity, and acceleration values that occurred at all nodes along the height of the building is given in Figure 34.

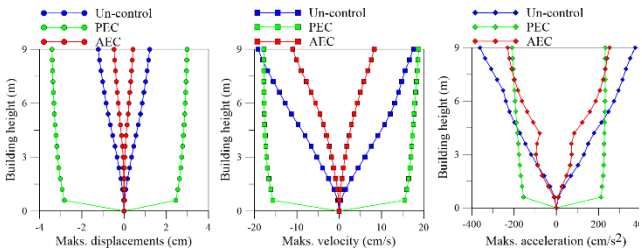


Figure 34. Comparative distribution of maximum displacement, velocity and acceleration values along the height of the building

Figure 34 shows the comparative distribution of the maximum displacement, velocity, and acceleration response values for all three cases along the building height.

When the displacement behavior of the building is examined, AEC reduces the displacement value at every point along the height of the building. The displacement distribution is approximately linearly parallel to the uncontrolled state. In the case of PEC, on the contrary, the displacement value increases at every point, and displacement distribution proceeds at an approximately constant value along the height of the building. This distribution is expected behavior from seismic isolated buildings. The critical issue here is that these displacements are between the limit values determined by the regulations.

In addition, the relative story drifts remain at minimal values in both control conditions. This situation ensures that the internal forces formed in the carrier system elements take small values. Regarding displacement behavior, it can be said that AEC provides better earthquake behavior than PEC.

When the velocity responses of the building are examined, a similar situation is observed with the displacement behavior. AEC significantly reduces the velocity value at every point along the height of the building. In the case of PEC, there is an increase in the speed value on the first two floors of the building and a slight decrease in this value on the top floor. As the height of the building increases, there is a noticeable increase in the effectiveness of the PEC. Regarding velocity behavior, it can be said that AEC provides better earthquake behavior on lower floors than PEC, which can be an essential alternative to PEC on upper floors.

When the acceleration responses of the building are examined, the AEC decreases the acceleration value at every point along the height of the building. The same is true for PEC on other floors except for the first floor. The maximum acceleration values obtained for both AEC and PEC on the top floor of the building are almost the same. As the height of the building increases, there is a noticeable increase in the effectiveness of the PEC. In the AEC, the same is true for all floors. Regarding acceleration behavior, it can be said that AEC provides better earthquake behavior on lower floors than PEC, which can be an essential alternative to PEC on upper floors. A vital issue to note here is that there is a critical region slightly above the point where AEC is applied. From this region, the rate of decrease in the acceleration value decreases. The place where AEC is used significantly affects the behavior of the building at the time of the earthquake. For this reason, in this study, a parametric study was carried out to determine the appropriate location for AEC, and the results are given in full detail in the following sections.

When all three graphs are evaluated together, it can be said that AEC is a very effective method for improving the seismic behavior of an RC building.

For the comparative evaluation of PEC and AEC performance, the displacement, velocity, and acceleration values in the time history were read from the nodes A, B, and C located on the first, second, and third floors of the building, respectively, are given in Figures 35-37.

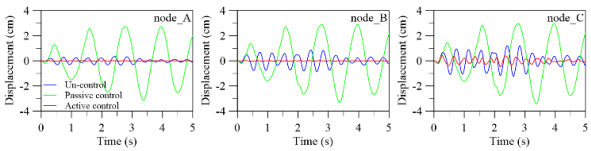


Figure 35. Comparative time history displacements at nodes A, B, and C, respectively

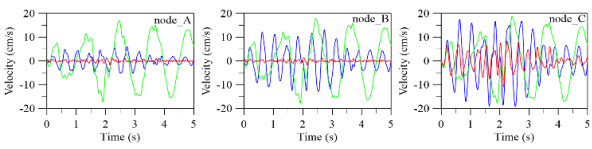


Figure 36. Comparative time history velocities at nodes A, B, and C, respectively

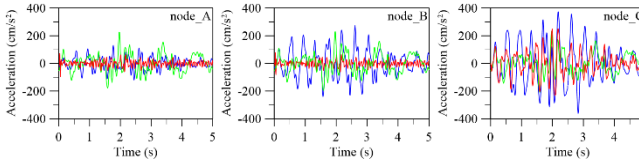


Figure 37. Comparative time history acceleration at nodes A, B, and C, respectively

Figures 35-37 present the time-dependent displacement, velocity, and acceleration changes at nodes A, B, and C, respectively. It is seen that AEC causes a significant decrease in the structural response values occurring on all floors of the building at each step within the considered time interval. This situation reveals that AEC is a very effective method to improve the structural behavior of an RC building during an earthquake.

2.3.1 Results of case studies for AEC

Case studies for configurations given in Table 7 were realized to determine the best vibration minimization performance of the AEC. Vibration responses for different actuator types and locations were obtained for different feedback signals. The displacement, velocity, and acceleration responses of the top floor of the building were evaluated as performance criteria of the designed controller. Controller gains were optimized until the best performance was achieved for vibration responses. Case results for all configurations were obtained. Firstly, for C1 with controller gains of K_p=1.25x10^3, K_i=80, and K_d=10, displacement, velocity, and acceleration results are shown in Figure 38.

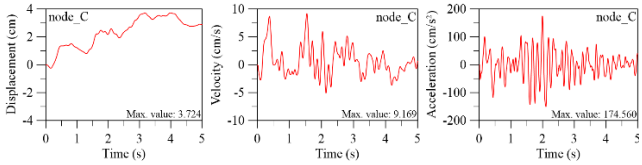


Figure 38. Time history displacement, velocity and acceleration responses for C1 at nodes A, B, and C, respectively

Figure 38 shows the displacement, velocity, and acceleration responses of the top floor in the building for C1. From Fig. 38, maximum velocity and acceleration values are reduced from 19.152 cm/s and 373.42 cm/s^2 to 9.169 cm/s and 174.560 cm/s^2, respectively, while this value of displacement is increased from 1.221 cm to 3.724 cm. Even though the maximum velocity and acceleration values are reduced with AEC, the C1 configuration is unsuitable because the maximum displacement values are increased, and the vibration behavior of displacement responses is unacceptable for earthquake vibration damping.

The vibration responses for another configuration, C3 are shown in Figure 39 for the controller gains of K_p=2x10^{-3}, K_i=1x10^{-3} and K_d=1x10^{-5}.

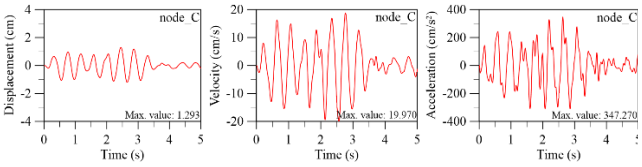


Figure 39. Time history displacement, velocity and acceleration responses for C3 at nodes A, B, and C, respectively

For the C3 configuration, it is observed from Figure 39 that all maximum values are increased according to reference values. Therefore, it can be seen that the C3 configuration is not a suitable method for active earthquake control depending on the actuator location and type and also the feedback selected.

For C2, C4, C5-8, C10, C14, the vibration responses of top floor are obtained and shown in Figures. 40-46.

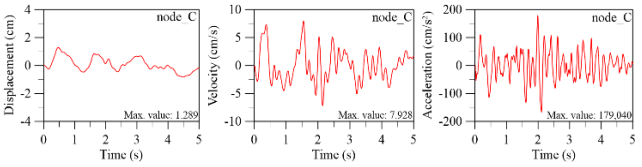


Figure 40. Time history displacement, velocity and acceleration responses for C2 at nodes A, B, and C, respectively, the controller gains of K_p=8x10^4, K_i=5x10^3 and K_d=3x10^4

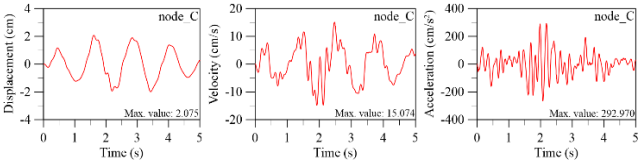


Figure 41. Time history displacement, velocity and acceleration responses for C5 at nodes A, B, and C, respectively, the controller gains of K_p=1x10^5, K_i=0 and K_d=0

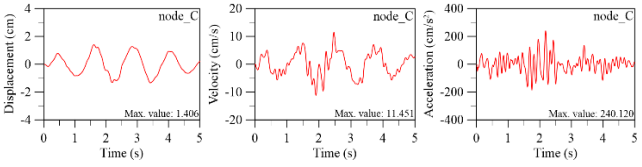


Figure 42. Time history displacement, velocity and acceleration responses for C6 at nodes A, B, and C, respectively, the controller gains of K_p=1x10^{10}, K_i=0 and K_d=0

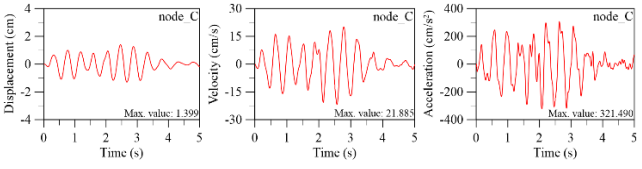


Figure 43. Time history displacement, velocity and acceleration responses for C7 at nodes A, B, and C, respectively, the controller gains of K_p=1x10^4, K_i=1x10^3 and K_d=2x10^2

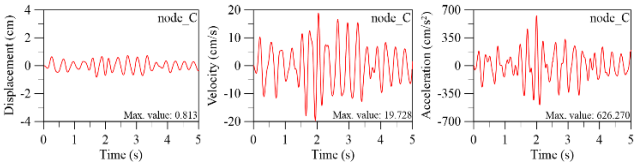


Figure 44. Time history displacement, velocity and acceleration responses for C8 at nodes A, B, and C, respectively, the controller gains of K_p=2x10^7, K_i=5x10^6 and K_d=1x10^5

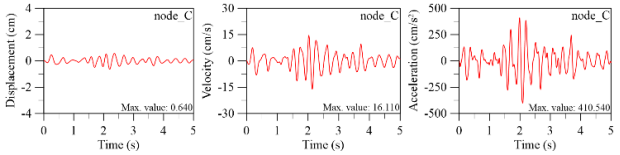


Figure 45. Time history displacement, velocity and acceleration responses for C10 at nodes A, B, and C, respectively, the controller gains of K_p=2x10^{-2}, K_i=0 and K_d=1x10^{-3}

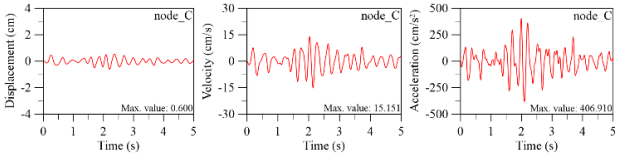


Figure 46. Time history displacement, velocity and acceleration responses for C14 at nodes A, B, and C, respectively, the controller gains of K_p=2x10^{-2}, K_i=1x10^2 and K_d=1x10^{-3}

As seen from Figures 40-46, the controller gains are different for all configurations. For example, for C2 with the controller gains of K_p=8x10^4, K_i=5x10^3 and K_d=3x10^4, maximum values are changed from 1.221 cm, 19.152 cm/s, 373.42 cm/s^2 to 1.289 cm, 7.928 cm/s, 179.040 cm/s^2 for displacement, velocity and acceleration responses, separately. For C2, C5, and C6 configurations, despite the decrease in acceleration and velocity values, it is clear that the displacement values according to controlled reference values of C13 are still not at the desired values. Also, for C10 and C14, maximum displacement and velocity values are reduced depending on reference values while maximum acceleration value is increased. For C7 and C8, maximum velocity values are increased; however, the maximum displacement value for C7 is increased according to reference values while this value for C8 is decreased.

For C4, C9, C11-12, the displacement, velocity and acceleration vibration responses of top floor are obtained with different controller gains and shown in Figures 47-50.

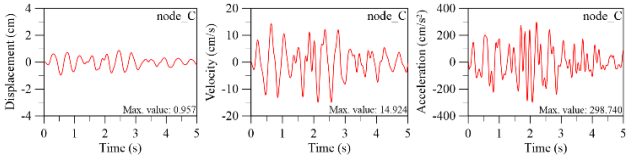


Figure 47. Time history displacement, velocity and acceleration responses for C4 at nodes A, B, and C, respectively, the controller gains of K_p=5x10^{-2}, K_i=5x10^3 and K_d=5x10^{-3}

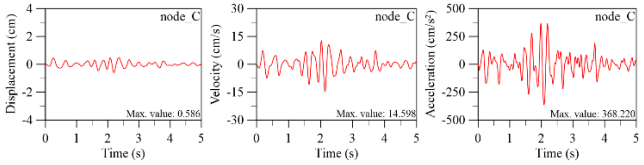


Figure 48. Time history displacement, velocity and acceleration responses for C9 at nodes A, B, and C, respectively, the controller gains of K_p=1x10^{-6}, K_i=0 and K_d=1x10^{-8}

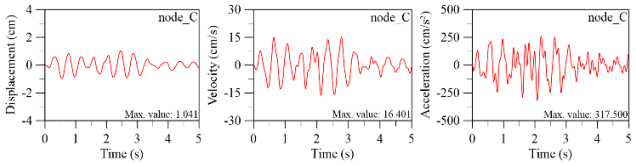


Figure 49. Time history displacement, velocity and acceleration responses for C11 at nodes A, B, and C, respectively, the controller gains of K_p=3x10^4, K_i=2x10^5 and K_d=1x10^2

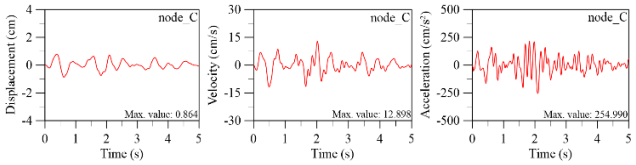


Figure 50. Time history displacement, velocity and acceleration responses for C12 at nodes A, B, and C, respectively, the controller gains of K_p=5x10^7, K_i=1x10^7 and K_d=6x10^5

As seen from Figures 47-50, it can be seen that maximum values of displacements, velocities, and accelerations for all configurations are reduced with respect to the maximum values of uncontrolled vibration responses in the building. For example, for C12 configuration, maximum displacement, velocity and acceleration values are reduced from 1.221 cm, 19.152 cm/s, 373.42 cm/s^2 to 0.864 cm, 12.898 cm/s, 254.990 cm/s^2 for responses, respectively. Although maximum values for C4, C9, C11-12 are shown in Figures 47-50 are reduced for displacement, velocity, and acceleration responses, the effectiveness of control performance is not sufficient when comparing maximum values of C4, C9, C11-12 with C13.

3 Conclusions

In this paper, a numerical study was carried out on the effectiveness of the active earthquake control method (AEC), which is thought to be an alternative to the seismic isolation (passive earthquake control) method (PEC), in improving the earthquake response of RC buildings.

When the graphs that present the results comparatively are examined, the following basic conclusions are reached;

- Maximum displacement values at node A on the first floor of the building are read as 0.357 cm, 3.145 cm, and 0.045 cm for uncontrolled, passive earthquake-controlled, and active earthquake-controlled situations, respectively. PEC increased this value approximately 8.81 times, while AEC decreased this value by about 7.93 times.
- Maximum displacement values at node B on the second floor of the building are read as 0.861 cm, 3.325 cm, and 0.044 cm for uncontrolled, passive earthquake-controlled, and active earthquake-controlled situations, respectively. PEC increased this value approximately 3.86 times, while AEC decreased this value by about 19.57 times.
- Maximum displacement values at node C on the top floor of the building are read as 1.221 cm, 3.417 cm, and 0.476 cm for uncontrolled, passive earthquake-controlled, and active earthquake-controlled situations, respectively. PEC increased this value approximately 2.80 times, while AEC decreased this value by about 2.57 times.

When the displacement behavior of the building is examined, active control significantly reduces the displacement value on each floor. In the case of PEC, on the contrary, the displacement value increases. Also, the relative story drifts remain at minimum values in both control conditions. This situation ensures that the internal forces formed in the carrier system elements take small values. Regarding displacement behavior, it can be said that AEC provides better earthquake behavior than PEC

- Maximum velocity values at node A on the first floor of the building are read as 6.051 cm/s, 17.166 cm/s, and 1.773 cm/s for uncontrolled, passive earthquake-controlled, and active earthquake-controlled situations, respectively. PEC increased this value approximately 2.84 times, while AEC decreased this value by about 3.41 times.
- Maximum velocity values at node B on the second floor of the building are read as 13.149 cm/s, 17.896 cm/s, and 1.767 cm/s for uncontrolled, passive earthquake-controlled, and active earthquake-controlled situations, respectively. PEC increased this value approximately 1.36 times, while AEC decreased this value by about 7.44 times.
- Maximum velocity values at node C on the top floor of the building are read as 19.152 cm/s, 18.730 cm/s, and 10.990 cm/s for uncontrolled, passive earthquake-controlled, and active earthquake-controlled situations, respectively. PEC decreased this value approximately 1.02 times, while AEC decreased this value by about 1.74 times.

When the velocity responses of the building are examined, AEC significantly reduces the velocity value on each floor. In the case of PEC, there is an increase in the speed value on the first two floors of the building and a slight decrease in this value on the top floor. As the height of the building increases, there is a noticeable increase in the effectiveness of the PEC. Regarding velocity behavior, it can be said that AEC provides better earthquake behavior on lower floors than PEC, which can be an essential alternative to PEC on upper floors.

- Maximum acceleration values at node A on the first floor of the building are read as 130.700 cm/s^2,

226.120 cm/s^2, and 96.571 cm/s^2 for uncontrolled, passive earthquake-controlled, and active earthquake-controlled situations, respectively. PEC increased this value approximately 1.73 times, while AEC decreased this value by about 1.35 times.

- Maximum acceleration values at node B on the second floor of the building are read as 273.167 cm/s^2, 231.016 cm/s^2, and 80.919 cm/s^2 for uncontrolled, passive earthquake-controlled, and active earthquake-controlled situations, respectively. PEC decreased this value approximately 1.18 times, while AEC decreased this value by about 3.38 times.
- Maximum acceleration values at node C on the top floor of the building are read as 373.429 cm/s^2, 231.557 cm/s^2, and 251.460 cm/s^2 for uncontrolled, passive earthquake-controlled, and active earthquake-controlled situations, respectively. PEC decreased this value approximately 1.61 times, while AEC decreased this value by about 1.49 times.

When the acceleration responses of the building are examined, the AEC decreases the acceleration value on each floor. The same is true for PEC on other floors except for the first floor. The maximum acceleration values obtained for both AEC and PEC on the top floor of the building are almost the same. As the height of the building increases, there is a noticeable increase in the effectiveness of the PEC. In AEC, the same is true for all floors. Regarding acceleration behavior, it can be said that AEC provides better earthquake behavior on lower floors than PEC, which can be an essential alternative to PEC on upper floors.

The AEC method provides almost all the positive behaviors expected from the PEC method. In addition, it eliminates some disadvantages of the PEC method. E.g., a PEC system causes large displacements in the building. If the displacement values exceed the limit values the regulations allow, risky situations may arise for the building. The AEC method significantly limits the displacements along the height of the building. In this way, this dangerous situation is wholly eliminated. Besides, isolators cannot be partially applied to a building. It is applied to the building as an isolation system, that is, as an isolator group. Therefore, efficient implementation is complex and requires highly skilled workers and engineers. In addition, this situation and the costs of the insulators increase the total construction cost. AEC with an actuator from a single point provides ease of application and cost reduction.

Conflict of interest

The authors affirm that none of their known financial conflicts of interest or personal connections could have appeared to impact the research presented in this study.

Similarity rate (iThenticate): 18%

References

[1] Geology.com. https://geology.com/plate-tectonics.shtml, Accessed 1 October 2022.

[2] Global Earthquake Hazard Map. https://www.globalquakemodel.org/gem-maps/global-earthquake-hazard-map, Accessed 1 October 2022.

[3] A. Ellero, G. Ottria, M. Marroni, L. Pandolfi and M. C. Göncüoğlu, Analysis of the North Anatolian Shear Zone in Central Pontides (northern Turkey): Insight for geometries and kinematics of deformation structures in a transpressional zone. Journal of Structural Geology, 72, 124–41, 2015. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.12.003.

[4] V. A. Zayas, S. S. Low and S. A. Mahin, A simple pendulum technique for achieving seismic isolation. Earthquake Spectra, 6, 317–33, 1990. https://doi.org/10.1193/1.15855.

[5] M. Constantinou, A. Mokha and A. Reinhorn, Teflon bearings in base isolation II: Modeling. Journal of Structural Engineering, 116 (2), 455–74, 1990. https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339445(1990)116:2(455).

[6] D. V. Achillopoulou and N. K. Stamataki, Seismic design and assessment of the response of a glass pavilion. Journal of Building Engineering, 47, 103825, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103825.

[7] N. Güneş, Risk-targeted design of seismically isolated buildings. Journal of Building Engineering, 46, 103665, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103665.

[8] J. Shang, P. Tan, J. Han, Y. Zhang and Y. Li, Performance of seismically isolated buildings with variable friction pendulum bearings under near-fault ground motions. Journal of Building Engineering, 45, 103584, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103584.

[9] E. Ozer, M. Inel and B. T. Cayci, Seismic behavior of LRB and FPS type isolators considering torsional effects. Structures, 37, 267–83, 2022. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.01.011.

[10] T. Sheng, G. bin Liu, X. cheng Bian, W. xing Shi and Y. Chen, Development of a three-directional vibration isolator for buildings subject to metro and earthquake-induced vibrations. Engineering Structures, 252, 1–31, 2022. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113576.

[11] S. Kitayama and M. C. Constantinou, Performance evaluation of seismically isolated buildings near active faults. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 51 (5), 1017-37, 2022. https://doi.org/10.1002/eqe.3602.

[12] J. C. Reyes, Seismic behaviour of torsionally-weak buildings with and without base isolators. Seismic Behaviour and Design of Irregular and Complex Civil Structures IV, Part of the Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering book series (GGEE), 50, 177–88, 2022.

[13] T. M. Al-Hussaini, M. M. Hoque and A. S. Moghadam, Seismic strengthening solutions for existing buildings. Civil Engineering for Disaster Risk Reduction, Part of the Springer Tracts in Civil Engineering Book Series (SPRTRCIENG), 359–72, 2022.

[14] S. Kitayama and H. Cilsalar, Seismic loss assessment of seismically isolated buildings designed by the procedures of ASCE/SEI 7-16. Bulletin of Earthquake

Engineering, 20, 1143–68, 2022. https://doi.org/10.1007/ s10518-021-01274-y.
[15] H. Du, Y. Wang, M. Han and L. F. Ibarra, Experimental seismic performance of a base-isolated building with displacement limiters. Engineering Structures, 244, 112811, 2021. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112811.
[16] R. Astroza, J. P. Conte, J. I. Restrepo, H. Ebrahimian and T. Hutchinson, Seismic response analysis and modal identification of a full-scale five-story base-isolated building tested on the NEES@UCSD shake table. Engineering Structures, 238, 112087, 2021. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112087.
[17] A. Di Cesare, F. C. Ponzo and A. Telesca, Improving the earthquake resilience of isolated buildings with double concave curved surface sliders. Engineering Structures, 228, 111498, 2021. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111498.
[18] E. Meral, Determination of seismic isolation effects on irregular RC buildings using friction pendulums. Structures, 34, 3436–52, 2021. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.09.062.
[19] F. Mazza and M. Mazza, Nonlinear modelling of HDRBs in the seismic analysis of retrofitted and new base-isolated r.c. buildings. Structures, 33, 4148–61, 2021. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.010.
[20] N. Güneş and Z. Ç. Ulucan, Collapse probability of code-based design of a seismically isolated reinforced concrete building. Structures, 33, 2402–12, 2021. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.010.
[21] X. Wang, L. Xie, D. Zeng, C. Yang and Q. Liu, Seismic retrofitting of reinforced concrete frame-shear wall buildings using seismic isolation for resilient performance. Structures, 34, 4745–57, 2021. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.10.081.
[22] K. Jamdade, S. Dumne and P. Kalpana, Seismic analysis of multi-storied rcc building involving semi active vf damper and base isolators. Journal of the Institution of Engineers (India): Series A, 102, 1089–103, 2021. https://doi.org/10.1007/s40030-021-00578-1.
[23] I. Imran, D. M. Siringoringo and J. Michael, Seismic performance of reinforced concrete buildings with double concave friction pendulum base isolation system: case study of design by Indonesian code. Structures, 34, 462–78, 2021. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.084.
[24] A. R. Özuygur and E. N. Farsangi. Influence of pulse-like near-fault ground motions on the base-isolated buildings with LRB devices. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 26, 04021027, 2021. https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000603
[25] A. H. Deringöl and E. M. Güneyisi, Effect of using high damping rubber bearings for seismic isolation of the buildings. International Journal of Steel Structures, 21, 1698–722, 2022. https://doi.org/10.1007/s13296-021-00530-w.
[26] A. Chinchole, C. Singh Tumrate and D. Mishra, Design of base isolation system for a six storey reinforced concrete building. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 796, 012034, 2021. https://doi.org/10.1088/1755-1315/796/1/012075.
[27] P. Clemente, A. D. Cicco, F. Saitta and A. Salvatori, Seismic behavior of base isolated civil protection operative center in Foligno, Italy. Journal of Performance of Constructed Facilities, 35, 04021027, 2021. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001589.
[28] N. Murota, S. Suzuki, T. Mori, K. Wakishima, B. Sadan, C. Tuzun, F. Sutcu and M. Erdik, Performance of high-damping rubber bearings for seismic isolation of residential buildings in Turkey. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 143, 106620, 2021. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106620.
[29] J. M. Jara, E. J. Hernández and B. A. Olmos, Effect of epicentral distance on the applicability of base isolation and energy dissipation systems to improve seismic behavior of RC buildings. Engineering Structures, 230, 111727, 2021. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111727.
[30] F. Micozzi, A. Flora, L. R. S. Viggiani, D. Cardone, L. Ragni and A. Dall'asta, Risk assessment of reinforced concrete buildings with rubber isolation systems designed by the Italian Seismic Code. Journal of Earthquake Engineering, 26 (14), 7245–75, 2021. https://doi.org/10.1080/13632469.2021.1961937.
[31] A. Chanda and R. Debbarma, Probabilistic seismic analysis of base isolated buildings considering near and far field earthquake ground motions. Structure and Infrastructure Engineering, 18, 97–108, 2021. https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1836000.
[32] I. Gołębiowska and M. Dutkiewicz, Application of friction pendulum bearings in multistory buildings. Acoustics and Vibration of Mechanical Structures-AVMS 2019, Part of the Springer Proceedings in Physics book series (SPPHY), 251, 453–61, 2021.
[33] P. Sunagar, A. Bhashyam, M. Shashikant, K. S. Sreekeshava and A. K. Chaurasiya, Effect of different base isolation techniques in multistoried rc regular and irregular building. Trends in Civil Engineering and Challenges for Sustainability, Part of the Lecture Notes in Civil Engineering book series (LNCE) 99, 391–403, 2021.
[34] S. Etedali, K. Hasankhoie and M. R. Sohrabi, Seismic responses and energy dissipation of pure-friction and resilient-friction base-isolated structures: A parametric study. Journal of Building Engineering, 29, 101194, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101194.
[35] K. Ye, Y. Xiao and L. Hu, A direct displacement-based design procedure for base-isolated building structures with lead rubber bearings (LRBs). Engineering Structures, 197, 109402, 2019. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109402.
[36] H. Gazi and C. Alhan, Reliability of elastomeric-isolated buildings under historical earthquakes with/without forward-directivity effects. Engineering

Structures, 195, 490–507, 2019. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.05.081.
[37] S. Kitayama and M. C. Constantinou, Probabilistic seismic performance assessment of seismically isolated buildings designed by the procedures of ASCE/SEI 7 and other enhanced criteria. Engineering Structures, 179, 566–82, 2019. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.014.
[38] C. Giarlelis, D. Koufalis and C. Repapis, Seismic isolation: An effective technique for the seismic retrofitting of a reinforced concrete building. Structural Engineering International, 30, 43–52, 2020. https://doi.org/10.1080/10168664.2019.1678449.
[39] A. H. Deringöl and E. M. Güneyisi, Effect of friction pendulum bearing properties on behaviour of buildings subjected to seismic loads. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 125, 105746, 2019. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105746.
[40] F. Mazza, M. Mazza and Vulcano A, Base-isolation systems for the seismic retrofitting of r.c. framed buildings with soft-storey subjected to near-fault earthquakes. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 109, 209–21, 2018. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.02.025.
[41] S. Kitayama and M. C. Constantinou, Collapse performance of seismically isolated buildings designed by the procedures of ASCE/SEI 7. Engineering Structures, 164, 243–58, 2018. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.03.008.
[42] M. M. Nasery, M. Ergun, S. Ates and M. Husem, “ Comparing the dynamic behavior of a hospital-type structure with fixed and isolated base. Earthquakes and Structures, 9, 657–71, 2015. https://doi.org/10.12989/eas.2015.9.3.657.
[43] S. Ates S and M. Yurdakul, Site-response effects on RC buildings isolated by triple concave friction pendulum bearings. Computers and Concrete, 8, 693–715, 2011. https://doi.org/10.12989/cac.2011.8.6.693.
[44] M. Yurdakul and S. Ates, Modeling of triple concave friction pendulum bearings for seismic isolation of buildings. Structural Engineering and Mechanics, 40, 315–34, 2011. https://doi.org/10.12989/sem.2011.40.3.315.
[45] R. C. Ümütlü, H. Ozturk and B. Bidikli, A robust adaptive control design for active tuned mass damper systems of multistory buildings. Journal of Vibration and Control, 27, 2765–77, 2020. https://doi.org/10.1177/1077546320966.
[46] M. Soleymani, A. H. Abolmasoumi, H. Bahrami, A. Khalatbari, E. Khoshbin and S. Sayahi, Modified sliding mode control of a seismic active mass damper system considering model uncertainties and input time delay. Journal of Vibration and Control, 24, 1051–64, 2016. https://doi.org/10.1177/107754631665747.
[47] C. Collette and S. Chesné, Robust hybrid mass damper. Journal of Sound and Vibration, 375, 19–27, 2016. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.04.030.
[48] N. Mamat, F. Yakub, S. A. Z. Shaikh Salim and M. S. Mat Ali, Seismic vibration suppression of a building with an adaptive nonsingular terminal sliding mode control. Journal of Vibration and Control, 26, 2136–47, 2020. https://doi.org/10.1177/10775463209153.
[49] R. Guclu and H. Yazici, Vibration control of a structure with ATMD against earthquake using fuzzy logic controllers. Journal of Sound and Vibration, 318, 36–49, 2008. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.03.058.
[50] L. Xu, Y. Cui and Z. Wang, Active tuned mass damper based vibration control for seismic excited adjacent buildings under actuator saturation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 135, 106181, 2020. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106181.
[51] A. Hossein HEIDARI, S. Etedali, M. Reza JAVAHERI-TAFTI. A hybrid LQR-PID control design for seismic control of buildings equipped with ATMD. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 12, 44–57, 2017. https://doi.org/10.1007/s11709-016-0382-6.
[52] K. Karami, S. Manie, K. Ghafouri and S. Nagarajaiah, Nonlinear structural control using integrated DDA/ISMP and semi-active tuned mass damper. Engineering Structures, 181, 589–604, 2019. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.059.
[53] UBC, Uniform Building Code, 1997.
[54] TEBC-2018, General Directorate for Foundations, Turkey Earthquake Building Code, Ankara, Turkey, 2018.
[55] General Directorate of Mineral Research and Exploration, MTA 2018. http://www.mta.gov.tr/v3.0/, Accessed 1 October 2022.
[56] Disaster & Emergency Management Authority Presidential of Earthquake Department, AFAD. https://deprem.afad.gov.tr/, Accessed 1 October 2022.
[57] SAP2000, Integrated Finite Elements Analysis and Design of Structures, Computers and Structures, Inc., Berkeley, CA, USA 2019.
[58] ANSYS, Swanson Analysis System, USA 2015.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 028-033
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
Araştırma makalesi / Research article
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Türkiye'deki yaralanmalı iş kazalarının sektörel dağılımı ve analizi

Sectoral distribution and analysis of occupational injury accidents in Turkey

Sertaç Dündar[1,*], Atiye Bilim[2], Niyazi Bilim[3]

[1,3] Konya Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 42026, Konya Türkiye
[2] Konya Teknik Üniversitesi, Mülkiyet Koruma ve Güvenlik, 42026, Konya, Türkiye

Öz

İş kazaları, çalışanların can güvenliğini tehdit eden ciddi bir sorundur. İş kazalarına ilişkin farkındalığın arttırılması ve çalışanların güvenliğinin sağlanması oldukça önemli bir konudur. İş kazaları, maddi kayıpların yanında çalışanların yaşam kalitesi ve psikolojik durumları üzerinde de ciddi etkilere sahiptir. İş kazaları ölümlü iş kazaları ve yaralanmalı iş kazaları olarak gruplandırılmaktadır. Yaralanmalı iş kazası sonucunda iş günü kaybına göre iş kazasının şiddeti belirlenebilmektedir. Bu çalışmanın amacı, kişi başına düşen yaralanmalı iş kazası oranı (kaza olabilirlik oranı) ve iş günü kaybı faktörlerini birlikte değerlendirilerek en riskli sektörlerin belirlenmesidir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, kömür ve linyit madenciliği sektörünün en riskli sektör olduğu ve en yüksek oranda iş günü kaybına ve yaralanmalara neden olduğu tespit edilmiştir. İş kazalarının önlenmesine yönelik tedbirler sadece genel bir yaklaşımla değil, her sektörün özel olarak ele alması ile sağlanabilecektir.

Anahtar kelimeler: Kaza olabilirlik oranı, İş kazası, İş günü kaybı, İş güvenliği, Riskli sektör

Abstract

Workplace accidents are a serious problem that threatens the life safety of employees. Increasing awareness of workplace accidents and ensuring the safety of employees is a very important issue. Workplace accidents have serious effects on the quality of life and psychological state of employees as well as financial losses. Workplace accidents are grouped as fatal workplace accidents and injury workplace accidents. The severity of the work accident is determined according to the loss of work days as a result of an injury work accident. The aim of this study is to determine the most risky sectors by evaluating the rate of workplace accident with injury (accident incidence rate) and loss of work days factors per capita. As a result of the evaluations, it has been determined that the coal and lignite mining sector is the most risky sector and causes the highest rate of workday lost and injuries. Measures for the prevention of occupational accidents will be provided not only by a general approach, but by considering each sector specifically.

Keywords: Incidence rate, Occupational accident, Occupational safety, Risky sector, Workday lost

1 Giriş

Ülkemizde ve dünyada nüfusun artmasına bağlı olarak çalışan sayısı da artmaktadır. Bu artış iş sağlığı ve güvenliği (İSG) kavramının önemini ortaya koymaktadır. İş sağlığı ve güvenliği konusunda alınan önlemler sadece iş kazalarının sayısını azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda iş kazaları sonucu meydana gelen zararları da minimum seviyeye indirmeyi amaçlamaktadır [1].

Sağlıklı ve güvenli bir çalışma ortamı, yalnızca çalışanlar açısından istenilen bir durum değildir, aynı zamanda işgücü verimliliğine önemli ölçüde katkıda bulunarak ekonomik olarak büyümeyi teşvik etmektedir. İş sağlığı ve güvenliğine yönelik çalışmalar, iş kazaları ve meslek hastalıkları nedeniyle ortaya çıkan maliyetleri azaltarak, çalışanın motivasyonunu artırarak, işletmelerin rekabet gücünü ve üretkenliğini pozitif yönde etkileyebilmektedir. Ayrıca, iş kazalarının ve meslek hastalıkların azalması, kamu ve özel sektör sosyal koruma ve sigorta sistemleri üzerindeki baskıyı hafifletmektedir [2]. İş kazaları; işverenleri, çalışanları ve ülke ekonomisini etkileyen önemli bir sorundur. Bu nedenle işyerlerinde iş sağlığı ve güvenliği prosedürlerine kesinlikle uyulmalıdır. Aksi takdirde iş kazaları sonucunda sürekli iş göremezlik ve ölümler meydana gelmekte, ekonomik kayıplar ve iş günü kayıpları ortaya çıkmaktadır.

İş kazası ve meslek hastalığı işin yürütümü esnasında meydana gelen istenmeyen olumsuzlukları ifade etmektedir. 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanununda iş kazası, "işyerinde veya işin yürütümü nedeniyle ortaya çıkan, ölüme neden olan veya vücudun birliğini ruhen ya da bedenen özre uğratan olay" olarak ifade edilirken [3] Uluslararası Çalışma Örgütü ise iş kazasını; "İş kazası, bir veya daha fazla işçinin yaralanmasına, hastalanmasına veya ölümüne neden olan, beklenmedik ve planlanmamış, şiddet eylemleri de dahil, iş dışında veya işle bağlantılı olarak meydana gelen olay" olarak ifade etmektedir. İş kazaları oluşum şekillerine göre ölümlü ve yaralanmalı olarak ikiye ayrılır. Yaralanmalı iş kazaları ise, iş günü kaybına ve sürekli iş göremezliğe göre gruplandırılırlmaktadır [4].

Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO), dünya genelinde her yıl yaklaşık 2.3 milyon kadın ve erkeğin iş kazası veya meslek hastalığına maruz kaldığını tahmin etmektedir; bu da her gün 6000'den fazla ölüme karşılık gelmektedir. Dünya genelinde yılda yaklaşık 340 milyon iş kazası ve 160 milyon meslek hastalığı vakası gerçekleşmektedir. ILO, bu

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sdundar@ktun.edu.tr (S. Dündar)
Geliş / Recieved: 04.05.2023 Kabul / Accepted: 12.10.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngmuh.1292353

tahminleri aralıklarla güncellemekte ve bu güncellemeler iş kazaları ve hastalıklarında artışın olduğunu göstermektedir [5].

Sektörlerin iş sağlığı ve güvenliği açısından riskli olup olmadıklarını veya ne kadar riskli olduğunu görebilmek için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu değerlendirme parametrelerinden birisi kişi başına düşen iş kazası sayısı, diğeri ise kaza şiddetidir. Kişi başına düşen kaza sayısının belirlenmesi, kaza olabilirlik oranı (insidans oranı) olarak tanımlanmaktadır. Kaza olabilirlik oranının hesaplanması ise belirli zaman aralığında meydana gelen ölümlü veya yaralanmalı iş kazalarının sayısının hesaplanan grubun toplam çalışan sayısına bölünmesi ve ardından 100 000 ile çarpılması ile bulunmaktadır [6]. Bu hesaplamada sadece ölümlü iş kazaları kullanıldığı takdirde kişi başına düşen ölümlü iş kazası sayısı, yaralanmalı iş kazası sayısı hesaplandığında kişi başına düşen yaralanmalı iş kazası sayısı hesaplanmaktadır.

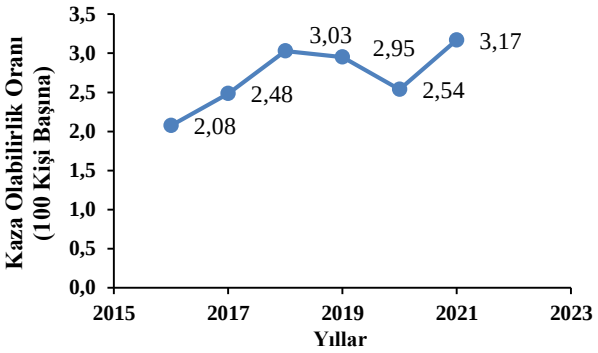
Yapılan bu çalışmanın amacı, Türkiye'de bulunan ve Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) tarafından belirlenen 88 iş kolunun yaralanmalı kaza olabilirlik oranı (insidans oranı) ve iş günü kaybına göre incelenerek en riskli iş kollarının belirlenmesidir. Ayrıca bu iki parametreye göre belirlenen sektörlerin kıyaslanması ve her iki değerlendirme parametresi için belirlenen sektörlerin risk durumları gösterilmektedir. Sonuçta riskli sektörleri belirlemek amacıyla yapılan iki farklı analiz neticesinde yaralanmalı iş kazaları bakımından Türkiye'deki en riskli sektörler belirlenmiştir. Böylece bu sektörlere iş sağlığı ve güvenliği açısından verilen önem artacak ve daha çok önleyici tedbirlerin alınması sağlanacaktır.

2 Türkiye'de Kaza Olabilirlik Oranlarının İncelenmesi

Kaza olabilirlik oranı (KOO), "insidans oranı" olarak da ifade edilmektedir. Kaza olabilirlik oranı, işyerinde çalışanların belirli bir süre içinde bir kazaya maruz kalma olasılığını ifade eder. Bu oran, birçok alanda önemli bir ölçüttür ve genellikle sağlık, güvenlik, endüstriyel işletmeler ve trafik gibi alanlarda kullanılır. Kaza olabilirlik oranı, iş güvenliği ile yakından ilişkilidir. İş yerindeki kaza olabilirlik oranı, çalışanların iş yerindeki güvenlik koşulları hakkında bilgi verir ve iş yerindeki riskleri belirleyerek önleme çalışmalarının planlanması ve uygulanması için yol göstermektedir. Kaza olabilirlik oranı, iş kazalarının sektörlerdeki gerçekleşme sıklığı hakkında bilgi verirken, iş günü kaybı da sektörlerdeki kazaların şiddeti hakkında bilgi sunmaktadır. Yüksek kaza olabilirlik oranları, işyerindeki güvenlik koşullarının yetersiz olduğunu ve çalışanların sağlıklarını tehlikeye attığını ifade etmektedir.

Türkiye'de SGK tarafından belirlenen tüm iş kollarında son altı yıl (2016-2021) içerisinde meydana gelen yaralanmalı iş kazalarının kaza olabilirlik oranı Şekil 1'de gösterilmiştir.

Şekil 1'de 100 çalışan başına düşen iş kazası oranları yıllara göre değerlendirilmiştir. 2016-2021 yılları arasında yaralanmalı iş kazaları incelendiğinde yaralanmalı kaza olabilirlik oranı dalgalanmalı olarak görülse de genel olarak bir artış söz konusudur. Bu eğilim iş güvenliği açısından istenmeyen bir durumdur. En yüksek kaza olabilirlik oranı 2021 yılında 3,17 olarak hesaplanmıştır. Son 6 yıllık yaralanmalı kaza olabilirlik oranları içerisinde en düşük oran 2016 yılında 2,08' dir. 2019 ve 2020 yıllarında bir düşüş yaşansa da 2021 yılında tekrar yükselmiş ve son 6 yıl için en yüksek değere ulaşmıştır.



Şekil 1. 2016-2021 yılları arasında yaralanmalı kazaların kaza olabilirlik oranı değişimi (Kaza olabilirlik oranı 100 kişi başına düşen kaza sayısı olarak değerlendirilmiştir)

Kaza olabilirlik oranının belirlenmesi sektörlerin risk durumu olarak sıralanması için de kullanılabilmektedir. Yapılan bu çalışmada kullanılan veriler Sosyal Güvenlik Kurumu'nun istatistik yıllıklarından elde edilmiştir [7]. Çalışma kapsamında Türkiye'de bulunan iş kollarının ayrı ayrı ve toplam olarak yaralanmalı iş kazası olabilirlik oranına göre sıralaması yapılmıştır. Türkiye'de gerçekleşen iş kazaları sektörel bazda değerlendirilmiş ve yaralanmalı kaza olabilirlik oranına göre riskli sektörler belirlenmiştir. Tüm iş kollarında yaralanmalı kaza olabilirlik oranları (100 kişi başına düşen) incelenmiş ve Türkiye genelinde meydana gelen yaralanmalı iş kazaları ile iş günü kaybı arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Tablo 1'de Türkiye'de yaralanmalı iş kazası olabilirlik oranına göre ilk 15 sektör sıralanmıştır. Yapılan bu sıralamadaki ilk 15 sektör en riskli sektörler olarak kabul edilebilir.

Çalışmada ekonomik faaliyet sınıflaması altında yer alan 88 sektör için kaza olabilirlik oranları hesaplanarak, bu oranın en yüksek olduğu ilk 15 faaliyet tespit edilmiştir. Ekonomik faaliyetlerin kaza durumlarına yönelik yapılan araştırmalar, sektörlerin iş güvenliği ile ilgili almaları gereken önlemler adına proaktif çözümler sunmaya yardımcı olacaktır. Ayrıca ülke kaynaklarının iş güvenliği çözümüne yönelik doğru önceliklendirilmesi ve kullanılmasına ışık tutacaktır.

3 İş günü kaybının sektörel değerlendirilmesi

İş kazaları nedeniyle iş günü kaybı hem çalışanlar hem de işverenler üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilmektedir. Çalışanlar için iş günü kaybı, maaş kaybına, iş güvenliğinin azalmasına ve iş tatmininin azalmasına yol açmaktadır. Ayrıca uzun vadeli sağlık sorunlarına yol açabilecek fiziksel ve duygusal sıkıntıya sebep vermektedir. İşverenler için iş günü kaybı, üretkenliğin azalması,

maliyetlerin artması ve iş gücü arasında moralin düşmesi gibi negatif etkiler ortaya çıkartmaktadır. İş kazalarında kazanın şiddetine, kaza çeşidine, vücutta maruz kalınan bölgeye vb. bağlı olarak iş kazası sonucu çalışanın işbaşı yapma süresi değişebilmektedir. Dolayısıyla iş kazaları sonucunda iş günü kaybı süresinin analiz edilmesi kaza ile ilgili bilgiler sunabilmektedir. Bu çalışmada, iş kazası sonucu işe dönüş süresinin fazla olduğu, başka bir ifade ile iş günü kaybının fazla olduğu sektörlerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çünkü, iş kazaları sonrası iş günü kaybı süresinin fazla olduğu sektörler, riskli sektörler olarak ortaya çıkarılmış olacaktır. Riskli sektörleri belirlemek amacıyla farklı metotlar uygulanmaktadır. Bu çalışmada ise iş günü kaybı esas alınmıştır.

Tablo 1. Yaralanmalı iş kazalarının kaza olabilirlik oranına göre sıralanması

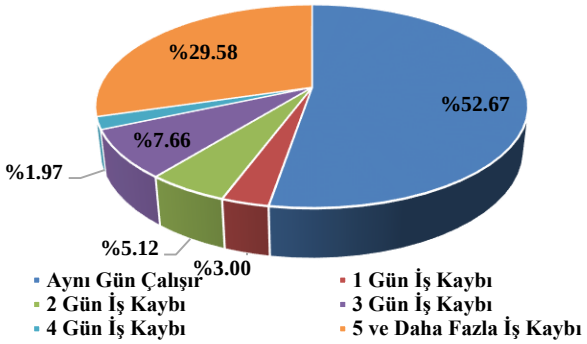
Sıra No	İş Kolu	100 Kişi Başına Düşen Kaza Sayısı
1	Kömür ve Linyit Çıkartılması	28.96
2	Diğer Ulaşım Araçlarının İmalatı	13.13
3	Ana Metal Sanayi	11.43
4	Diğer Metalik Olmayan Mineral Ürünlerin İmalatı	7.96
5	Fabrikasyon metal ürünleri imalatı (makine ve teçhizat hariç)	7.19
6	Başka Yerde Sınıflandırılmamış Makine Ekipman İmalatı	7.03
7	Atığın toplanması. Islahı ve bertarafı faaliyetleri, maddelerin geri kazanımı	6.88
8	Metal Cevheri Madenciliği	6.80
9	Elektrikli Teçhizat İmalatı	6.76
10	Kauçuk ve Plastik Ürünlerinin İmalatı	6.76
11	Motorlu kara taşıtı. Treyler (römork) ve yarı treyler (yarı römork) imalatı	6.43
12	Posta ve Kurye Faaliyetleri	6.28
13	Madenciliği Destekleyici Hizmet Faaliyetleri	6.19
14	Ağaç. Ağaç ürünleri ve mantar ürünleri imalatı (mobilya hariç), saz. Saman ve benzeri malzemelerden örülerek eşyaların imalatı	6.12
15	Kâğıt ve Kâğıt Ürünlerinin İmalatı	6.10

Çalışma kapsamında SGK'nın 2021 yılı verilerine göre Türkiye'de gerçekleşen iş kazaları ve bu kazalardan meydana gelen yaralanmalar sonucu oluşan iş günü kayıpları incelenmiştir. Türkiye'de iş kazaları sektörlere göre ayrı ayrı olacak şekilde hazırlanmıştır. Bu raporlar doğrultusunda Türkiye'de öncelikle çalışma alanları 88 farklı sektör olarak belirlenmiştir. Bu çalışma alanları da ayrıca kendi içlerinde alt kollara ayrılarak meydana gelen iş kazası sayıları ve bu kazaların kaç günlük iş kaybına sebep olduğu belirlenmiştir.

SGK verilerine göre iş kazalarının şiddeti;

- Aynı gün çalışan
- 1 gün iş kaybı
- 2 gün iş kaybı
- 3 gün iş kaybı
- 4 gün iş kaybı
- 5 ve daha fazla gün iş kaybı

olarak kategorilere ayrılmıştır. Yapılan çalışma kapsamında meydana gelen iş kazalarının iş günü kaybı kategorilerine göre değerlendirilmesi yapılmıştır. Şekil 2'de 2021 yılı içerisinde tüm iş kollarında meydana gelen iş kazalarının iş günü kaybı durumu incelendiğinde elde edilen dağılım sunulmuştur.



Şekil 2. 2021 yılında meydana gelen iş kazalarının iş günü kaybına göre dağılımı

SGK verilerine göre 2021 yılı içerisinde Türkiye'de toplam 511084 adet yaralanmalı iş kazası meydana gelmiştir. Şekil 2'de görüldüğü üzere bu iş kazalarının yarısından daha fazlası (%52.67) kazazedenin kaza geçirdiği gün işe devam edebildiği iş kazalarıdır. İkinci sırada ise beş veya daha fazla iş günü kaybının olduğu iş kazaları (%29.58) gelmektedir. Ardından meydana gelme sayısına göre sırasıyla üç gün iş kaybının olduğu iş kazaları, iki gün iş kaybının olduğu iş kazaları, bir gün iş kaybının olduğu iş kazaları ve son olarak ta dört gün iş kaybının olduğu iş kazaları gelmektedir. 2021 yılında ülkemizde gerçekleşen iş kazaları genel olarak değerlendirildiğinde, iş kazasına uğrayanlarının çoğunun (%52.67) aynı gün işe devam ettiklerinden, gerçekleşen iş kazalarının çoğunun şiddetinin düşük iş kazaları olduğu görülmektedir. Fakat aynı zamanda yaklaşık % 30 gibi azımsanmayacak bir oranda meydana gelen beş veya daha fazla iş günü kaybı olan iş kazalarıdır ve bu iş kazalarının şiddeti yüksek olduğundan işe başlama süreci fazla olan iş kazalarının gerçekleştiği görülmektedir.

Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) verilerine göre yaralanmalı iş kazaları şiddetlerine göre kategorize edilmiştir. Bu çalışmada, beş veya daha fazla iş günü kaybı ve yaralanmalı iş kazası olabilirlik oranlarına göre sektörlerin sıralaması yapılmıştır. Öncelikle SGK 2021 yılı [8] verilerinde bulunan tüm sektörler incelenmiştir. Beş ve daha fazla iş günü kaybı olan kazalar ciddi kaza statüsünde değerlendirildiğinden, bu tür kazaların en fazla görüldüğü ilk 10 sektör tespit edilmiştir. İş kazasına maruz kalındığında iş günü kaybının fazla olması kaza şiddetinin yüksek olduğu noktasında önemli bir bilgi vermektedir. Dolayısıyla, iş günü kaybı beş gün veya daha fazla olan sektörlerin hangileri olduğunun belirlenmesi riskli sektörlerin daha net olarak

ortaya çıkarılmasını sağlayacaktır. Bu amaç doğrultusunda, beş ve daha fazla iş günü kayıplı kazaların en fazla gerçekleştiği ilk 10 sektör kişi başına düşen iş kazası oranına göre sıralanmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Beş veya daha fazla iş günü kayıplı iş kazalarının gerçekleştiği ilk 10 sektör (kişi başına düşen kaza sayısına göre sıralama)

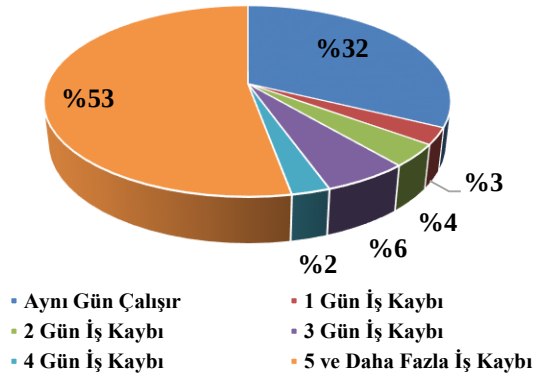
Sıra No	İş Kolu	100 Kişi Başına Düşen Kaza Sayısı
1	Kömür ve Linyit Çıkartılması	15.31
2	Ana Metal Sanayi	5.06
3	Diğer Ulaşım Araçlarının İmalatı	3.45
4	Diğer Metalik Olmayan Mineral Ürünlerin İmalatı	3.03
5	Fabrikasyon metal ürünleri imalatı (makine ve teçhizat hariç)	2.77
6	Ağaç. ağaç ürünleri ve mantar ürünleri imalatı (mobilya hariç), saz. saman ve benzeri malzemelerden örülerek eşyaların imalatı	2.68
7	Kauçuk ve Plastik Ürünlerinin İmalatı	2.65
8	Kâğıt ve Kağıt Ürünlerinin İmalatı	2.49
9	Başka Yerde Sınıflandırılmamış Makine Ekipman İmalatı	2.48
10	Motorlu kara taşıtı. treyler (römork) ve yarı treyler (yarı römork) imalatı	2.17

Tablo 2'de beş gün ve daha fazla iş günü kaybının olduğu yaralanmalı iş kazaları sayıları sıralaması gösterilmektedir. Beş gün ve daha fazla iş günü kaybının meydana geldiği yaralanmalı iş kazaları incelendiğinde, genel olarak "Ağaç, ağaç ürünleri ve mantar ürünleri imalatı (mobilya hariç), saz, saman ve benzeri malzemelerden örülerek eşyaların imalatı" iş kolu Tablo 1'de 14. sırada olmasına rağmen beş gün ve daha fazla iş günü kaybının sıralandığı Tablo 2'de 6. sırada yer almaktadır. Yine benzer şekilde, "Kâğıt ve kâğıt ürünlerinin imalatı" iş kolu Tablo 1'de 15. sırada olmasına rağmen Tablo 2'de 8. sırada gelmektedir.

Yaralanmalı kaza olabilirlik oranı sıralamasında ilk 10 sektör iş günü kayıplarına göre incelendiğinde, başka bir ifade ile Tablo 1 ve Tablo 2 karşılaştırıldığında bazı sektörlerde farklılıklar olduğu görülmektedir.

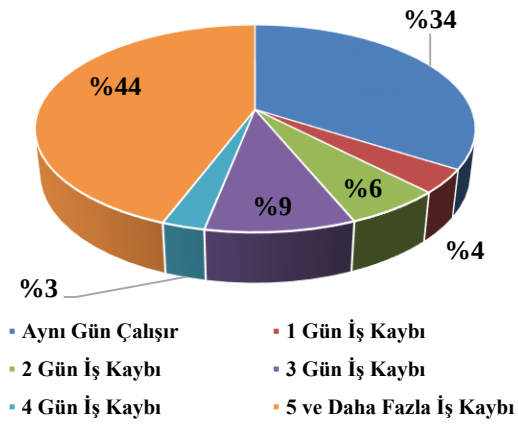
Şekil 2'de belirtilen dağılımda en fazla karşılaşılan yaralanmalı iş kazaları aynı gün işe devam edilebilen iş kazalarıdır. Aynı gün işe devam edilebilen iş kazalarını ise beş veya daha fazla iş günü kaybı olan yaralanmalı iş kazaları takip etmektedir. Fakat bu dağılıma uymayan bazı sektörler bulunmaktadır. Tablo 1 ve Tablo 2'de sunulan "Kömür ve linyit çıkartılması", "Diğer metalik olmayan mineral ürünlerin imalatı" ve "Ağaç, ağaç ürünleri ve mantar ürünleri imalatı (mobilya hariç), saz. saman ve benzeri malzemelerden örülerek eşyaların imalatı" sektörleri bu genel dağılıma aykırı bir durum sergilemektedir. Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'te iş günü kayıplı yaralanmalı kazaların Türkiye de meydana gelen yaralanmalı iş kazaları dağılımından farklı davrandığı sektörler ve iş günü kayıplarına göre yaralanmalı kaza dağılımları sunulmuştur. Bu grafiklerdeki oranlar oluşturulurken iş günü kayıplı kazaların kaza olabilirlik oranları dikkate alınmıştır.

Türkiye'de yaralanmalı kaza olabilirlik oranı sıralamasında ve beş veya daha fazla iş günü kayıplı kazaların sıralamasında, ilk sırada "Kömür ve linyit çıkartılması" sektörü gelmektedir. Ayrıca bu sektör iş günü kayıplı kaza dağılımında da Türkiye'deki genel dağılımdan farklı davranan bir sektördür. Bu sektörde beş veya daha fazla iş günü kayıplı kaza iş kazalarının yarısından fazlasını (%53) oluşturmaktadır.



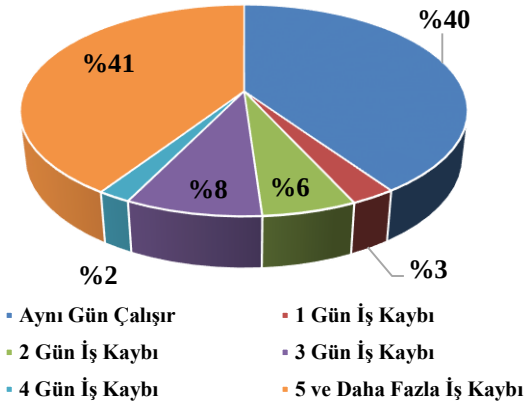
Şekil 3. Kömür ve Linyit çıkartılması sektörü iş günü kaybı durumu

Yaralanmalı kaza olabilirlik oranı sıralamasında ve beş veya daha fazla iş günü kaybı kaza olabilirlik sıralamasında 4. sırada yer alan "Diğer metalik olmayan ürünlerin imalatı" sektörü de, "Kömür ve linyit çıkartılması" sektörü gibi beş veya daha fazla iş günü kaybının meydana geldiği yaralanmalı iş kazalarının en fazla yaşandığı sektördür. "Diğer metalik olmayan mineral ürünlerin imalatı" sektöründe %44'lük bir oranla beş veya daha fazla iş günü kayıplı iş kazası meydana gelmiştir ve bu sektörde en fazla karşılaşılan yaralanmalı iş kazası bu gruptur.



Şekil 4. Diğer metalik olmayan mineral ürünlerin imalatı sektöründeki iş günü kayıplı kazaların dağılımı

Yaralanmalı kaza olabilirlik oranı sıralamasında 14. sırada olan fakat beş veya daha fazla iş günü kayıplı iş kazaları sıralamasında 6. sırada olan "Ağaç. ağaç ürünleri ve mantar ürünleri imalatı (Mobilya Hariç), saz. saman ve benzeri malzemelerden örülerek eşyaların imalatı" sektörü de genel Türkiye yaralanmalı iş kazalarının iş günü kaybı dağılımına uymayan sektörlerdendir. Bu sektörde de en fazla meydana gelen yaralanmalı iş kazaları, beş veya daha fazla günlük iş kaybının olduğu iş kazalarıdır.



Şekil 5. Ağaç. ağaç ürünleri ve mantar ürünleri imalatı (Mobilya Hariç), saz. Saman ve benzeri malzemelerden örülerek eşyaların imalatı sektöründeki iş günü kayıplı kazaların dağılımı

Beş veya daha fazla iş günü kayıplı iş kazalarının yukarıda belirtilen (Şekil 3, 4 ve 5) üç sektörde daha fazla meydana geldiği görülmektedir. Bu nedenle bu sektörlerde olası yaşanabilecek kazalara karşı gerekli önlemler alınmalıdır.

Yaralanmalı kaza olabilirlik oranı ve beş veya daha fazla iş günü kaybı kaza olabilirlik oranına göre ilk sırada gelen "Kömür ve linyit çıkartılması" en riskli sektördür. Madencilik sektörü dünya genelinde de en riskli sektör olarak kabul edilmektedir [1], [9-15]. Madencilik sektörünün de kömür madenciliği en tehlikeli alt koludur. Yeraltı kömür madenciliği dünyadaki en tehlikeli sektörlerden birisidir [6, 9], [16-26].

4 Sonuçlar

İş sağlığı ve güvenliği önlemleri, üretimin sürekliliğinin sağlanması ve ekonomik kalkınmanın hızlandırılması amacıyla oldukça önemli bir hal almıştır. Bir ülkede meydana gelen iş kazalarının sayısı, o ülkenin iş sağlığı ve güvenliği açısından ne kadar başarılı olduğunun bir göstergesi olarak kabul edilebilir. Bununla birlikte, iş kazalarından kaynaklanan maddi ve manevi sonuçların üstesinden gelmek yerine, iş sağlığı ve güvenliği yönetiminin uygulanabilirliği ile iş kazalarının önceden engellenmesi daha yararlıdır. Bu amaçla, daha önce meydana gelen iş kazalarının analizleri iyi bir şekilde yapılmalıdır. Bu analizler, kaza risklerinin belirlenmesine ve daha etkili iş sağlığı ve güvenliği önlemlerinin alınmasına yardımcı olmaktadır.

2016-2021 yılları arasında yaralanmalı kazalarını kaza olabilirlik oranı incelendiğinde ortalama olarak 100 kişi başına düşen en yüksek yaralanmalı iş kazası sayısının 2021 yılında 3,17 olduğu görülmektedir. Bu kaza olabilirlik oranı son 6 yılın (2016-2021) en yüksek değeridir.

2021 yılı içerisinde, Türkiye'de meydana gelen yaralanmalı iş kazaları iş günü kaybına göre incelendiğinde, en sık karşılaşılan yaralanmalı iş kazalarının kazanın meydana geldiği gün işçinin işe devam edebildiği iş kazaları olduğu söylenebilir. İkinci sırada ise beş veya daha fazla iş günü kaybının meydana geldiği yaralanmalı iş kazaları yer almaktadır.

İş günü kaybı yüksek olan sektörler kaza şiddeti açısından yüksek riskli olarak değerlendirilebilir. Sektörel bazda incelendiğinde ise bazı sektörlerin çok riskli olduğu görülmektedir. Örneğin, "Kömür ve linyit çıkartılması" sektörü hem yaralanmalı iş kazası olabilirlik oranı sıralamasında hem de beş veya daha fazla iş günü kayıplı kaza olabilirlik oranında ilk sırada gelmektedir. Yaralanmalı kaza olabilirlik oranı açısından değerlendirildiğinde diğer dikkat edilmesi gereken sektörler ise; "Ana metal sanayi", "Diğer ulaşım araçlarının imalatı", "Diğer metalik olmayan mineral ürünlerin imalatı" ve "Fabrikasyon metal ürünleri imalatı (makine ve teçhizat hariç)" sektörleridir. Kaza şiddeti açısından değerlendirildiği zaman "Kömür ve linyit çıkartılması" sektörünün yanı sıra "Diğer metalik olmayan mineral ürünlerin imalatı" sektörü ve "Ağaç. Ağaç ürünleri ve mantar ürünleri imalatı (Mobilya hariç) saz. saman ve benzeri malzemelerden örülerek eşyaların imalatı" sektörlerine iş sağlığı ve güvenliği açısından dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu sektörler hem iş kazalarının en çok yaşandığı hem de iş kazasının şiddetinin en yüksek olduğu sektörler olduğundan, kaza analizleri yapılarak gerekli önlemler alınmalıdır. Tüm iş kollarında meydana gelen iş kazalarının analizinde ise sadece kaza olabilirlik oranına göre değil ayrıca iş günü kayıplarına göre kaza şiddetinin belirlenmesi konusu oldukça mühimdir. İşletmeler bu doğrultuda kazaları önleyici tedbirler planlamalıdır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (Turnitin): %15

Kaynaklar

[1] S. Keffane, Communication's role in safety management and performance of the road safety practices. International Journal of Transportation Science and Technology, 3,79-94, 2015. https://doi.org/10.1260/2046-0430.3.1.79

[2] N. Bilim, A. Bilim, Occupational health and safety outlook in Turkey, 25th European Safety and Reliability Conference (ESREL 2015), pp.3201-3204, Zurich, Switzerland, 2015

[3] İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu. https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2012/06/20120630-1.htm , Erişim 19 Şubat 2023

[4] Uluslararası Çalışma Örgütü. https://ilostat.ilo.org/resources/concepts-and-

definitions/description-occupational-safety-and-health-statistics/, Erişim 21 Şubat 2023
[5] Uluslararası Çalışma Örgütü. https://www.ilo.org/moscow/areas-ofwork/occupational-safety-and health/WCMS_249278/lang--en/index.htm, Erişim 21 Şubat 2023
[6] N. Bilim, S. Dündar, ve A. Bilim, Ülkemizdeki maden sektöründe meydana gelen iş kazası ve meslek hastalıklarının analizi, Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 7(2), 423-432, 2018. https://doi.org/10.17798/bitlisfen.435729
[7] T.C. Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) İstatistik Yıllıkları, 2021. https://www.sgk.gov.tr/Istatistik/Yillik/fcd5e59b6af9-4d90-a451-ee7500eb1cb4/, Erişim 14 Şubat 2023.
[8] T.C. Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) İstatistik Yıllıkları (2016-2021).” T.C. Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) İstatistik Yıllıkları https://www.sgk.gov.tr/Istatistik/Yillik/fcd5e59b-6af9-4d90-a451-ee7500eb1cb4/, Erişim 14 Şubat 2023
[9] N. Bilim and A. Bilim, Estimation of the risk of work-related accidents for underground hard coal mine workers by logistic regression, International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 28(4), 2362-2369, 2021.
[10] O. Dalyan ve M. Pişkin, İşyerlerinde ramak kala bildirimlerinin iş kazalarına etkisi ve inşaat sektöründe uygulama, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6(1), 133-143, 2020. https://doi.org/10.28979/comufbed.609675
[11] J.M. Patterson, S. A. Shappell, Operator error and system deficiencies: analysis of 508 mining incidents and accidents from Queensland, Australia using HFACS, Accident Analysis& Prevention. 42(4), 1379-1385, 2010. https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.02.018
[12] F. Geng, J. H. Saleh, Challenging the emerging narrative: critical examination of coalmining safety in China, and recommendations for tackling mining hazards, Safety Science, 75, 36-48, 2015. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.01.007
[13] Q. Liu, J. Liu, J. X. Gao, J, Wang and J, Han, An empirical study of early warning model on the number of coal mine accidents in China. Safety Science, 123,1-7, 2020 https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.104559
[14] S. Verma and S. Chaudhari, Safety of workers in Indian mines: study, analysis, and prediction, Safety and Health at Work, 8(3), 267-275, 2017. https://doi.org/10.1016/j.shaw.2017.01.001
[15] R. E. Rabeiy, M. R. ElTahlawi and G.Y. Boghdady, Occupational health hazards in the Sukari gold mine, Egypt. Journal of African Earth Sciences, 146, 209–216, 2018. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.04.023
[16] N. Bilim, Kömür madenlerinde meydana gelen iş kazalarının istatistiksel değerlendirilmesi, Madencilik Türkiye, 44(6), 78–82, 2015.
[17] O. Dalyan, E. Canpolat, H. Dalyan, Ö. f. Öztürk, ve M. Pişkin, Türkiye’de İş Kazası Eksik Bildirimlerinin İncelenmesi, Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi, 5(2), 121-132, 2021. https://doi.org/10.33720/kisgd.954724
[18] S. Mahdevari, K. Shahriar and A. Esfahanipour, Human health and safety risks management in underground coal mines using fuzzy TOPSIS. Science of The Total Environment, 488, 85–99, 2014. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.04.076
[19] M. Sarı, H. S. B. Düzgün, C. Karpuz and A. S. Selçuk, Accident analysis of two Turkish underground coal mines, Safety Science,42(8), 675-690, 2004. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2003.11.002
[20] J. Joy, Occupational safety risk management in Australian mining. Occupational Medicine, 54(5), 311-315, 2004. https://doi.org/10.1093/occmed/kqh074
[21] P. Paul, Predictors of work injury in underground mines – an application of a logistic regression model, Mining Science and Technology (China), 19(3), 282-289, 2019. https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60053-3
[22] R. l. Grayson, H. Kinilakodi and V. Kecojevic, Pilot sample risk analysis for underground coal mine fires and explosions using MSHA citation data, Safety Science, 47(10), 1371–1378, 2009. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2009.03.004
[23] J. Maiti and V. V. Khanzode, Development of a relative risk model for roof and side fall fatal accidents in underground coal mines in India, Safety Science, 47(8), 1068-1076, 2009. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2008.12.003
[24] K. Shahriar and E. Bakhtavar, Geotechnical risks in underground coal mines, Journal of Applied Sciences, 9(11), 2137-2143, 2009. https://doi.org/10.3923/jas.2009.2137.2143
[25] V. V. Khanzode, J. Maiti and P. A. Ray, Methodology for evaluation and monitoring of recurring hazards in underground coal mining, Safety Science, 49(8–9), 1172-1179, 2011. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.03.009
[26] J. Zhang, K. Xu, G. Reniers and G. You, Statistical analysis the characteristics of extraordinarily severe coal mine accidents (ESCMAs) in China from 1950 to 2018, Process Safety and Environmental Protection, 133, 332-340, 2020. https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.10.014

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 034-040
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
Araştırma makalesi / Research article
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Turbo kompresörlerin çalışma hızını etkileyen faktörlerin makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak modellenmesi

Modelling of the factors affecting the working speed of turbo compressors using machine learning methods

Sema Atasever[1,*], Uğur Sorgucu[2]

[1] Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 50300, Nevşehir Türkiye
[2] Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 50300, Nevşehir Türkiye

Öz

Günümüzde nüfus artışı ile sanayi ve konutlara yönelik doğal gaz tüketim talebinin artması sonucunda, talebin az olduğu zamanlarda doğal gazın yeraltında depolanması ve çok olduğu zamanlarda ise depolardan kullanımının sağlanabilmesine yönelik hem ülkemizde hem de dünyada çeşitli projelerin planlaması yapılmıştır. Planlanan bu projeler vasıtasıyla doğalgaz talebindeki mevsimsel dalgalanmaların önlenmesi hedeflenmektedir. Tuz mağaralarında yeraltı doğal gaz depolaması için turbo kompresörler kullanılmaktadır. Turbo kompresörler doğalgazı yüksek basınçlara çıkarabilen önemli makinalardandır. Bu çalışma kapsamında bahsedilen turbo kompresörlerin çalışma hızını etkileyen faktörlerden akış, hat basıncı ve kuyu başı basıncının kompresör devrinin tahmini için makine öğrenmesi yöntemleri ile modellenmesi gerçekleştirilmiştir. 42 makine öğrenmesi modelinin denendiği çalışmadan elde edilen deneysel sonuçlara göre kompresör devrinin tahmininde Decision Tree Regressor (DT) algoritması 0.99 R^2, 11.29 RMSE ve 0.01 (sn) çalışma zamanı ile en iyi sonucu veren algoritma olmuştur.

Anahtar kelimeler: Makine Öğrenmesi, Decision Tree Regressor, Yer altı doğalgaz depolaması, Turbo Kompresörler

Abstract

Due to the increasing demand for natural gas in industries and households caused by population growth, various projects have been planned both in our country and globally to store natural gas underground during periods of low demand and utilize it from storage during high-demand periods. It is aimed to prevent seasonal fluctuations in natural gas demand through these planned projects. Turbo compressors are used for underground natural gas storage in salt caves. Turbo compressors are significant machines capable of raising natural gas to high pressures. Within the scope of this study, machine learning methods were used to model the factors affecting the operating speed of the mentioned turbo compressors for predicting the compressor speed, including flow, line pressure, and wellhead pressure. According to the experimental results obtained from the study, where 42 machine learning models were tested, the Decision Tree Regressor (DT) algorithm provided the best results for predicting the compressor speed with an R^2 value of 0.99, RMSE of 11.29, and a runtime of 0.01 seconds.

Keywords: Machine Learning, Decision Tree Regressor, Underground natural gas storage, Turbo Compressors

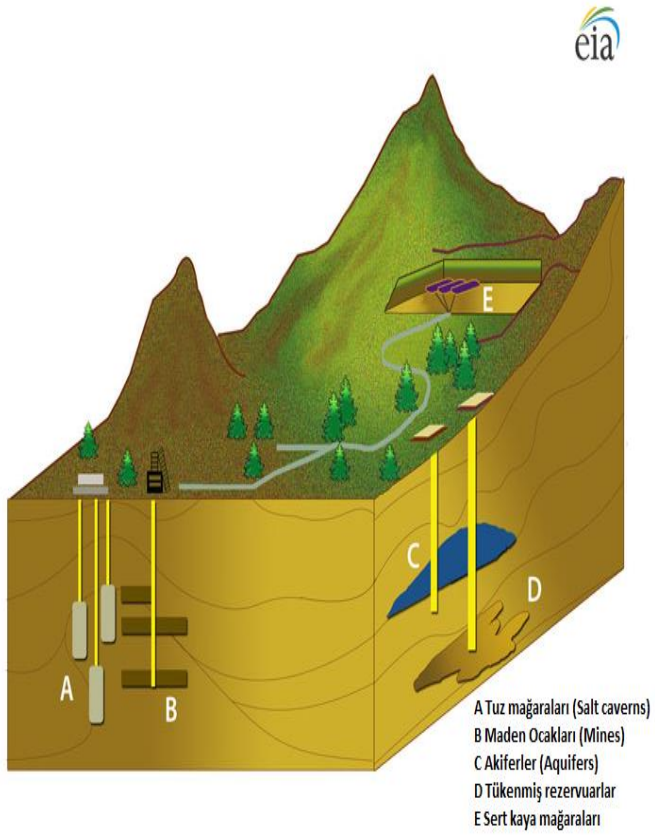
1 Giriş

Diğer fosil yakıtlara göre daha fazla çevre dostu olan doğalgaz, enerji ihtiyacının karşılanması noktasında sıklıkla ve yaygın bir şekilde kullanılan petrol türevi bir enerji türüdür. Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency, IEA) uzmanları 2035 yılında doğalgazın ikinci en büyük enerji kaynağı olacağı ve toplam enerji içindeki payının %25' e kadar artabileceğini tahmin etmektedir [1]. Doğalgaz üretimi sabitken, doğal gaz kaynaklarının kullanımı mevsime göre güçlü dalgalanmalar göstermektedir. Günümüzde nüfus artışı ile sanayi ve konutlara yönelik doğal gaz tüketim talebinin artması sonucunda, mevsimsel etkilerden kaynaklanan arz/talep uyumsuzluğunu dengelemek için, talebin az olduğu zamanlarda doğal gazın yeraltında depolanması ve çok olduğu zamanlarda ise depolardan kullanımının sağlanabilmesine yönelik hem ülkemizde hem de dünyada çeşitli projelerin planlaması yapılmıştır. IEA verilerine göre ülkemiz; yeni gaz keşifleri, boru hatları, LNG terminalleri ve artan depolama yoluyla gaz tedarik seçeneklerini genişleterek büyük bir ilerleme kaydetmiştir [2].

Doğal gaz arzında diğer ülkelere bağımlı olan ülkemiz (doğal gazın yaklaşık %99'u ithal edilmektedir) için doğal gazın depolanması büyük önem arz etmektedir [3]. Yer altı gaz depolaması (Underground Gas Storage, UGS) diye isimlendirilen yöntemler yaklaşık yüzyıldır etkili bir şekilde kullanılmaktadır [4]. Tuz mağarası gaz depolaması da bahsedilen yöntemlerden biridir ve doğal gazın kaya tuzu mağaralarında yeraltında depolanması uzun yıllardır araştırma konusu olmuştur [5]. Yeraltı tuz mağarası, petrol, gaz ve basınçlı hava gibi güç kaynaklarının depolanması için en iyi yerlerden biri olarak kabul edilmektedir [6]. Planlanan

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sema@nevsehir.edu.tr (S. Atasever)
Geliş / Recieved: 22.02.2023 Kabul / Accepted: 16.10.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1254415

bu projeler vasıtasıyla konut sektöründeki doğal gaz talebinin artmasına bağlı olarak gelecekte meydana gelecek mevsimsel dalgalanmaların önlenmesi hedeflenmektedir [7]. Ülkemizde de yeraltı doğalgaz depolama tesisi projeleri bulunmaktadır. Ancak ilgili tesislerin stratejik öneme haiz olmaları sebebiyle, tesislere ilişkin kapasite, lokasyon ve kullanılan teknolojiye ilişkin detaylı bilginin bu makale kapsamında yer almayacaktır.



Şekil 1. Yeraltı doğal gaz depolama tesisi çeşitleri[8]

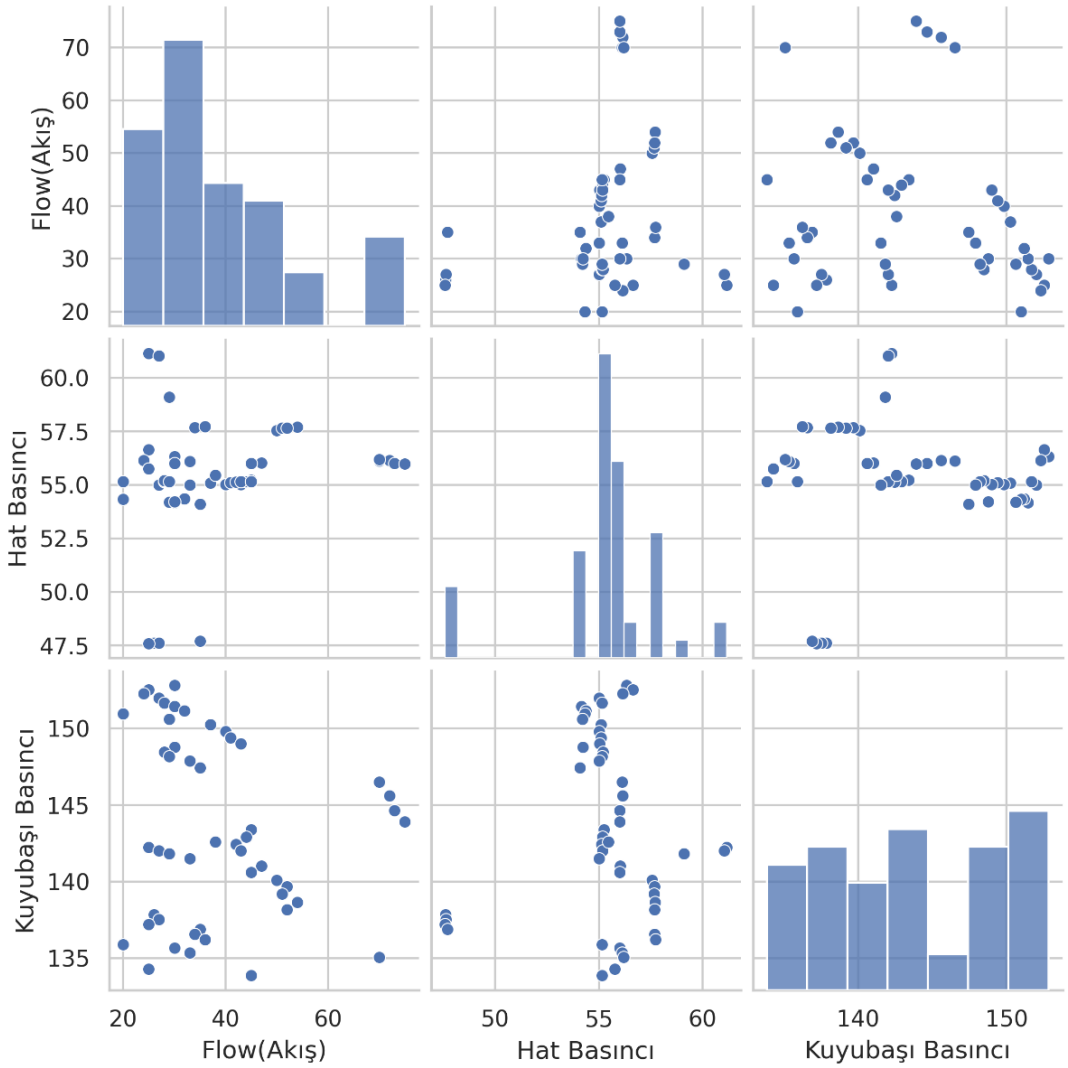
Renksiz, kokusuz, gaz halinde bir hidrokarbon olan doğal gaz birkaç farklı şekilde depolanabilir. En yaygın olarak üç tip tesiste basınç altında yeraltında tutulur. Bu yeraltı tesisleri, petrol ve/veya doğal gaz sahalarında, akiferlerde (aquifers) ve tuz mağarası oluşumlarında tükenmiş rezervuarlardır (Şekil 1). Doğal gaz ayrıca yer üstü tanklarda sıvı veya gaz halinde depolanır [8]. Türkiye jeoloji açısından oldukça şanslı bir yapıdadır. Nitekim tuz oyuklarında depolama yapılabildiği gibi tükenmiş rezervuar yöntemiyle depolama yapmak için de uygun lokasyonlar bulunmaktadır [1].

Tuz mağaralarında yeraltı doğal gaz depolaması için, bir veya birden fazla sondaj kuyusu kullanılarak, yaklaşık 1000 metre derinlikte bulunan geniş yer altı doğal tuz yapısındaki tuz birikintilerinin bir bölümünün kontrollü olarak tatlı su ile eritilmesi (leaching) ve tuzlu suların dışarı pompalanması yoluyla yavaş yavaş yer altı gaz depolama mağaraları denilen kavernalar (cavern) oluşturulur [4][7]. Dünyada 74 adet tuz mağarası (UGS) vardır. Bir tuz mağarası, kendi kendini iyileştirme özellikleri ve son derece düşük geçirgenlik oranı nedeniyle gaz veya petrol depolaması için mükemmel bir seçimdir [7]. Bu mağaralarda doğal gaz depolayabilmek için, yaygın olarak turbo kompresörlere ihtiyaç duyulmaktadır. [9] Turbo kompresörler doğalgazı yüksek basınçlara çıkarabilen önemli makinalardandır. Turbo kompresörleri türbin ve santrifüj kompresör olarak iki kısımda inceleyebiliriz. Türbin kısmında eksenel kompresör vasıtasıyla hava ortalama olarak atmosfer basıncına yakın bir değerle yani yaklaşık 1 bar ile eksenel kompresörün girişine çekilir. Eksenel kompresörde rotor kanatları havaya hız kazandırır daha sonra hava stator kanadına geçer. Stator kanadı bir difüzör gibi davranır rotor kanadına ters olarak konumlandırıldığı için havanın hızını azaltır ve basıncını arttırır. Hava yaklaşık 13 bara yükseltilir ve yanma odasına basınçlı bir şekilde hava gönderilir. Yanma odasında yakıt olarak kullanılan doğalgaz yaklaşık olarak 32 bar (tipik boru hattı basınçları 40 bar ile 100 bar arasındadır [10]) ile yanma odasına gönderilir. Yakıt ve hava yanma odasında karışarak 2 adet ateşleme trafosu yardımıyla ateşlenir. Yanma odasından çıkan yüksek enerji ve basınç, basınç türbinini döndürür. Türbine bağlı olan şaft yardımıyla bu yüksek enerji mekanik enerjiye dönüşür. Şaft dişli kutusuyla santrifüj kompresöre bağlıdır. Santrifuj kompresör temel impeller ve difüzör olmak üzere iki temel elemandan oluşur. Basınçlandırılmak istenilen doğalgaz, impeller sayesinde merkezkaç kuvvetiyle döndürülerek doğalgaza yüksek dönme enerjisi kazandırır. Difüzöre gönderilen doğalgazın, difüzörde daralan bir kanal yardımıyla hızı yavaşlatılır. Böylece yavaşlayan doğalgaz basınçlandırılmış olur.

Günümüzde yakıt enerjisini mekanik enerjiye çeviren gaz türbinleri, enerji üretimi, ulaşım, petrokimya ve çeşitli endüstriyel işleme sistemlerinin ayrılmaz parçalarıdır [11]. Kompresörün çalışması için sıkıştırılmış havanın türbin gözeneklerinde (nozullarında), çıkış şaftı ile bir jeneratöre aktarılması gerekmektedir. Ardından, akış kompresörü sayesinde eksenel veya radyal bir ivme sağlanarak makinenin içerisinde sıkıştırılmış hava elde edilir. Sıkıştırılmış havanın yanması için, yakıt ile karışması gerekmektedir. Bu işlem de yanma odasında gerçekleşir. Yanma odası çıkışında yüksek hız kazanan hava, yön değiştirerek türbin rotorunun dönmesini sağlar [12].

En basit haliyle, kompresyon etkisi dönerek ilerleyen havanın kazandığı kinetik enerji yüklenmesi olarak söylenebilir. Havanın turbo kompresör içinde hızlanması ve sonrasında bir bölgede yığılması ile bir önceki adımda kazandığı enerji basınç etkisine dönüşür. Basit dinamik ilkeleriyle çalışan turbo kompresörlerde, hava hızı arttıkça basınç da artmaktadır. Bu anlamda hava akış hızı ile turbo basıncı arasında doğru orantı olduğu da söylenebilir. Hızla ve dönerek ilerleyen havayı bir basınçla ilerleten elemana impeller denir. Turbo kompresörlerin içinde içten yanmalı motorlardaki gibi basınç düzenleyici piston tipi mekanik sürme elemanları yoktur [9].

Kavernalar ortalama olarak yer altında 1150 metre ile 1450 metre arasında oluşturulmaktadır. Yer altındaki tuz tabakaları eritilerek kavernalar oluşturulur. Yer altındaki tuzu eritmek için yüksek oranda suya ihtiyaç vardır. Su santrifüj pompalar yardımıyla yüksek basınca ulaşana kadar basınçlandırılır.



Şekil 2. Kompresörlerin çalışma hızını etkileyen akış (std m^3/h), hat basıncı ve kuyubaşı basıncına ait dağılım grafiği

Daha sonra basınçlandırılan su tuzun üzerine gönderilerek tuz tabakası eritilir. Eriyen tuz tabakası sondaj yardımıyla yeryüzüne çıkartılır. Boşalan tuz tabakasının yerine ise doğalgaz basılır. Kavernanın içindeki doğalgaz basıncı 66 bar ile 200 bar arasında değişmektedir (tipik olarak 100 bar ile 200 bar arasındaki nihai depolama basıncına kadar sıkıştırılması gerekir [10]). Fakat en az 66 bar değerindeki doğalgazın kavernada sürekli durması gerekmektedir. Bu 66 bar değerindeki kavernada sürekli bulunması gereken gaza yastık (base, cushion) gazı denilmektedir. Yastık gazı kavernadan çekilip ana hatta verilmeye başlanırsa kavernada çökmeler oluşmaktadır. Tuz mağaraları, çalışma gazı kapasitelerine göre çok yüksek geri çekme ve enjeksiyon oranları sağlar. Yastık gaz gereksinimleri ise nispeten düşüktür [8].

Tuz mağaraları ile ilgili çok sayıda araştırma yapılmıştır:

Li ve arkadaşları [4], yüksek oranda çözünmeyen tuz oluşumlarında gaz depolama için tuz mağarası liçinin (salt cavern leaching) matematiksel modeli ile ilgili bilimsel bir rapor hazırlamışlardır. Çalışmalarında tuz mağarası gelişimini tahmin etmek için matematiksel bir model oluşturarak çözünmeyen tortuların mağaranın gelişimi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sonuçta önerdikleri modelin mağara tabanı ve çatısının şekil tahmininde doğru sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Wang ve arkadaşları [6], çalışmalarında, tuz mağarası gaz deposunun şeklini ve boyutunu tasarlamak için kullanılan yeni bir model önermişlerdir. Önerdikleri yeni modelde mağara tasarımı alt ve üst yapılar olmak üzere iki kısma ayrılmıştır. Ayrıca kaya tuzunun gaz basıncı, sürtünme açısı ve kohezyonunun mağara stabilitesi üzerindeki etkilerini tartışmışlardır. Sonuçta yeni önerdikleri tuz mağarası gazı deposunun, aynı koşullar altında hacim yakınsama, yer değiştirme, plastik hacim oranı, güvenlik faktörü ve etkili gerinim açısından mevcut tuz mağarası şeklinden daha önemli avantajlara sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Wanyan ve arkadaşları [13], Jiangsu'daki Jintan gaz deposunun tasarım deneyimine ve saha uygulamasına dayalı olarak tasarım konseptini tamamen güncellemişlerdir.

Güncellenen tasarım konseptine dayalı olarak, saha değerlendirmesi, mağara tasarımı ve kontrolü, stabilite değerlendirmesi, depolama kapasitesi, parametre tasarımı, eski mağara taraması ve kullanımı ve gaz depolama işletimi ve izlemesinde beş temel teknoloji önermişlerdir. Sonuç olarak, araştırma sonuçlarının, tuz mağarası yeraltı gaz depolama inşaat programının tasarımı ve mühendislik uygulaması için rehberlik sağladığı gibi, benzer gaz depolarının inşası için de teorik ve teknik destek sağlayacağını belirtmişlerdir.

Bu çalışma, enerji sektöründeki mevsimsel enerji talebi dalgalanmaları ile mücadele etmek için doğal gazın yeraltı depolamasında kullanılan turbo kompresörlerin önemini vurgulamaktadır. Bu sayede turbo kompresörlerin çalışma hızını etkileyen faktörlerin makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak yenilikçi bir yaklaşım ile modellenebileceği gösterilmiştir. Ayrıca, turbo kompresörlerin çalışma hızını etkileyen faktörlerin makine öğrenmesi yöntemleriyle modellemesi, enerji verimliliği ve endüstriyel süreçlerde önemli bir ilerleme sağlayabilir. Bu çalışma, geleneksel yöntemlerin ötesine geçerek veri analitiği ve yapay zekâ algoritmalarını kullanarak daha hassas tahminler sunar. Bu yenilikçi yaklaşım, enerji maliyetlerini azaltma, üretkenliği artırma ve çevresel etkileri minimize etme potansiyeline sahiptir. Ayrıca, bu çalışma turbo kompresörlerin daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunarak endüstriyel proseslerin daha güvenli ve verimli hale getirilmesine yardımcı olabilir, böylece literatüre önemli bir katkı sunar.

Kompresörlerin çalışma hızını etkileyen faktörler akış (std m^3/h), hat basıncı ve kuyubaşı basıncıdır. Bu çalışma kapsamında bahsedilen faktörler kullanılarak kompresör devrinin (Round Per Minute, RPM) tahmininin makine öğrenmesi yöntemleri ile modellemesi gerçekleştirilecektir.

Turbo kompresörler yer altı doğal gaz depolama tesislerinde kullanılan hayati öneme sahip makinelerdir. Doğal gazın etkili depolama ve dağıtım için gerekli olan yüksek basınçlara yükseltilmesinde önemli bir rol oynarlar. Bu çalışma, turbo kompresörlerin çalışma hızını etkileyen faktörleri tahmin etmek için makine öğrenmesi yöntemlerinin, özellikle de DT algoritmasının kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Modellemeden elde edilen analiz sonuçları sistem süreçleri ve dinamikleri hakkında önemli bilgiler sağlayabilir. Bu açıdan, böylesine önemli tesislerdeki proseslerin makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak modellenmesi, bakım maliyetinin ve makine arızasının azalmasına ve operatör güvenliğinin artmasına yardımcı olacaktır.

Bu çalışmadaki temel fark ve yenilik, yeraltı doğal gaz depolaması için turbo kompresörlerin çalışmasını modellemek amacıyla 42 farklı makine öğrenimi algoritmasının uygunluğunun araştırılmasında yatmaktadır. Makine öğrenimi algoritmalarının karşılaştırmalı testleri sonucunda, yüksek doğruluk oranı ve düşük çalışma süresine sahip olan DT algoritmasının bu problem için en uygun model seçilmesi, bu araştırmayı diğerlerinden farklı kılmaktadır.

2 Materyal ve metot

2.1 Veri

Bu çalışmada, Türkiye'de faaliyet gösteren bir yeraltı doğalgaz depolama tesisine ait 18.02.2002-11.05.2022 tarihleri arasında ölçülen 50 adet veri kullanılmıştır. Rastgele bir şekilde, verilerin %80'i eğitim için, %20'si ise modelin doğruluğunu değerlendirmek için test veri seti olarak kullanılmıştır.

Kavernadaki basınç, kuyubaşı basıncı ile aynı değere sahiptir. Kavernadaki yani kuyubaşındaki basınç ne kadar yüksek olursa kompresörün çalışma devrini akış oranını gerçekleştirmek için arttırmak gerekir. Kompresör çıkışındaki basınç değeri arttıkça kompresör zorlanır. Kavernadaki basınç değeri azaldıkça kompresör çıkışındaki basınç değeri de azalacağından kompresör daha rahat çalışmaya başlar ve aynı akış değeri için kompresör daha düşük hızlarda akış oranını gerçekleştirir.

Bir diğer önemli parametre olan hat basıncı ana iletim hattındaki basıncı ifade eder. Genel olarak hat basını 40 bar ile 75 bar arasında bir değere sahip olmalıdır. Hat basıncı çok fazla düşerse iletim hattının sonundaki hatlara doğru basınç değeri düşeceğinden gaz akış oranı düşmektedir. Hat basıncı aynı zamanda kompresör giriş basıncını da ifade etmektedir.

2.2 Yöntem

Modellerin eğitim ve test süreçleri, 42 farklı makine öğrenimi regresyon modelini karşılaştırmak için hızlı bir yaklaşım sunan açık kaynak kodlu bir Python kütüphanesi olan Lazy Predict kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Lazy Predict birçok temel model oluşturmaya yardımcı olan ve herhangi bir parametre ayarlaması gerekmeden hangi modellerin daha iyi çalıştığını anlamaya yardımcı olan bir kütüphanedir [14].

2.2.1 Değerlendirme

Modellerin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan R^2 ve Root Mean Squared Error (RMSE) değerleri kullanılmıştır.

Determinasyon katsayısı (coefficient of determination) (genellikle R^2 olarak gösterilir), varyans analizi ve regresyon analizinde kullanılan bir kavramdır. R^2'nin alacağı değer aralığı kullanılan modelin uygunluğuna bağlıdır; doğrusal en küçük kareler regresyon modelleri gibi standart durumlarda 0 ile 1 arasında bulunurlar. Determinasyon katsayısı hesaplanırken aşağıdaki denklem kullanılır (Denklem 1) [15]:

$$R^2 = 1 - \sum_{i}^{n} \frac{(yi_{gerçek} - yi_{tahmin})^2}{(yi_{gerçek} - ortalama(y_{gerçek}))^2} \quad (1)$$

Çeşitli disiplinlerde kullanılan mutlak hata ölçüsü olan RMSE hesaplanırken aşağıdaki denklem kullanılır (Denklem 2) [16]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(yi_{\text{tahmin}} - yi_{\text{gerçek}})^2} \quad (2)$$

2.2.2 *Makine öğrenimi algoritmaları*

Makine öğrenimi üç ayrı şekilde sınıflandırılır: denetimli öğrenme (supervised learning), denetimsiz öğrenme (unsupervised learning) ve pekiştirmeli öğrenme (reinforcement learning) [17]. Bu çalışmada, turbo kompresörlerin kompresör devrini tahmin etmek için denetimli öğrenme kullanılmıştır. Denetimli öğrenme, eğitim için etiketli verileri (ör. akış, basınç vb.) kullanır ve verilerden bir işlev çıkarır. Kompresör devrini tahmin etmek etmek için Lazypredict kütüphanesi kullanılarak toplam 42 regresyon modelinin performansı karşılaştırılmıştır. En iyi sonucu veren ilk beş model Tablo 1'de listelenmiştir.

Tablo 1. En iyi sonucu veren ilk beş model

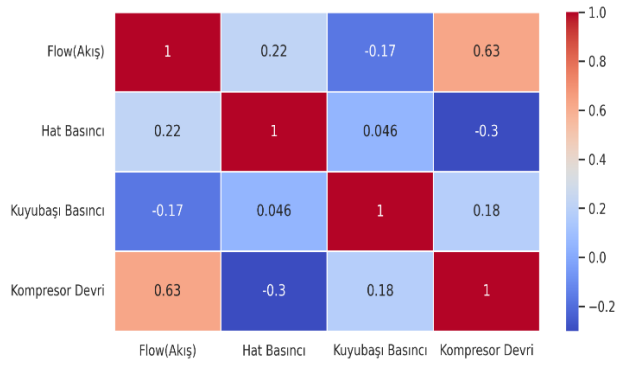
Model	R^2	RMSE	Çalışma Zamanı (sn)
DT	0.99	11.29	0.01
GradientBoostingRegressor (GB)	0.95	23.40	0.05
AdaBoostRegressor (AB)	0.95	24.67	0.10
ExtraTreesRegressor (ET)	0.92	30.04	0.08
RandomForestRegressor (RF)	0.88	37.47	0.15

Tablo 1 model sonuçlarının performansını listelemektedir. Tabloya göre en başarılı yöntem DT algoritması olmuştur. Bu modelleri performans anlamında diğer modellerden öne çıkaran hususlar, modellerin aşağıdaki özelliklerinden kaynaklanıyor olabilir:

- DT'nin, verilerdeki karmaşık doğrusal olmayan modelleri yakalama konusundaki üstünlüğü ve bunları, doğrusal ilişkilerin kısıtlayıcı varsayımı olmadan regresyon görevi için uygun hale getirmesi [18].
- Topluluk öğrenme (Ensemble Learning) yöntemlerinin genellikle tek bir modelden daha iyi performans sağladığı göz önüne alındığında [19], GB, AB, ET ve RF'nin ortak özelliklerinin popüler topluluk öğrenme yöntemleri olmaları.

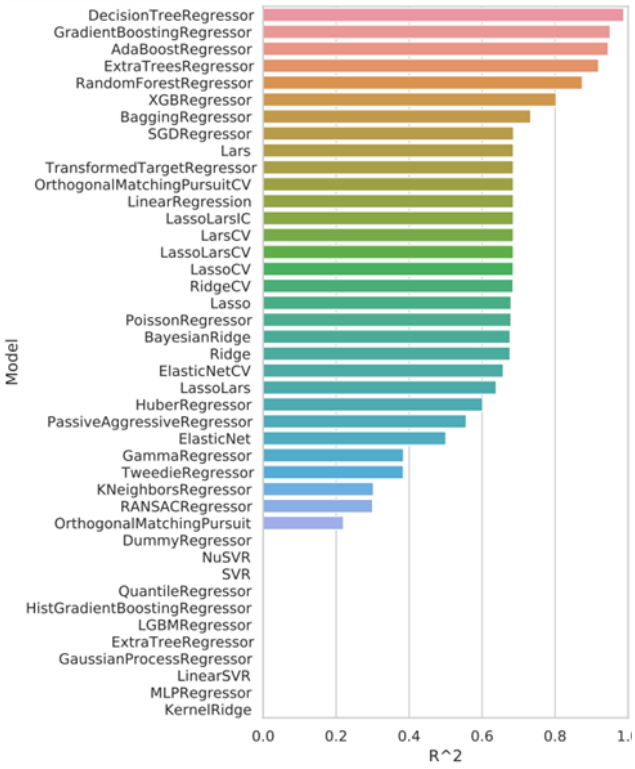
2.2.2.1 *Karar ağaçları (DT)*

Bu yaklaşım, makine öğrenimi, veri madenciliği ve istatistikte kullanılan tahmine dayalı modelleme tekniklerinden biri olan karar ağacı öğrenmesi veya karar ağaçlarının tümevarımı olarak da bilinir. Karar ağacı, sınıflandırma ve regresyon için yaygın olarak kullanılan bir modeldir ve bir karara varmak için evet veya hayır soruları sormaya devam ettikçe öğrenir. Ağaç modellerde, hedef parametresi ayrık bir değerler kümesi alacaksa sınıflandırma ağaçları (classification trees), hedef değişkeni sürekli değerler alacaksa regresyon ağaçları (regression trees) olarak adlandırılır. Karar ağaçları, yaygın olarak kullanılan diğer makine öğrenme teknikleri arasında anlaşılır ve basit olarak değerlendirilmektedir [17], [20].

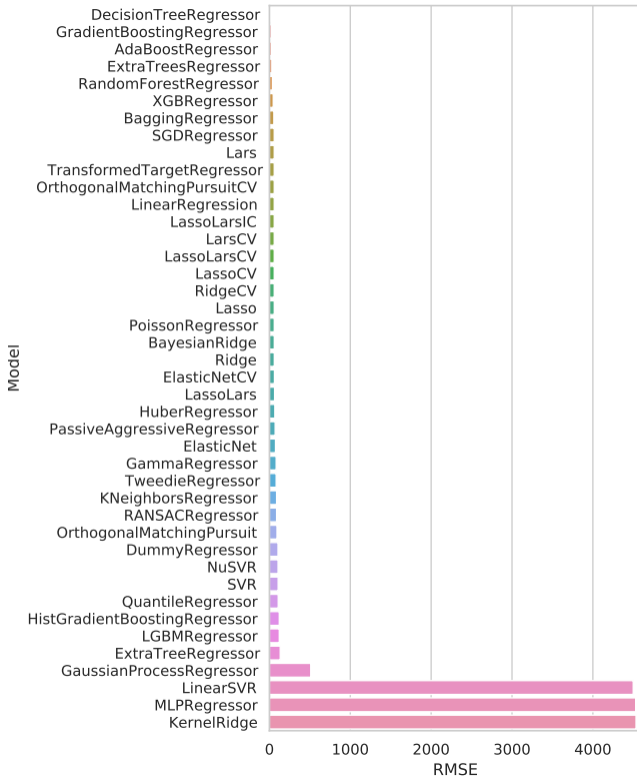


Şekil 3. Niceliksel değişkenler arasındaki korelasyon sonuçları

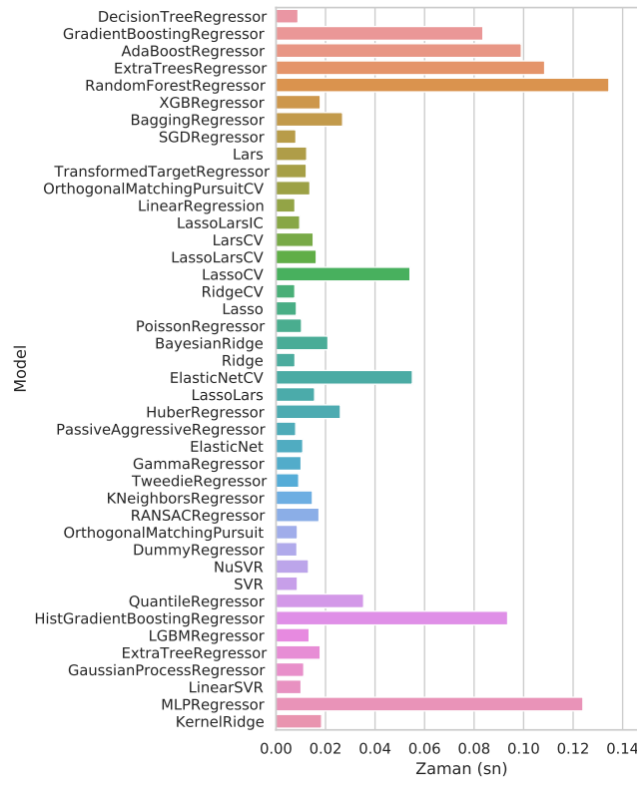
Şekil 3 korelasyon sonuçlarını göstermektedir. Kırmızı renk pozitif, mavi renk ise negatif korelasyon olduğunu göstermektedir. Renk ne kadar koyu olursa korelasyon da o kadar güçlü demektir. Şekle göre akış ile kompresör devri arasında (0.63) pozitif anlamlı bir ilişki olduğu görülmektedir. Şekil 4 model sonuçlarını göstermektedir. Şekle göre (0.99) R^2 değerine göre en iyi sonucu veren model DT algoritması olmuştur. Şekil 5 modellerin RMSE hata değerlerini göstermektedir. DT için RMSE değeri 11.29 olarak bulunmuştur. Şekil 6 model sonuçlarının çalışma zamanlarını göstermektedir. DT 0.01 saniye ile en hızlı regresyon modellerinden biri olmuştur ve bu haliyle oldukça hızlı yanıt veren bir algoritma olduğu söylenebilir.



Şekil 4. Model sonuçlarının R^2 değerleri açısından karşılaştırılması



Şekil 5. Model sonuçlarının RMSE değerleri açısından karşılaştırılması



Şekil 6. Model sonuçlarının zaman kriteri bakımından karşılaştırılması

3 Sonuç

Teknolojik gelişmelere paralel olarak artan enerji ihtiyacını karşılayan önemli enerji kaynaklarından biri olan doğal gazın yer altı tuz mağaralarında depolanması enerji arz ve talebini dengelemenin önemli yollarından biridir. Doğal gaz depolama tesislerinde doğal gaz depolama için kullanılan önemli makinelerden biri olan turbo kompresörlerin çalışma hızını etkileyen faktörlerin doğru bir şekilde modellenmesi ise oldukça karmaşık bir prosese sahip olan doğalgaz depolama tesisleri için önem arz etmektedir.

Bu çalışmada turbo kompresörlerin çalışma hızını etkileyen faktörlerden akış (std m^3/h), hat basıncı ve kuyubaşı basıncının kompresör devrinin tahmininde makine öğrenmesi yöntemleri ile modellemesi gerçekleştirilmiştir. 42 makine öğrenmesi modelinin denendiği çalışmadan elde edilen deneysel sonuçlara göre kompresör devrinin tahmininde DT algoritması 0.99 R^2, 11.29 RMSE ve 0.01 (sn) çalışma zamanı ile en iyi sonucu veren algoritma olmuştur.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %11

Kaynaklar

[1] G. Sagnalıyeva. Değirmenköy yeraltı gaz depolama sahasının modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2016.

[2] Turkey 2021 Energy Policy Review. Erişim: 29 Eylül 2023. Erişim adresi: https://iea.blob.core.windows.net/assets/cc499a7b-b72a-466c-88de-d792a9daff44/Turkey_2021_Energy_Policy_Review.pdf

[3] E. M. Orhan. Designing a system for natural gas storage facilities in salt caverns. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye 2020.

[4] J. Li, X. Shi, C. Yang, Y. Li, T. Wang, ve H. Ma, Mathematical model of salt cavern leaching for gas storage in high-insoluble salt formations. Sci Rep, 8, 1, 1-12, 2018. https://doi.org/10.1038/s41598-017-18546-w

[5] K. Khaledi, E. Mahmoudi, M. Datcheva, ve T. Schanz, Analysis of compressed air storage caverns in rock salt considering thermo-mechanical cyclic loading. Environ Earth Sci, 75, 15, 1-17, 2016. https://doi.org/10.1007/s12665-016-5970-1

[6] T. Wang, X. Yan, H. Yang, X. Yang, T. Jiang, ve S. Zhao, A new shape design method of salt cavern used as underground gas storage. Appl Energy, 104, 50-61, 2013. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.037

[7] Tuzgölü yeraltı doğal gaz depolama tesisi çevresel etki değerlendirme raporu. Erişim: 29 Eylül 2023. Erişim adresi: https://www.botas.gov.tr/uploads/dosyaYoneticisi/214299-1.pdf

[8] The Basics of Underground Natural Gas Storage. Erişim: 29 Eylül 2023. Erişim adresi: https://www.eia.gov/naturalgas/storage/basics/
[9] Turbo Kompresörler. Erişim: 29 Eylül 2023. Erişim adresi: http://joycompressor.com/turbokompresorler.html
[10] R. Kurz ve K. Brun, Assessment of compressors in gas storage applications. J Eng Gas Turbine Power, 132, 6, 2010. DOI: 10.1115/1.4000147
[11] M. T. Schobeiri, Gas turbine design, components and system design ıntegration: Second revised and enhanced edition. Springer Nature, 2019. DOI: 10.1007/978-3-319-58378-5
[12] R. Özgür, Kombine Çevrim santrallerinde performans izleme yöntemleri. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2011.
[13] Q. Wanyan, G. Ding, Y. Zhao, K. Li, J. Deng, ve Y. Zheng, Key technologies for salt-cavern underground gas storage construction and evaluation and their application. Natural Gas Industry *B*, 5, 6, 623-630, 2018. https://doi.org/10.1016/j.ngib.2018.11.011
[14] Lazy Predict. Erişim: 29 Eylül 2023. Erişim adresi: https://pypi.org/project/lazypredict/
[15] A. Di Bucchianico, Coefficient of determination (R^2). Encyclopedia of statistics in quality and reliability, 1, 2008. https://doi.org/10.1002/9780470061572.eqr173
[16] W. Wang ve Y. Lu, Analysis of the mean absolute error (MAE) and the root mean square error (RMSE) in assessing rounding model. IOP Conference series: Materials science and engineering, 2018, 12049. DOI 10.1088/1757-899X/324/1/012049
[17] J. *Hong vd.*, Development and evaluation of the combined machine learning models for the prediction of dam inflow. Water (Basel), 12, 10, 2927, 2020. https://doi.org/10.3390/w12102927
[18] S. Bishnoi ve B. K. Hooda, Decision Tree Algorithms and their Applicability in Agriculture for Classification. Journal of Experimental Agriculture International, 44, 7, 20-27, 2022. DOI: 10.9734/JEAI/2022/v44i730833
[19] X. Zhu, J. Hu, T. Xiao, S. Huang, Y. Wen, ve D. Shang, An interpretable stacking ensemble learning framework based on multi-dimensional data for real-time prediction of drug concentration: The example of olanzapine. Front Pharmacol, 13, 975855, 2022. https://doi.org/10.3389/fphar.2022.975855
[20] Z. H. Kilimci, Ensemble Regression-Based Gold Price (XAU/USD) Prediction. Journal of Emerging Computer Technologies, 2, 1, 7-12.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 041-048

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Microthermometric characteristics of ore forming solutions in Şaphane (Oğuzlar-Çorum) Au mineralization, Turkey

Şaphane (Oğuzlar-Çorum) Au cevherleşmesinin sıvı kapanım özellikleri, Türkiye

Çağlar Kulaman [1], Esra Ünal Çakır [2,*]

[1,2] *Yozgat Bozok University, Department of Geological Engineering, 66100, Yozgat, Türkiye*

Abstract

The study area is located in the Çorum province in the North-Central part of Turkey. In the Çorum region various continental blocks are found together. Devecidağ Complex, Artova Ophiolite Complex, Alacahöyük, Bayat, Kızılırmak, Dodurga and Bozkır formations and Dededağ granitoid and quartz veins are exposed in the vicinity of the study area. Extremely altered volcanic rocks, andesite-basalt-trachyte and tuffs, are observed near the mineralization. The silica veins associated with the mineralization crop out in NE-SW direction southeast of Şaphane village. Pyrite, hematite, limonite, chalcopyrite, galena and gold are the major ore minerals within the quartz veins. Fluid inclusion studies show that hydrothermal solutions contain several salts such as NaCl, $CaCl_2$ and $MgCl_2$, the salinity values (wt.% NaCl) changed between 8% and 0.5% in quartz, from 7.4 and 1.4% in calcite, and the temperature of the ore forming solutions varied between 161 and 395°C. Microthermometric results indicate that the mineralization in the region is associated with quartz veins and formed under epithermal-mesothermal conditions.

Keywords: Çorum, Şaphane, Gold mineralization, Fluid inclusion

Öz

İnceleme alanı Orta-İç Karadeniz bölgesinde Türkiye'nin Kuzey-Orta kesiminde Çorum ilinde bulunmaktadır. Çorum ili, farklı kıtasal blokların birleştiği bir bölgedir. Çalışma alanı yakın çevresinde Devecidağ Karışığı, Artova ofiyolitli karışığı, Alacahöyük, Bayat, Kızılırmak, Dodurga ve Bozkır formasyonlarına ait birimler ile Dededağ granitoyitine ait birimler ve kuvars damarları yüzeylemektedir. Cevherleşmenin yakınında aşırı derecede altere volkanik kayaçlar, andezit-bazalt-trakit ve tüflerin varlığı belirlenmiştir. Cevherleşmenin ilişkili olduğu silis damarları Şaphane köyünün güneydoğusunda KD-GB uzanımlı olarak yüzeyde mostra vermektedir. Kuvars damarlarında cevher minerali olarak pirit, hematit, limonit, kalkopirit, galenit ve altın gözlenmiştir. Sıvı kapanım incelemelerinde hidrotermal çözeltiler içerisinde NaCl, $CaCl_2$ ve $MgCl_2$ gibi tuzların bulunduğu, tuzluluk değerlerinin %NaCl eşdeğeri olarak kuvarslarda %8 ile 0.5 aralığında, kalsitlerde ise %7.4 ile 1.4 aralığında değiştiği, cevher oluşturucu çözeltilerin sıcaklığının ise 161 ile 395°C aralığında değiştiği belirlenmiştir. Mikrotermometrik veriler; yöredeki cevherleşmenin, kuvars damarları ile ilişkili epitermal-mezotermal koşullarda oluşmuş bir cevherleşme olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Çorum, Şaphane, Altın cevherleşmesi, Sıvı kapanım

1 Introduction

The study area is located in the transition zone between the Sakarya continent and the Central Anatolian Crystalline Complex between the Oğuzlar and İskilip districts of Çorum province. In the study area, rocks of the Sakarya Zone, Kırşehir Massif and ophiolitic suture zone are exposed. The Sakarya continent that starts from the Biga peninsula and extends to the Caucasus consists of a complexly deformed, generally metamorphosed, Pre-Jurassic basement and a less deformed, non-metamorphic Jurassic-Tertiary cover. Pre-Tertiary units observed around the study area are İzmir-Ankara-Erzincan suture zone ophiolites that have a sliced structure. These ophiolites and metamorphics separated from the Sakarya zone and a magmatic rock assemblage that intrude the both units are defined as the Kırşehir block [1-3].

The major geologic events in the region mostly occurred during the closure of the Neotethys ocean, and the mineral deposits in Turkey were also formed in association with the collision and magmatism that occurred during this convergence process [4-6]. Turkey hosts a wide range of mineral deposits and, due to the recent mineral exploration works, the Çorum province has become one of the remarkable mining regions in Turkey. There are several Cu-Pb-Zn-Mo-Sb mineralizations around the study area (Soğucak (İskilip-Çorum) Cu-Pb, [7]; Gökçedoğan (Kargı-Çorum) Cu-Zn, [8-9]; Bakırçay (Merzifon-Amasya) Porphyry Cu-Mo, Gümüşhacıköy (Amasya) Pb-Ag-Cu-Zn, [10-11]; Turhal (Tokat) Sb, [12-13] and Başnayayla (Yozgat) Porfiri Cu-Mo, [14]). In this study, the distribution and mineralogical-petrographic characteristics of the lithostratigraphic units outcrop around the Şaphane mineralization and the source and formation conditions of the ore-forming fluids are investigated. The data presented in this paper will provide information on the formation, the regional geological setting and an approach to exploration of such deposits in surrounding areas.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: esra.unal@bozok.edu.tr (E. Ünal-Çakır)
Geliş / Recieved: 14.07.2023 Kabul / Accepted: 18.10.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1327449

2 Geological setting

The Şaphane Au mineralization is located in the central Pontides. In the study area, Devecidağ Complex (Triassic), Artova Ophiolite Complex (Late Cretaceous) and Eocene-Quaternary sedimentary and magmatic rocks are exposed. Cover units in the region start with Eocene Alacahöyük and Bayat formations and continue with Miocene Kızılırmak, Dodurga and Bozkır formations and end with Quaternary alluvium deposits.

The Permo-Triassic Devecidağ Complex is represented by metamorphic schists and meta-volcaniclastic rocks with limestone blocks [15]. The Artova Ophiolite Complex is composed of Upper Cretaceous ophiolitic rocks consisting of serpentinite, peridotite, gabbro, diabase, pillow lava, chert, flysch and blocks of metamorphic rocks. These units are a part of the complex of continental and oceanic crust units that comprise the İzmir-Ankara-Erzincan suture zone [16-17]. The Early Eocene (Ypresian) Alacahöyük formation consists of conglomerate, sandstone, siltstone, shale, marl, mudstone, limestone and sandy limestone [18-19]. The Middle Eocene (Lutetian) Bayat formation, which is widely observed in the region, is composed of conglomerates and shallow marine sediments at the bottom and continues to the top with volcanic-volcanoclastic layers [15, 18]. Bayat volcanics consisting of lava and pyroclastics and the units of sedimentary Çatkara member are widely observed in the vicinity of study area. Although the Bayat volcanics occur in different stages, andesite-basalt-basaltic trachyandesite-trachyandesite and trachyandesite-trachyte type rocks are the major types observed in the study area. In addition, there are several silicified zones within these volcanic rocks [20-21]. The Miocene Kızılırmak formation consists of conglomerate, sandstone, siltstone and claystone layers and it unconformably overlies the older units. The Dodurga formation is composed of clay, marl, siltstone and sandstone and conformably sets above the Kızılırmak formation. The Upper Miocene Bozkır formation consists of gypsum, oolitic limestone, claystone, sandstone, marl and salt and is in lateral and vertical transition with the Kızılırmak formation [18, 22]. Quaternary deposits are composed of recent sediments such as alluvium and talus.

The Dededağ granitoid consists of gabbro, diorite, granite-porphyry, and aplite, and granite-porphyry and diorite-porphyry type rocks are widely observed in the study area. Quartz veins in the region can reach up to 4-meter thick and cut the Bayat volcanics, Çatkara member and diorite porphyry.

Among these units, volcanic units of the Bayat formation, sedimentary units of the Kızılırmak formation and quartz diorite are extensively exposed in the study area (Figure 1).

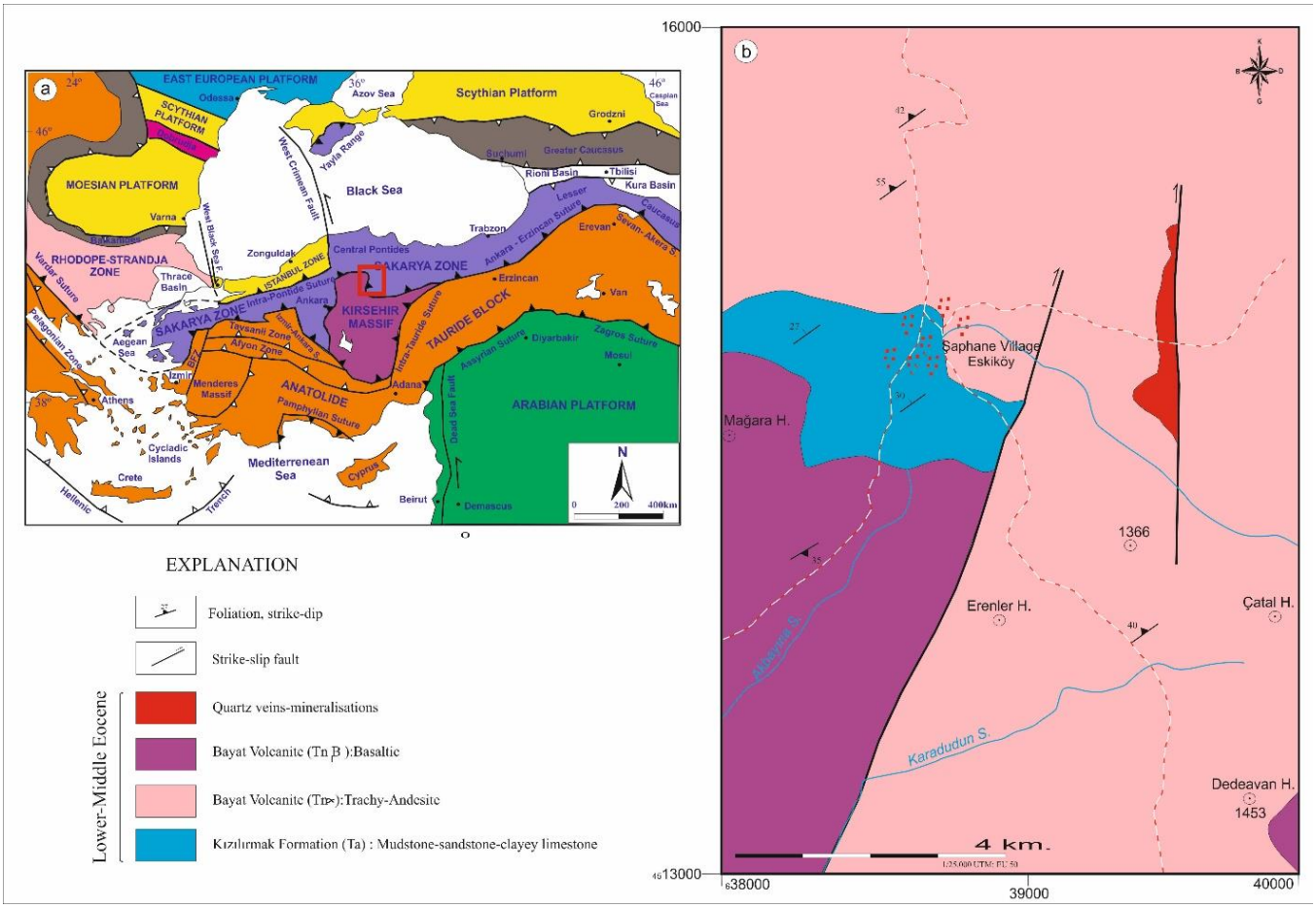


Figure 1. a) Tectonic zones of Turkey from [3], b) Geological map of the study area (modified from [23])

3 Material and method

Samples were taken to represent the studied mineralization from rock exposures, silicified zones associated with mineralization, and from drillings (3 boreholes) conducted by the General Directorate of Mineral Research and Exploration (MTA). Thin sections and polished blocks were prepared from the samples and they were examined with polarizing microscope and ore microscopy techniques. In addition, double-polished sections were prepared for microthermometric measurements such as temperature and salinity of the ore-forming solution.

Fluid inclusion studies were carried out at the Fluid Inclusion Laboratory of Department of Geological Engineering of the Pamukkale University. 7 double-polished sections with a thickness of 100 µm were prepared from gangue minerals in the core samples and silicified zones outcropping in the study area. In the double-polished sections, before the microthermometric measurements the fluid inclusion assemblages (FIA) were determined. The measurements were carried out with Linkam THMS-600 and LNP-95 heating-freezing systems attached to an Olympus Bx51 model polarized microscope. During the microthermometric studies, homogenisation temperature (T_H), the first (T_{FM}) and the last melting (Tm_{ICE}) temperatures were determined. In the measurements, the accuracy is less than ±0.5°C.

4 Results

4.1 Petrographic characteristics of Şaphane Au mineralization

Results of petrographic examination of rock samples from boreholes and surface exposures in the study area yielded that samples are composed of andesite, altered volcanic rock (basalt?) and crystal tuff. Andesites occur in a hypo-crystalline porphyry texture. The matrix is composed of plagioclase phenocrystals and plagioclase microliths in varying size. They are accompanied by clinopyroxene, biotite and opaque minerals (Figure 2a and b). The spaces in matrix is filled with quartz. Basalts near to the mineralization are extremely altered. The rock is quite silicified, argillized and seriticized and shows altered to opaque minerals (Figure 2c).

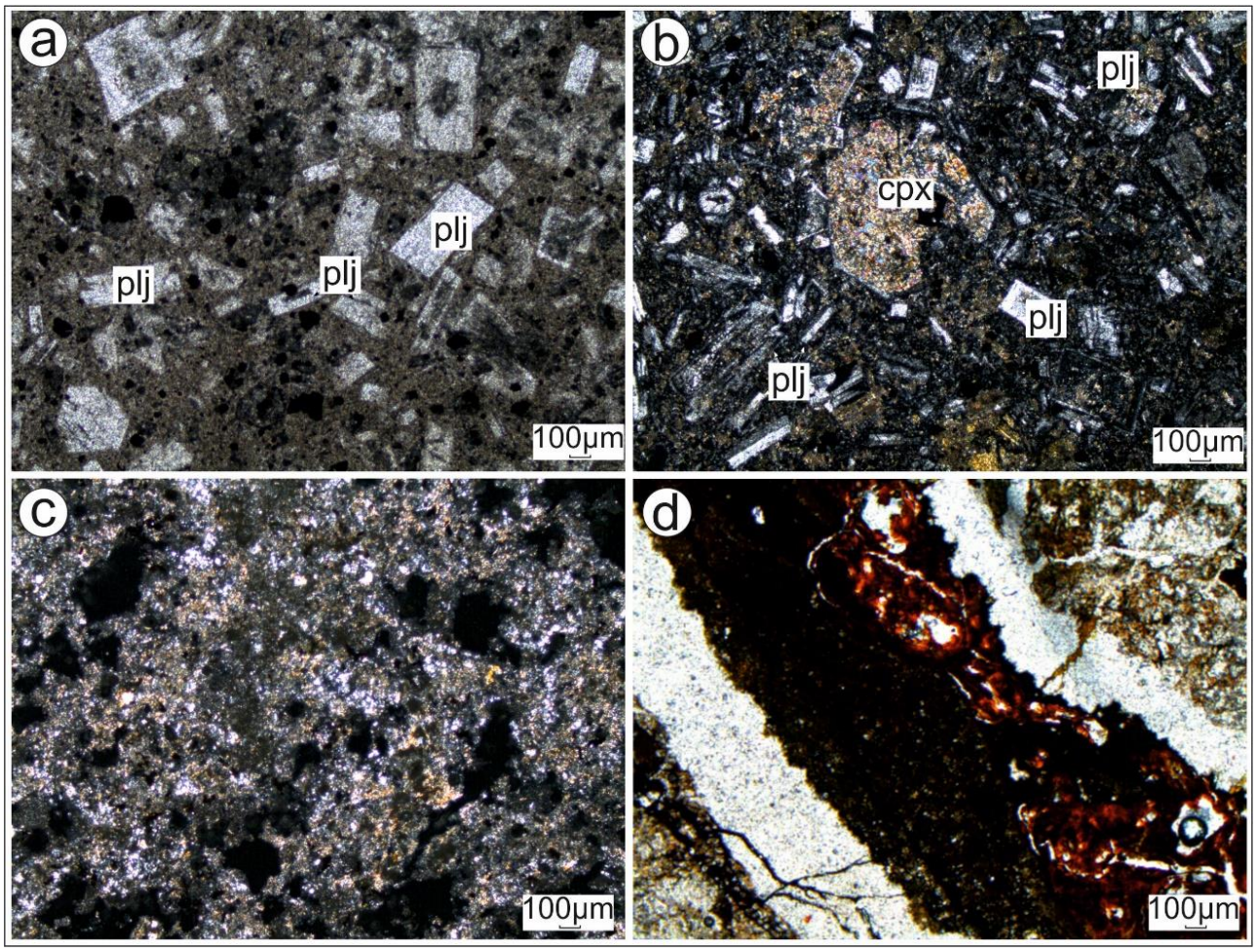


Figure 2. a) and b) General view of andesites (plj: plagioclase, cpx: clinopyroxene, om: opaque mineral); c) General view of altered volcanics; d) iron-oxide solutions within the tuff.

Carbonation and silicification are also common. For tuffs, carbonation, silicification and chloritization are quite common that are accompanied by iron and copper-bearing solutions and hydrothermal secondary veins (Figure 2d).

4.2 *Structural and microscopic properties of mineralization*

There are several stratiform and vein type Cu-Pb-Zn-Fe mineralizations around the Çorum region. The Şaphane mineralization is considered as a polymetallic type deposit. Silica veins associated with the mineralization are exposed nearly 700 m in NE-SW direction at southeast of the Şaphane village (Figure 3).

Basalt-basaltic trachyandesite-trachyandesite-andesite-pyroclastics and trachyandesite-trachyte-pyroclastics of the Bayat volcanics constitute the major rock units in the region. Quartz veins at the surface have strike of N20-40°E and plunge 10°N. The spaces between the quartz veins in the mineralized zone are comprised by quartz veinlets (stockwork zone) of mm-cm thickness that interrupt themselves and the host rock as well. Kuşçu et al. (2017a and b) reported the presence of clay minerals such as quartz, kaolinite, illite and mica/illite in these ore-bearing quartz veins. Intense alteration and stockwork zone are observed in the vicinity of quartz veins. These alteration zones are associated with NE-SW trending gold-bearing hydrothermal veins [24].



Figure 3. Silica veins associated with the mineralization

According to thin section determinations on the quartz vein samples show that they are composed of subhedral-anhedral cryptocrystalline quartz minerals. Cryptocrystalline quartz is widely observed in the matrix of the rock whilst subhedral-anhedral quartzs are found at the margins of the cavities (Figure 4 a). Pyrite, hematite, limonite, chalcopyrite, galena and trace amounts of native gold can be seen in the quartz veins as the ore minerals (Figure 4.b-f). Pyrites are yellow colored, generally fine-grained and observed as euhedral-semihedral crystals. Hematite is observed as bluish gray anhedral-semihedral crystals. Chalcopyrite and galena are observed in the form of anhedral crystals and in small amounts. Gold occurs in trace amounts and have very small grains.

4.3 *Microthermometric determinations*

Fluid inclusion studies were carried out on quartz and calcite crystals collected from boreholes and quartz veins associated with mineralization. Petrographic determination of fluid inclusions on double-polished sections was made considering the criteria given in Van den Kerkhof and Hein [25] and Goldstein [26]. According to fluid inclusion petrography study, LV-type inclusions containing fluid and gas at room temperature and V-type inclusions containing only fluid were detected in quartz and calcite minerals (Figure 5). Fluid inclusions were categorized as primary, secondary and pseudo-secondary. All measurements were made on primary inclusions. In inclusions containing two-phase gas, the gas-liquid ratio was determined as 60-75% gas and 40-25% liquid. The sizes of the inclusions vary between 5-40 μ and they are generally circular, ellipsoidal and mostly irregular in shape. During petrographic investigations, it was determined that quartz and calcite were formed in the late phase. The results of measurement are summarized in Table 1.

First melting temperature (T_{FM}) values ranging from -55.0°C to -43°C were measured in both types of inclusions. Comparison of these measured temperatures with eutectic temperatures of various water-salt systems indicates the presence of NaCl, $CaCl_2$ and $MgCl_2$ salts in the solution (eutectic temperatures are -55.0 or -52.0°C for the H_2O-NaCl-$CaCl_2$ system, -52.2°C for the H_2O-$MgCl_2$-$CaCl_2$ system and -49.5°C for the H_2O-$CaCl_2$ system; from Shepherd et al. [27]).

The statistical distribution of the final ice melting temperature (Tm_{ICE}) values measured in fluid inclusions is shown in Figure 6. The final ice melting temperatures measured in quartz crystals vary from -5,2°C to -0,3°C (average -1,5 °C) and those measured in calcite crystals are from -4,7 °C to -0,8°C (average -2,3°C). Using these final ice melting temperatures salinity values were estimated (wt.% NaCl) [28] which vary from 8 to 0,5% (n =57, ave. = 2,5%) for inclusions in quartz crystals and from 7,4 to 1,4% (n =11, ave. = 3,8%) for inclusions in calcite crystals.

The statistical distribution of homogenization temperatures (T_H) measured in inclusions trapped within quartz and calcite crystals is shown in Figure 7. T_H values measured in quartz crystals are from 161 to 395 °C (n = 54, ave. = 238 °C) and those in calcite crystals range from 165 to 312°C (n= 11, ave.= 228 °C). Examination of salinity vs homogenization temperature relation in fluid inclusions reveals that samples have homogenization temperatures of 200 to 260°C and salinity of 1 to 5% (wt.% NaCl)

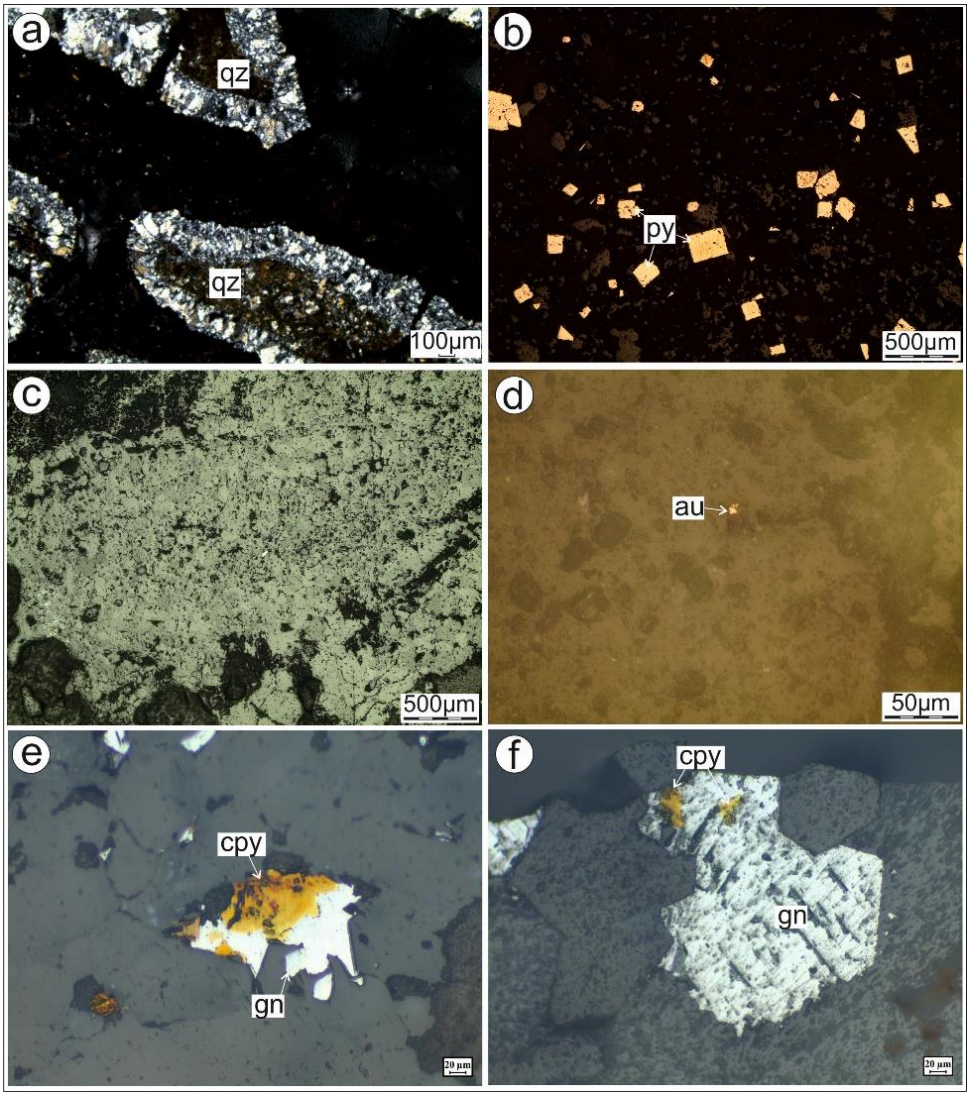


Figure 4. a) Quartz filling along the edges (plj: plagioclase, qz: quartz); b) euhedral pyrite crystals (py: pyrite) within quartz veins; c) hematite crystals within quartz veins; d) gold crystal in quartz veins (au: gold); e) and f) anhedral chalcopyrite and galena cyrstals

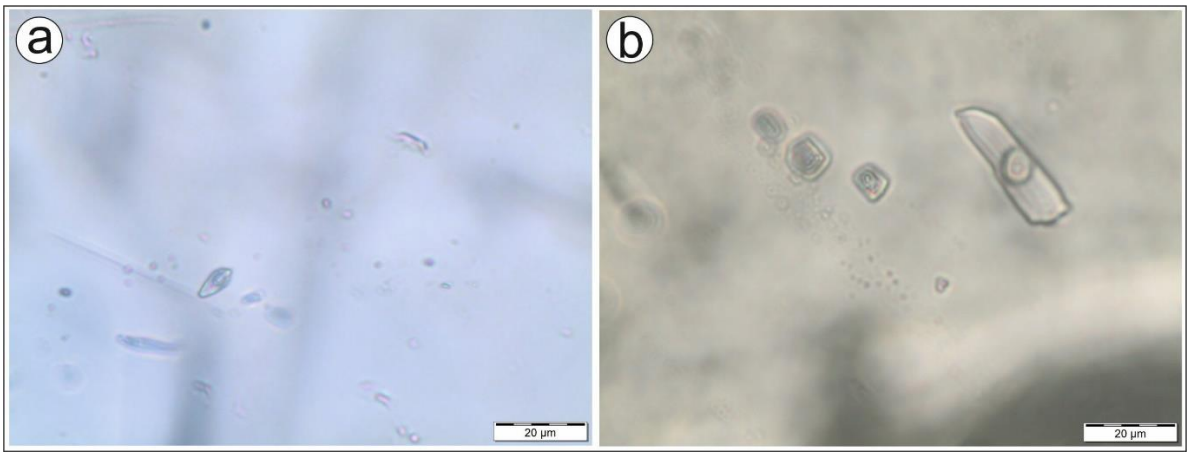


Figure 5. Primary inclusion in calcite (a) and quartz (b) crystals

Table 1. Results of measurements on fluid inclusions in quartz and calcite crystals from the Çorum-Şaphane mineralization.

Sample No	Mineral	Last ice-melting temperature (Tm_{ICE})		Homogenisation temperature (T_H)	
		Range	Average	Range	Average
ÇŞK-1	Calcite	-2.5 to -2.0 (2)	-2.3	180 – 312 (2)	246
ÇŞK-2	Quartz	-3.0 to -2.3 (4)	-2.7	202 – 217 (3)	210
ÇŞK-5	Calcite	-4.7 to -2.1 (3)	-3.2	165 – 200 (3)	185
ÇŞK-6	Quartz	-2.4 to -1.0 (8)	-1.8	200 – 355 (7)	265
ÇŞK-7	Calcite	-2.4 to -0.8 (6)	-1.8	215 – 295 (6)	244
ÇŞK-10	Quartz	-3.5 to +0.8 (19)	-1.6	161- 230 (19)	209
ÇŞK-13	Quartz	-7.2 to -0.3 (25)	-1.2	210 – 395 (25)	255

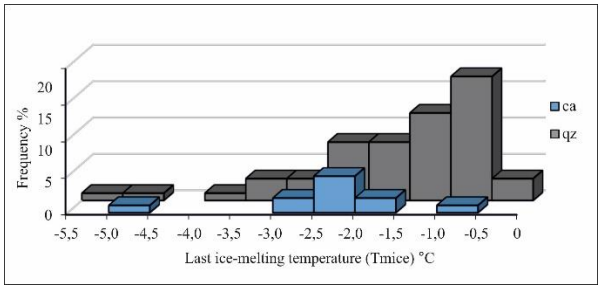


Figure 6. Statistical distribution of last ice-melting temperature in the primary fluid inclusions in quartz and calcite crystals.

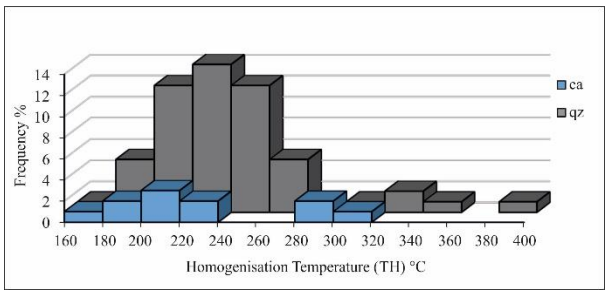


Figure 7. Statistical distribution of Homogenisation temperature (TH) in the primary fluid inclusions in quartz and calcite crystals.

Although it is generally accepted that the presence of salts such as CaCl and $MgCl_2$ in the solution indicates that hydrothermal solutions are directly or indirectly related to seawater or circulate within marine deposits, they may also have been affected by ophiolitic rocks that formed on the surrounding ocean floors and came into contact with seawater and Eocene aged volcanosedimentary rocks that were realized in marine environments.

According to the % NaCl salinity values with corresponding Tm_{ICE} data, the salinity of calcites does not change much but salinity of quartz varies in a wider range. However, this interval cannot be explained as a change in the salt composition of the hydrothermal solution.

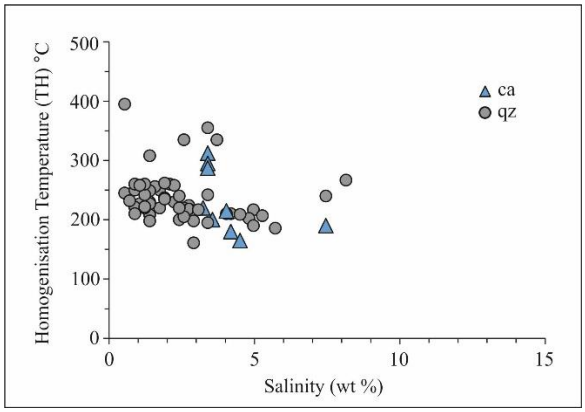


Figure 8. Distribution of salinity-homogenisation temperature measured in fluid inclusions of calcite and quartz crystals

TH values vary in a wide range, and it can be considered that two separate solutions with an average temperatures of 230°C and 330°C are operative in the system. Microthermometric studies show that mineralization occurred under epithermal-mesothermal conditions.

Comparison of homogenisation temperature and salinity values of the Şaphane mineralization with the data from various deposit types in the world yields that the studied deposit can be considered as an epithermal deposit (Figure 9).

5 Conclusions

The Şaphane gold mineralization is located in the Çorum province in the Middle-Inner Black Sea region. Devecidağ Complex, Artova Ophiolite Complex, Alacahöyük, Bayat, Kızılırmak, Dodurga and Bozkır formations and Dededağ granitoid and quartz veins crop out in the region. The mineralization is associated with quartz

veins within extremely altered volcanic rocks and these veins trend in NE-SW and are exposed nearly 700 m.

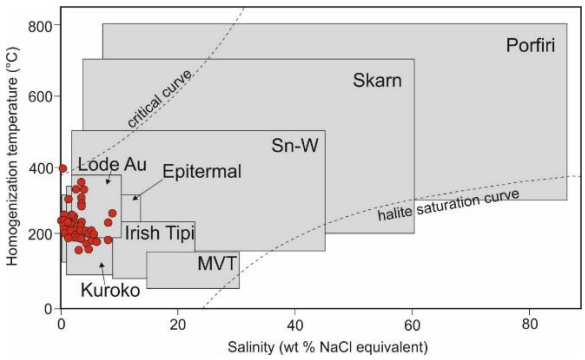


Figure 9. Comparison of salinity vs homogenisation temperatures of calcite and quartz crystals with other deposits [29].

From the petrographic studies of the samples taken from the quartz veins, pyrite, hematite, limonite, chalcopyrite, galena and trace amounts of native gold were found as the ore minerals and quartz and calcite are defined as the gangue minerals.

The first melting temperature measurements in the fluid inclusion indicated the presence of salts in the hydrothermal solution such as NaCl, $CaCl_2$ and $MgCl_2$. The salinity values calculated using the last ice melting temperature values vary between 8.0 and 0.5% in quartz and between 7.4 and 1.4% in calcites (wt. %NaCl equivalents). The average homogenization temperatures are 238°C in quartz and 228°C in calcite. In addition, TH values vary in a wide range, and it can be considered that two different solutions with average temperatures of 230 °C and 330 °C are effective in the system.

As a result, it has been determined that the mineralization in Şaphane is associated with quartz veins and formed at epithermal-mesothermal conditions between 161 and 395°C.

Acknowledgements

This study is a part of Master Thesis of the first author. The study was financially supported by the Yozgat Bozok University under grant no. 6601a-FBE/21-449. We thank for the editors and anonymous reviewers for their helpful comments.

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): 6%

References

[1] A.M.C. Şengör and Y. Yılmaz, Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach. Teconophysics, 75, 181-241, 1981. https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90275-4

[2] N. Görür ve A.M.C. Şengör, İç Anadolu Havzalarının Jeolojisi, Tübitak, Türkiye Birinci Jeotravers Projesi, 1. Workshop, 1986.

[3] A.İ. Okay and O. Tüysüz, Tethyan sutures of northern Turkey. In: Durand, B., Jolivet, L., Horvath, F. and Seranne, M. (eds). The Mediterranean Basin: Tertiary Extension with the Alpine Orogen, Geological Society, London, Special Publications, 156, 475-515, 1999. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.156.01.22

[4] J.P. Richards, Post - subduction porphyry Cu – Au and epithermal Au deposits: products of remelting of subduction -modified lithosphere. Geology, 37, 247-250, 2009. https://doi.org/10.1130/G25451A.1

[5] İ. Kuşcu, R.M. Tosdal and G. Gencalioğlu Kuşcu, Episodic porphyry (Cu - Mo - Au) formation and associated magmatic evolution in Turkish Tethyan collage. Ore Geology Reviews, 107, 119-154, 2019. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.005

[6] R. Sarı, Ş. Küçükefe, G. Bozkaya, Ö. Bozkaya, F. Bademler, Z. Deveci Aral, E.D. Bayrakçıoğlu, C. Dönmez and S. Özkümüş, Geological, mineralogical-petrographical and fluid-inclusion characteristics of the Çatalçam (Soma-Manisa) Au-Pb-Zn-Cu Mineralization. Bulletin of the Mineral Research and Exploration, 167, 25-49, 2022. https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.930094

[7] E. Demiryürek, Soğucak (İskilip-Çorum) Cu-Pb-Zn cevherleşmeleri ve kökeni. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 2006.

[8] C. Yalçın, Gökçedoğan (Kargı-Çorum) Cu Zn cevherleşmesinin jeolojisi ve oluşumu. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 2018.

[9] C. Yalçın, N. Hanilçi, M. Kumral, and M. Kaya, Formation and tectonic evolution of structural slices in Eastern Kargi Massif (Çorum,Turkey). Bulletin of the Mineral Research and Exploration, 169, 135-154, 2022. https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.1067604

[10] G. Bozkaya, A. Gökce, and A. Efe, Gümüşhacıköy (Amasya) Pb-Zn-Ag yataklarının jeolojisi. Cumhuriyet Üniversitesi Yerbilimleri Dergisi, 73–89, 1996.

[11] A. Gökce ve G. Bozkaya, Gümüşhacıköy (Amasya) Pb-Zn yatakları çevresinde derekumu örnekleri jeokimyası incelemeleri. Geosound, 33:75–90, 1998.

[12] A. Gökce and B. Spiro, Sulfur isotope study of source and deposits of Stibnite in the Turhal Area. Mineralium Deposita, 26, 30-33, 1991.

[13] A. Gökce and B. Spiro, Stable isotope (O, H and C) studies and the origin of the mineralising fluid ın the vein type Antimony deposits ın the Turhal Area, Turkey. Turkish Journal of Earth Sciences, 5/1, 39-44, 1995.

[14] E. Kuşcu, ve Y. Genç, Başnayayla (Yozgat) Molibden-Bakır cevherleşmesi. Türkiye Jeoloji Bülteni, 42:115–134, 1999.

[15] Ş. Genç, Z. Kurt, Ö. Küçümen, F. Cevher, G. Saraç, Ş. Acar, C. Bilgi, M. Şenay ve N. Poyraz, Merzifon

(Amasya) Dolayının Jeolojisi. MTA Rapor No: 9527, Ankara, 1991.
[16] A. Özcan, A. Erkan, A. Keskin, A. Oral, S. Özer, M. Sümenge ve O. Tekeli, Kuzey Anadolu Fayı ile Kirşi Masifi Arasında Kalan Alanın Temel Jeolojisi. MTA Rapor No: 6722, Ankara, 1980.
[17] Y. Yılmaz ve O. Tüysüz, Kastamonu-Boyabat-Vezirköprü-Tosya Arasındaki Bölgenin Jeolojisi (Ilgın-Kargı Masiflerinin Etüdü). MTA Rapor No: 257, Ankara, 1984.
[18] Ş. Birgili, R. Yoldaş ve G. Ünalan, Çankırı-Çorum Havzasının Jeolojisi ve Petrol Olanakları. MTA Rapor No: 5621, Ankara, 1975.
[19] L. Karadenizli, Çankırı-Çorum Havzasındaki Orta Eosen-Erken Miyosen Tortullarının Sedimantolojisi. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara, 1999.
[20] E. Kuşcu, V. Urkan ve Y. Çelik, Şaphane (Eskiköy)-Çiğdemlik (Oğuzlar/Çorum) Ruhsatı (Ar:201300657) Maden Jeolojisi Final Raporu. MTA Rapor No: 13601, Ankara, 2017.
[21] E. Kuşcu, V. Urkan ve Y. Çelik, Şaphane (Eskiköy)-Çiğdemlik (Oğuzlar-Çorum) ruhsatının maden jeolojisi. Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni, 24:21–26, 2017.
[22] Y. Hakyemez, M.Y. Barkut, E. Bilginer, Ş. Pehlivan, B. Can, Z. Dağer ve B. Sözeri, Yapraklı-Ilgaz-Çankırı-Çandır Dolayının Jeolojisi. MTA Rapor No: 7966, Ankara, 1986.
[23] Ç. Kulaman, Şaphane (Oğuzlar-Çorum) Au cevherleşmesinde sıvı kapanım incelemeleri. Yüksek Lisans Tezi. Yozgat Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yozgat, 2022.
[24] O. Canbaz ve E. Ünal-Çakır, Şaphane (Çorum) Damar Tipi Altın (Au) Cevherleşmesinde Multispektral Uydu Görüntüleri Kullanılarak Hidrotermal Alterasyon Mineral Haritalaması ve Çizgisellik Analizi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 25(3), 313-328, 2022. https://doi.org/10.17780/ksujes.1112817
[25] A.E. Van den Kerkhof and U.F. Hein, Fluid Inclusion Petrography. Lithos, 55(1), 27-47, 2001. https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00037-2
[26] R.E. Goldstein, Petrographic Analysis of Fluid Inclusions. Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation. in: I. Samson, A. Anderson and D. Marshall (Eds.), Mineralogical Association of Canada, pp. 9- 53, 2003.
[27] T.J. Shepherd, A.H. Rankın and D.H.M. Alderton, A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies. Blackie-Glasgow, 1985.
[28] R.J. Bodnar, Revised Equation and Table for Determining The Freezing Point Depression of H_2O-NaCl Solutions. Geochimica et Cosmochimica Acta, 57, 683-684, 1993. https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90378-A
[29] J.J. Willkinson, Fluid Inclusions in Hyrdrotermal Ore Deposits. Lithos, 55 229 – 272, 2001. https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 049-059
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
Araştırma makalesi / Research article
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Depresyonda motor aktivitenin makine öğrenmesi ile değerlendirilmesi

Evaluation of motor activity in depression with machine learning

Selim Aras[1,*], Neriman Aras[2], M. Alptekin Engin[3]

[1] *Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 55139, Samsun Türkiye*
[2] *Samsun Ruh Sağlığı ve Hastalıkları Hastanesi, Psikiyatri Bölümü, 55040, Samsun Türkiye*
[3] *Bayburt Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 69000, Bayburt, Türkiye*

Öz

Psikiyatrik hastalıkların neredeyse tümünde olduğu gibi depresyonun da klinik olarak değerlendirilmesi gözleme ve subjektif hasta şikâyetlerine dayanmaktadır. Psikomotor retardasyon (gerileme) depresyonun önde gelen semptomlarından biridir ve bunun göstergesi olarak depresyonlu hastalarda fiziksel aktivite azalır. Bu çalışmada, depresyonu olan ve olmayan bireylerin günlük fiziksel aktivite verileri ile oluşturulmuş bir veri setini referans olarak kullanarak, depresyon tanısı için makine öğrenimi temelli objektif bir tanı destekleyici yöntem geliştirmek amaçlanmıştır. Geniş bir öznitelik araştırması yapıldıktan sonra, Fisher Öznitelik Seçimi ile en iyi dört öznitelik belirlenmiş ve Toplu Torbalı Ağaç yöntemini kullanarak 0,88 doğruluk ile referans çalışmasından daha iyi bir sınıflandırma sonucu elde edilmiştir. Ayrıca, referans çalışma ile karşılaştırmak için sınırlandırılan dört öznitelikten daha fazlası seçildiğinde doğruluğun 0,90'nın üzerine çıktığı belirlenmiştir. Böylece, fiziksel aktivite verilerini kullanarak geliştirilen makine öğrenimi temelli yöntemle depresyonu olan ve olmayan bireyleri yüksek doğruluk payı ile ayırt edilmesi başarılmıştır. Bu çalışma, aktivite verilerinin depresyonda tanı destekleyici bir araç olarak kullanılabileceğine dair umut verici sonuçlar ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar, fiziksel aktivite gibi farklı biyobelirteçlerin de makine öğrenimi ile birlikte kullanıldığında, psikiyatrik değerlendirmedeki objektif tanı destekleyici kriterlerin eksikliğini giderebilecek potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Makine öğrenmesi; Öznitelik, Depresyon; Fiziksel aktivite; Psikomotor retardasyon

Abstract

The clinical assessment of depression is based on observation and subjective patient complaints of almost all psychiatric disorders. Psychomotor retardation is one of the leading symptoms of depression, and as an indicator of this, physical activity is reduced in depressed patients. In this study, we aimed to develop a machine learning-based objective diagnostic support method for diagnosing depression using a dataset of daily physical activity data of individuals with and without depression as a reference. After detailed feature searches, we identified the four best features by Fisher Feature Selection. Using the Ensemble Bagged Tree method, we achieved a better classification result than the reference study, with an accuracy of 0.88. In addition, we found that the accuracy exceeded 0.90 when more than the four features we limited to compare with the reference study were selected. Thus, we could distinguish between individuals with and without depression with high accuracy with the machine learning-based method, which we developed using physical activity data. This study has shown promising results that activity data can be used as a diagnostic tool for depression. Our results show that different biomarkers, such as physical activity, when used with machine learning, can potentially overcome the lack of objective diagnostic support criteria in psychiatric evaluation.

Keywords: Machine learning; feature; depression; physical activity; psychomotor retardation

1 Giriş

Dünya Sağlık Örgütü'ne göre depresyon tüm dünyada 300 milyondan fazla kişiyi etkileyen ciddi ve yaygın bir ruhsal bozukluktur [1]. Depresyon, depresif duygudurum, anhedonia (hayattan zevk alamama), ilgi-istek azalması, iştah ve uyku değişiklikleri, psikomotor yavaşlama ya da ajitasyon, enerji azalması, yorgunluk, konsantrasyon güçlüğü gibi belirtilerle seyreder, günlük hayatı etkiler ve kişinin işlevselliğinde bozulmaya yol açar [2]. Depresyon kliniğinde depresif duygudurum ön planda olsa da enerji azalması, isteksizlik, yorgunluk ve eşlik eden psikomotor retardasyon, gündelik aktivitelerin yerine getirilmesini zorlaştırır. Bu nedenle depresyon tüm dünyada yetiyitiminin (bireyin ruhsal veya genel tıbbi hastalığı nedeniyle genel yaşamsal işlevlerinde aksama) önde gelen nedenlerinden biridir [3, 4]. Depresyonun 2030 yılına kadar bir numaralı küresel hastalık yükü haline geleceği tahmin edilmektedir [5].

Psikomotor retardasyon (gerileme), depresyondan etkilenen kişinin emosyonel davranışlarını etkilemesinin yanında fiziksel hareketi de azaltır [6]. Depresyonda psikomotor retardasyon, konuşma, yüz ifadesi, duruş, hareketlerin hızı ve kapsamını içerir [7]. Psikomotor retardasyon, depresyonun şiddeti ve bipolarite ile ilişkilidir

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: selim.aras@omu.edu.tr (S. Aras)
Geliş / Recieved: 28.08.2023 Kabul / Accepted: 18.10.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1351103

[8]. Psikomotor retardasyonu fazla olan hastalarda daha erken depresyon başlangıç yaşı, daha uzun hastalık süresi, depresif atakların daha sık, yaşam boyu suisidal girişim sıklığının daha yüksek ve ailede psikiyatrik hastalık öyküsünün daha fazla olduğu bildirilmektedir [8]. Ayrıca psikomotor retardasyon antidepresanlara yanıt ile de ilişkilidir [9]. Psikomotor retardasyon varlığı depresyon alt tiplerinin (psikotik özellikli olan ve olmayan, melankolik depresyon, bipolar depresyon gibi) belirlenmesini sağlayabildiği belirtilmektedir [10].

Major depresyonda görülen psikomotor retardasyon beyin yapısı ve işlevinde değişikliklerle ilişkilidir. Psikomotor retardasyon ile beyin yapısı veya işlevi arasındaki ilişkileri araştıran araştırmaların sonuçları prefrontal beyin bölgelerine lokalize olmuştur. Depresyonlu bireylerde motor aktivite, prefrontal korteks motor devrelerindeki beyaz cevher bütünlüğü ile ilişkilidir. Beyin görüntüleme çalışmalarında, psikomotor retardasyonun beynin davranışla ilişkili bölgeleri olan dorsolateral prefrontal korteks, anterior singulat korteks, orbitofrontal korteks, suplementer motor alan ve bazal ganglionlar ile ilişki olduğu bildirilmektedir [9].

İleri görüntüleme tekniklerinden olan difüzyon tensör görüntüleme çalışmalarında depresyonlu hastalarda gösterilen beyaz cevher mikro değişikliklerinin depresyonda motor planlamanın bozulması ve yürümenin yavaşlaması gibi motor davranışlarla ilişkili olduğu bildirilmiştir. Depresyonlu hastalarda fiziksel aktivitede azalma ve yürüyüşte yavaşlama olduğu gösterilmiştir [9]. İnce ve kaba motor aktivitede gecikme, depresyonda önemli bir semptomdur. Bu durum kaudat çekirdek ve putamende dopamin azalması ile ilişkilidir [9]. Hickie ve ark. nörogörüntüleme çalışmalarında kaudat çekirdek bölgesel serebral kan akışı yüzdesinin psikomotor yavaşlama ve beyaz cevher lezyonlarıyla ilişkili olduğunu bildirmiştir [11]. Depresyonda DTI ve 24 saatlik aktigrafi verilerini inceleyen bir çalışmada, majör depresyonda kortiko-kortikal beyaz cevher motor yollarında yapısal değişiklikler olduğu ve bunun depresyonda hareketin başlatılması ile ilişkili olduğu saptanmıştır [9].

Psikiyatrik hastalıkların tamamında olduğu gibi depresyon tanısı da altta yatan nedenlerden bağımsız olarak gözlem ve subjektif hasta şikâyetlerine dayanılarak belirlenir ve takip edilir. Aynı semptomun klinik görünümü hastadan hastaya çok farklı olabilmektedir. Tanı koydurucu herhangi bir tetkik ya da görüntüleme yöntemi henüz mevcut değildir. Klinik ölçekler sadece öngörülen tanıyı destekleyici olarak kullanılabilmektedir, ancak tanı koydurucu özellikleri yoktur. Ayrıca kullanılan ölçekler farklı uygulayıcılar tarafından farklı skorlanabilmektedir.

Psikomotor retardasyonun izlenmesi, majör depresyonda depresyonun şiddetinin belirlenmesinde ve tedavi seyrinin takibinde tanısal, prognostik ve klinik öneme sahiptir [8,10]. Ancak psikomotor retardasyon tipik olarak gözlemlenebilen belirti ve semptomlara dayanan ve görüşmeci tarafından derecelendirilen ölçeklerle değerlendirilmektedir [8]. Bu nedenle depresyonda yapılabilecek objektif psikomotor değerlendirmeler, depresyonun şiddetinin belirlenmesi, sınıflandırma ve tedavi sürecinin izlenmesinde faydalı olabilir [1].

Depresyon için kullanılabilecek objektif psikomotor değerlendirmelerden biri ses ve konuşma analizidir. Depresyonla ilişkili nörofizyolojik değişikliklerin laringeal dinamikleri etkilemesi nedeniyle konuşmada negatif içerik, yavaşlama, ritm ve ton değişiklikleri gözlemlenebilir [12,13]. Makine öğreniminin son yıllarda verimi artan teknikleri sayesinde [14-16] gibi konuşma verisi ile depresyon analizi çalışmaları hız kazanmıştır.

Ruhsal hastalıkların teşhisinde potansiyel bir biyobelirteç olarak kabul edilen bir diğer objektif yöntem olan göz hareketlerinin izlenmesi ve analizi, depresyonda dikkat, odaklanma ve duygusal tepkilerle ilişkilendirilebilir [17,18]. Bu nedenle göz hareketlerinin takibi de objektif psikomotor değerlendirme olarak kullanılabilir. Nitekim depresyonlu hastaların anormal göz hareketlerinin araştırıldığı bir çalışmada, Gao depresif hastalar ve sağlıklı kontroller arasındaki göz hareketlerindeki farklılıkları karşılaştırmak için prosaccade ve antisakkade görevleri kullanılmış ve elde edilen sonuçlar, depresif hastaların, depresif olmayan kontrollerle karşılaştırıldığında farklı göz hareketlerine sahip olduğunu kanıtlamıştır [19].

Depresyonda refleks ve koordinasyon değişikliklerinin yanında, görsel ve işitsel uyaranlara verilen tepkilerin ölçümlerindeki değişiklikler de objektif değerlendirme parametresi olarak kullanılabilir. Kangas, çalışmasında depresif bozukluğu olan hastaları ve depresif olmayan kontrolleri ayırmada işitsel olayla ilgili potansiyelleri inceleyen ayrıntılı bir meta analiz çalışması sunmuştur [20].

Bilişsel testler, depresyon hastalarının bilişsel işlev değişikliklerinin belirlenmesinde objektif bir ölçüm parametresi olarak kullanılabilir. Li, depresyon hastalarında bilişsel bozukluğun tanımlanması, eğitimi ve değerlendirilmesi sürecini araştırdığı hafif ila orta şiddette depresyonu olan deneklerle ortaya koyduğu çalışmasında VR teknolojisine dayalı bilişsel işlev eğitimi ve tedavisinin depresif hastaların bilişsel düzeyini etkili bir şekilde iyileştirebileceğini göstermiştir [21].

Depresyonda kortizol düzeyi, uyku düzeni gibi biyolojik belirteçler objektif değerlendirme imkânı sunabilir. Baek, orta yaşlı yetişkinlerde kısa süreli uyku kısıtlamasının öznel parametreler (uykululuk, stres, yorgunluk) ve kortizolün de yer aldığı fizyolojik parametreler üzerindeki etkilerini, bu parametrelerin dinlenme sonrası iyileşme durumunu ve parametreler arasındaki ilişkiler araştırılmıştır [22]. Sonuç olarak, kısa süreli uyku kısıtlamasının bile orta yaşlı yetişkinlerde psikolojik ve fizyolojik stres parametreleri üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olabileceğini ve bunları normal seviyelere getirmek için yeterli dinlenme ve uykunun gerekli olduğunu göstermiştir.

Bu çalışmadaki veri setini oluşturan hareketlilik ve fiziksel aktivite ölçümleri de depresyonun objektif psikomotor değerlendirmesinde kullanılabilecek önemli parametrelerden biridir.

Choi vd. ivmeölçer tabanlı aktigrafi verilerinden çıkarılan on dört sirkadiyen ritim özelliğini kullanmış, seçtiği dört sınıflandırma algoritması içinden XGBoost sınıflandırıcının depresyon seviyelerini sınıflandırmada daha

başarılı bir sonuç elde ettiğini göstermiştir [23]. Yapılan çalışma hem depresyonun tanımlanması hem de aktigrafi verilerinin uygulanması açısından depresyon ve fiziksel aktivite arasındaki ilişkiye yeni bir bakış açısı getirmiştir.

Kim vd., majör depresif bozukluğu (MDB) olan hastalarda ve sağlıklı bireylerde psiko-davranışsal korelasyonları, özellikle de anlık depresif ruh hali ile nesnel olarak ölçülen davranış dinamikleri arasındaki istatistiksel ilişkileri araştırmıştır [24]. Lokomotor adı verilen bir cihaz ile günlük yaşamdaki spontan fiziksel aktivite sürekli olarak ölçülmüştür. Sonuçların, fiziksel aktivite örüntüsüne dayalı olarak anlık depresif ruh halini objektif olarak tahmin etmenin istatistiksel bir model kullanarak mümkün olabileceği; böylece MDB'nin patojenik süreçlerinin ve patolojik durumlarının sürekli izlenmesini sağlayabileceği bildirilmiştir.

Abbas vd. [25], apatik depresyonu olan ve olmayan ileri yaş erişkinleri belirlemek için bileğe takılan bir aktivite monitöründen alınan fiziksel aktivite verilerini kullanmıştır. Zamana bağlı olarak elde edilen verilerden önişleme sonrası altı adet öznitelik çıkarılmıştır. Önerilen özellikler, sigmoidal fonksiyon kullanılarak doğrusal olmayan bir dönüşümden ve temel bileşenler analizi (PCA) ile ortogonal bir dönüşümden geçtikten sonra, öznitelikleri ilişkisiz değişkenlere dönüştürerek, apatik bireyleri, diğer deneklerden oldukça kabul edilebilir bir doğrulukla ayırabilmiştir.

Thelagathoti [26], "Depresjon" veri setini [27] kullandığı çalışmasında ilk adımda, her bir birey çifti arasındaki çift yönlü korelasyon değerlerini ölçerek temsili korelasyon ağı modeli oluşturan bir grafik modeli içeren hesaplama modeli sunmuştur. Ardından, oluşturulan ağın grafik özelliklerini kullanarak her bir katılımcının depresyon şiddet indeksini elde etmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen korelasyon ağı modelinin depresyon tanısı konulan katılımcıları kontrol grubundan ayırt etme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Aynı veri setini kullanan Raihan, Rastgele Orman, AdaBoost ve Yapay Sinir Ağı gibi makine öğrenimi algoritmalarını kullandığı çalışmasında ilgili veri setini ham ve sentezlenmiş şekilde üç farklı şekilde kullanmıştır [28]. Bu çalışma demografik bilgilerle birleştirilen motor aktivite sensörü verilerinin depresyonu tahmin etmede kullanılabileceğini göstermiştir. Benzer şekilde aynı veri setini kullanan bir diğer çalışmada, aktivite verisi özellikleri, değişken uzunluğa sahip kısa dönem bellek yöntemi kullanılarak çıkarılmış ve Destek Vektör Makinesi yöntemi ile temel derin öğrenme algoritmalarına kıyasla üstün performans elde edilebileceği belirtilmiştir [29]. Aynı veri setini kullanan bir diğer çalışmada ise düzgün manifold yaklaşımı ve projeksiyon tabanlı özellik çıkarma ve sinir ağı sınıflandırıcısının kullanıldığı bir yöntem önerilmiş, bu yöntemin internet üzerinden tıbbi cihazlar yardımıyla depresyonu tespit edilebileceği bir yöntem olduğunun üzerinde durmuştur [30].

Bu çalışmada, depresyon grubu ve kontrol grubunda olan bireylerden giyilebilir bir aktigraftan alınan fiziksel aktivite verileri kullanılarak oluşturulan "Depresjon" veri seti [27] kullanılmıştır. Zamana bağlı olarak kaydedilen fiziksel aktivite verilerini ayrıştırabilecek zaman bölgesi için uygun 11 adet özniteliğin (karekök ortalama, ortalama mutlak değer, varyans, dalga formu uzunluğu, basit kare integrali, standart sapma, aritmetik ortalama, minimum ve maksimum değer, çarpıklık, basıklık) araştırılması yapılmıştır. Etkin özniteliklerin belirlenmesi için 6 farklı filtre tipi öznitelik seçim yöntemi (sonsuz gizli, sonsuz, relief-f, karşılıklı bilgi, fisher ve korelasyon tabanlı) kullanılarak 8 farklı makine öğrenmesi tabanlı sınıflandırıcılar (k-en yakın komşuluk, toplu torbalı ağaç, karar ağacı, geniş yapay sinir ağları, naive bayes, doğrusal ve radyal tabanlı destek vektör makineleri, karesel diskriminant analizi) aracılığı ile ayrıntılı bir yöntem geliştirme araştırılması yapılmıştır. Fisher öznitelik seçim algoritmasının belirlediği dört öznitelik ve toplu torbalı ağaç sınıflandırıcısı ile %88 in üzerinde sınıflandırma başarımı elde edilmiştir.

2 Materyal ve metot

Bu çalışmada ilk adım olarak ilgili veri seti içeri aktarılmış ve ön işleme sonucu günlük aktivite verileri elde edilmiştir. Daha sonra öznitelikler, bu veriler üzerinden hesaplanmıştır. Öznitelikler etiket verileri ile birlikte sınıflandırma modelinin eğitiminde ve sınanmasında kullanılmak üzere, %80 eğitim ve %20 test olacak şekilde ikiye bölünmüştür. Eğitim aşamasında filtre tipi farklı öznitelik seçim yöntemleri uygulanarak özniteliklerin önem sırasına göre sıralanması sağlanmıştır. Daha sonra sınırlı sayıda öznitelik, 10 kat çapraz doğrulama tekniği kullanılarak farklı makine öğrenmesi tabanlı sınıflandırma algoritmaları uygulanmıştır. Son aşamada ise test verileri ile sınıflandırıcıların başarımları hesaplanmıştır. Şekil 1'de yönteme ait akış şeması gösterilmektedir.

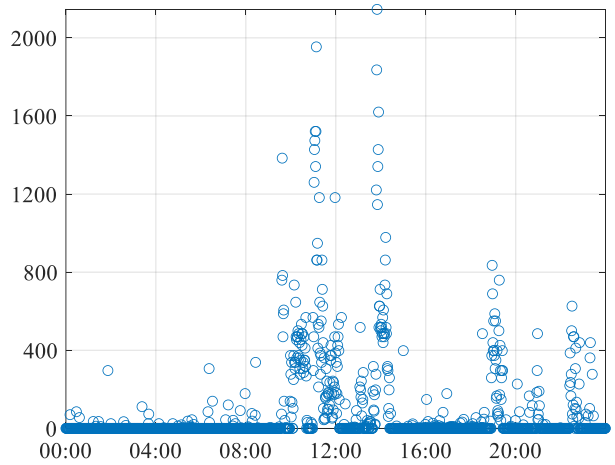


Şekil 1. Sistemin akış şeması

2.1 Veri seti

Geliştirdiğimiz yöntemi ortak bir tabanda karşılaştırmak amacıyla literatürde yer alan 'Depresjon' veri seti [27] kullanılmıştır. Veri kümesi, hastaların depresif durumunun şiddeti, Montgomery-Asberg Depresyon Derecelendirme Ölçeği (MADRS) üzerinde tıbbi uzmanlar tarafından yapılan derecelendirmeler kullanılarak etiketlenen unipolar ve bipolar depresyonu olan 23 hastanın ve 32 sağlıklı kontrolün motor aktivite kayıtlarını içermektedir. Hasta kişilerin yaş ortalamaları 42,8±11, Sağlıklı kontrollerin ise 38,2±13 olarak verilmektedir. Ayrıca hasta kişilerden 13'ünün (%57) ve sağlıklı kontrollerden 12'sinin (%38) erkek olduğu da belirtilmektedir.

Motor aktivite verileri, kişinin tüm yönlerdeki hareketinin yoğunluğunu, miktarını ve süresini bir piezoelektrik ivmeölçer sensörü kullanılarak ölçen ve sağ bileğe takılan bir aktigraf saat yardımıyla elde edilmiştir (Actiwatch, Cambridge Neurotechnology Ltd, İngiltere, model AW4). Örnekleme frekansı 32Hz olan aktigraf saati ile 0,05 g değerinin üzerindeki hareketleri toplam aktivite sayıları bir dakikalık aralıklarla olacak şekilde sürekli olarak kaydedilmiştir. Aktigraf cihazları, 5 ile 20 gün arasında değişebilecek şekilde kontrol ve koşul gruplarında ortalama 12,6 gün boyunca kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan veriler gece yarısı başlangıcından itibaren bir tam gün geçecek şekilde hazırlanmış ve ham veriden elde edilmiştir. Şekil 2'de veri setindeki unipolar depresyonu olan bir hastanın 24 saatlik aktivite değerlerine ait örnek değerler gösterilmektedir.



Şekil 2. Aktivite verisi

2.2 Kullanılan öznitelikler

Öznitelikler, farklı sınıflara ait verileri belirgin şekilde ayrıştırmak için hesaplanan parametrelerdir. Örneğin, gün boyunca fiziksel aktivite verisi elde edilen bireylerden depresyon hatalarının, sağlıklı bireylere göre gün içinde ya da uzun süre boyunca ortalama olarak daha az hareket etmeleri beklenir. Dolayısıyla fiziksel verilerin ortalamasını gösteren parametre öznitelik olarak adlandırılır. Çoğu zaman sadece tek bir öznitelik kullanarak doğru bir sınıflandırma tahmini yapmak çok zordur. Bu nedenle detaylı bir öznitelik araştırması yapılması, her özniteliğin başarıma katkısının irdelenmesi ve özniteliklerin birlikte kullanıldığı kombinasyonların başarımları da incelenmelidir.

Referans veri setini sunan çalışmada [27] gün bazında ortalama etkinlik seviyesi, ilgili standart sapma ve etkinlik olmayan olayların yüzdesi öznitelikleri kullanılmıştır. Gün içerisinde birer dakikalık aralıklarla toplam olarak kaydedilen fiziksel aktivite verileri zamana bağlı genlik değer olarak elde edildiğinden çalışmamızda zaman alanında değerlendirilmesine uygun özniteliklerin başarımı araştırılmış ve bu özniteliklerin sınıflandırma sonucuna katkıları sonuçlar bölümünde sunulmuştur. Bu çalışmada sırasıyla aşağıda verilen öznitelikler kullanılmıştır.

2.2.1 Karekök ortalama

Karekök Ortalama (KO), bir dizi değerin ortalamasını belirlemek için kullanılan istatistiksel bir terimdir. Özellikle değerler zamanın bir fonksiyonu olarak değiştiğinde kullanışlıdır. $x_n, n = 1, \dots, N$ değer kümesinin Karekök Ortalaması, kareleri hesaplanan değerlerin ortalaması alındıktan sonra elde edilen değerin kare kökünün alınması ile Denklem 1'deki gibi hesaplanır. Özellikle değerler zamanın bir fonksiyonu olarak değiştiğinde kullanışlıdır.

$$KO = f_1 = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} x_n^2} \tag{1}$$

2.2.2 Ortalama mutlak değer

Ortalama mutlak değer (OMD), her bir veri değeri ile ortalama arasındaki ortalama mesafeyi gösterir. OMD, x_n değer kümesinin mutlak değerinin ortalamasıdır. Denklem 2'de gösterildiği şekilde tanımlanır.

$$OMD = f_2 = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} |x_n| \tag{2}$$

2.2.3 Varyans

Varyans, x_n değer kümesi içindeki verilerin ne kadar yayılmış olduğunun istatistiksel bir ölçüsüdür ve standart sapmanın karesi olarak Denklem 3'teki gibi hesaplanır.

$$\sigma^2 = f_3 = \sum_{n=1}^{N} \frac{(x_n - \mu)^2}{N} \tag{3}$$

2.2.4 Dalga formu uzunluğu

Dalga Formu Uzunluğu (DFU) özniteliği, x_n değer kümesi içinde hareketin gerçekleştiği bölgeyi belirlemek için kullanılmıştır. DFU, karmaşıklığın bir ölçüsünü gösterir ve dalga formunun zaman segmentindeki kümülatif uzunluğudur. Denklem 4'te belirtildiği şekilde hesaplanır;

$$DFU = f_4 = \sum_{n=1}^{N-1} |x_{n+1} - x_n| \quad (4)$$

2.2.5 Basit kare integrali

Basit Kare İntegrali (BKİ), x_n değer kümesinin kare değerlerinin toplamı olarak tanımlanır. Bu çalışmada aktivite verilerinin günlük enerjisi olarak da tanımlanabilir ve Denklem 5'teki gösterildiği üzere hesaplanır.

$$BK\dot{I} = f_5 = \sum_{n=1}^{N} |x_n|^2 \quad (5)$$

2.2.6 Standart sapma

Dalga Formu Uzunluğu (DFU) özniteliği, x_n değer kümesi içinde hareketin gerçekleştiği bölgeyi belirlemek için kullanılmıştır. DFU, karmaşıklığın bir ölçüsünü gösterir ve dalga formunun zaman segmentindeki kümülatif uzunluğudur. Hesaplanması Denklem 6'da verilmektedir.

$$\sigma = f_6 = \sum_{n=1}^{N} \frac{(x_n - \mu)^2}{N} \quad (6)$$

2.2.7 Aritmetik ortalama

Aritmetik Ortalama (π), x_n değer kümesindeki tüm değerler toplamının değer sayısına bölünmesiyle Denklem 7'de gösterildiği şekilde hesaplanır.

$$\mu = f_7 = \frac{\sum_{n=1}^{N} x_n}{N} \quad (7)$$

2.2.8 Minimum ve maksimum değer

Minimum değer (f_9), veri setindeki en küçük değer iken maksimum değer (f_8) ise veri setindeki en büyük değerdir. Kullandığımız veri setinde bu değerler en hareketli ve hareketsiz olunan aktivite durumlarını ifade etmektedir.

2.2.9 Çarpıklık

Çarpıklık (Ç) simetri eksikliğinin bir ölçüsüdür. x_n değer kümesindeki dağılımın simetrik olmadığı durumlarda çarpıklık söz konusudur. Normal bir dağılımda ise çarpıklık sıfırdır. Denklem 8'de belirtildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$Ç = f_{10} = \frac{(x_n - \pi)^3}{\sigma^3} \quad (8)$$

2.2.10 Basıklık

Çarpıklık (Ç) simetri eksikliğinin bir ölçüsüdür. x_n değer kümesindeki dağılımın simetrik olmadığı durumlarda çarpıklık söz konusudur. Normal bir dağılımda ise çarpıklık sıfırdır. Denklem 9'da belirtildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$B = f_{11} = \frac{(x_n - \pi)^4}{\sigma^4} \quad (9)$$

2.3 Özniteliklerin seçimi

Sınıflandırma sürecinde öznitelikler hesaplandıktan sonra ilgili grupları en iyi temsil eden özniteliklerin seçilmesi önemlidir. Öznitelik seçimi vasıtasıyla gereksiz veriler kaldırılarak öznitelik vektör boyutu azaltılır ve bu sayede makine öğrenmesi yöntemlerinin tatbik edilmesinde ilgili yönteme ait algoritmanın çalışma süresi kısalır [31]. Öznitelik seçim yöntemleri literatürde filtre, sarıcı ve gömülü olmak üzere üç farklı başlıkta incelenmektedir [32]. Kullanılan sınıflandırma yönteminden bağımsız hesaplanabilmesi sebebiyle yapılan çalışmada bu yöntemlerden sadece filtre tipi olan yöntemler kullanılmıştır. Bir sınıflandırma işleminde farklı sınıflandırıcıların başarımının hesaplanması amaçlanıyor ise filtre tipi öznitelik seçim yöntemlerinin kullanılması işlem yükünün az olması sebebi ile hızlı çalışacaktır. Yapılan çalışmada mevcut çalışmalarda çokça tercih edilen Sonsuz Gizli (ILFS) [33], Sonsuz (Inf-FS) [34], Relief-F [35], Karşılıklı Bilgi [36], Fisher [37] ve Korelasyon Tabanlı (CFS) [38], Öznitelik Seçimi yöntemleri kullanılmıştır. İlgili yöntemlere ait hesaplama karmaşıklıkları Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Seçim yöntemlerine ait işlem yükleri

Yöntem	Hesaplama Karmaşıklığı
ILFS	$O(n^{2.37} + in + T + C)$
Inf-FS	$O(n^{2.37}(1 + T))$
Relief-F	$O(iTnC)$
MI	$O(iT^2n^2)$
Fisher	$O(Tn)$
CFS	$O\left(\frac{n^2}{2}T\right)$

2.4 Kullanılan sınıflandırma yöntemleri

Yapılan çalışmada öznitelik seçim yöntemleri sonucu sıralanmış özniteliklerden ilk dört tanesi kullanılarak makine öğrenmesi tabanlı farklı sınıflandırıcılar aracılığı ile sınıflandırma modeli oluşturulmuştur. Kullanılan yöntemler aşağıda başlıklar halinde tanımlanmaktadır.

2.4.1 K-En yakın komşuluk (KNN)

Kullanım kolaylığı ve hızlı sonuç vermesi nedenleri ile sıklıkla tercih edilen makine öğrenme algoritmalarından biri olan KNN algoritması, diğer çoğu sınıflandırıcıların aksine verilerin iç içe girdiği zor durumlarda yüksek başarım elde edebilir. Ancak bunun için veri kümesinin tüm değişken koşullara uygun şekilde ve sayıda oluşturulması gerekir. Bir test verisinin sınıfı tahmin edilmek istendiğinde, test edilecek veriye eğitim kümesindeki en yakın k adet noktanın sınıfına bakılır. En yakın noktaların belirlenmesinde bu çalışmada Öklid uzaklığı hesabı kullanılmıştır. Elde edilen k adet en yakın eğitim kümesi verilerinin en çok hangi sınıfa ait verisi var ise test verisinin o sınıfa ait olduğuna karar

verilir. Bu nedenle kesin karar verebilmek için çoğu zaman *k* katsayısı tek sayı olarak seçilir. Diğer durumlarda ise sınıfın belirlenmesinde uzaklık sıralamasına bakılır. Yapılan çalışmada *k* katsayısı bir olarak alınmıştır.

2.4.2 *Toplu torbalı ağaç (TTA)*

Toplu (ensemble) sınıflandırma yöntemleri, birkaç karar ağacından oluşan kombinasyonu bir araya getirerek karar ağacı tahminlerin birleştirilmesi ile daha etkin bir sınıflandırma sonucunu sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Dolayısıyla, tek bir karar ağacı sınıflandırıcısından daha güvenilirdir ve daha yüksek bir performans sunar. Aşırı uymayı (overfitting) azaltığı ve karar ağacı sınıflandırıcısındaki varyansı en aza indirdiği için torbalı ağaç (bagged tree) işlemi tercih edilmiştir [39].

Yöntemde öncelikle eğitim kümesi, birbiri ile çakışmayacak şekilde aynı boyutta alt veri kümelerine bölünür. Böylece birbirinden benzersiz bir veri örnekleme sağlanmış olur. Her alt küme için ayrı bir karar ağacı oluşturulur. Karar Ağacında torbalama kullanmak, birden fazla Karar Ağacından elde edilen sonuçların birleştirilmesi anlamına gelir [40]. Yapılan çalışmada maksimum bölünme sayısı 1592 eğitilen sayısı ise 30 olarak alınmıştır.

2.4.3 *Karar ağacı (KA)*

Karar Ağacı algoritması, regresyonun yanında sınıflandırmada da kullanılan bir makine öğrenimi algoritmasıdır. Karar ağacı algoritmasının temel avantajlarından biri, dolaylı olarak özellik seçimi yapmasıdır [41]. Öznitelikleri değerlendirerek, verileri adım adım sınıflara atayan bir ağaç yapısı oluşturur. Bazı metrikler kullanarak veriyi en iyi şekilde sınıflara ayıran en iyi özniteliği belirler. Seçilen öznitelik kullanılarak veri kümesi alt gruplara ayrılır. Oluşturulan her alt grup için aynı işlemler tekrarlanır. Benzer şekilde, her alt grup için en iyi öznitelik belirlenir ve yeni alt gruplar ve düğümler oluşturulur. Oluşan bu dallanma işlemi sonucunda elde edilen son düğümler yaprak düğümlerdir. Bu düğümlerde ise sınıflandırmanın nihai sonucu elde edilir. Yapılan çalışmada maksimum bölünme sayısı 100 ve bölünme kriteri olarak Gini'nin çeşitlilik endeksi kullanılmıştır.

2.4.4 *Geniş yapay sinir ağları (YSA)*

Geniş Yapay Sinir Ağları (Wide Neural Networks), genellikle girdi katmanında daha fazla nöron veya düğüm içeren yapılardır. Böylece daha karmaşık öğrenme işlevlerini gerçekleştirebilmektir. Ancak, Geniş Yapay Sinir Ağları daha fazla hesaplama yükü gerektirmektedir. Yapılan çalışmada 1 adet tam bağlı katman, ilk katman boyutu 100, aktivasyon ReLU ve yineleme sınırı 1000 olarak alınmıştır.

2.4.5 *Destek vektör makineleri (DVM)*

Destek Vektör Makineleri (DVM), sınıflandırma problemlerinde kullanılan denetimli öğrenme metotlarından biridir [42]. Bu yöntemde bir düzlem üzerindeki sınıflara ait noktaları ayırmak için iki sınıfa da maksimum uzaklıkta olan bir doğru çizilir. Karar noktalarına çizilecek en yakın noktalar destek olarak adlandırılır. Doğrusal olarak bir vektör ile sınıflar ayrılabiliyorsa bu durumda lineer çekirdek kullanılmıştır. DVM, boyutu düşük olan veri setlerinde daha gerçekçi sonuçlar ortaya koysa da çoğu zaman bir doğru çizilerek sınıfları ayrıştırmak yeterli olmaz. Bu durumda Radyal tabanlı işlev çekirdeği (RBF) gibi farklı kernel fonksiyonları eksenleri çarpmada kullanılır ve doğrusal olmayan bir çizgi ile de sınıflar ayrıştırılır. Çalışmada hem lineer hem de RBF yöntemleri kullanılmış ve karşılaştırılmıştır.

2.4.6 *Naive bayes (NB)*

Bayes teoremini temel alan Naive Bayes (NB) sınıflandırıcı, bir örneğin önceki olasılığına dayanarak yeni örneğin belirli bir sınıfa ait olma olasılıklarının en yüksek değerine göre tahmin eden bir sınıflandırma yöntemidir [43]. Bu algoritma için her özellik olasılığa katkıda bulunur, ancak birbirleriyle ilişkisiz olarak değerlendirilirler [44]. Yapılan çalışmada sayısal tahmin ediciler için Gauss dağılımı kullanılmıştır.

2.4.7 *Karesel diskriminant analizi (KDA)*

Karesel diskriminant analizi (KDA), maksimum olabilirlik tahminine dayanan basit bir doğrusal olmayan diskriminant analizidir [45]. İstatistiksel bir sınıflandırma yöntemi olan bu yöntemin adı kuadratik bir karar yüzeyine sahip olmasından gelmektedir. Bu yöntemde veri noktaları, her sınıfın kendi iç dağılımına uygun bir şekilde modellenir. Temel amaç, sınıflar arasındaki istatistiksel farklılıkları kullanarak verileri en iyi şekilde sınıflandırmaktır. Yapılan çalışmada tam kovaryans yapısı kullanılmıştır.

2.5 *Karşılaştırma metrikleri*

Sınıflandırma modelinin sınanmasında hata matrisi ve bu matristen elde edilen metrikler kullanılmaktadır. Hata matrisi bir sınıflandırma modelindeki gerçek etiket değerleri ile tahmin edilen etiket değerlerinin gösterildiği bir tablodur. Tablo 2'de bu değerlerin detaylı gösterimlerine yer verilmektedir.

Tablo 2. Hata matrisi

Hata Matrisi		Gerçek	
		Pozitif	Negatif
Tahmin	Pozitif	Doğru Pozitif (TP)	Yanlış Pozitif (FP)
	Negatif	Yanlış Negatif (FN)	Doğru Negatif (TN)

Tablo 2'de verilen değerlere göre hesaplanan metrikler ise Tablo 3'te yüzde olarak belirtilmektedir.

Tablo 3. Sınıflandırmada başarım ölçüm metrikleri

Metrik	Denklem	Numara
Doğruluk	$\frac{(TP + TN)}{(TP + TN + FP + FN)}$	(10)
Duyarlılık	$\frac{TP}{(TP + FN)}$	(11)
Özgüllük	$\frac{TN}{(TN + FP)}$	(12)
Kesinlik	$\frac{TP}{(TP + FP)}$	(13)
F1 Skoru	$\frac{2 \times (\text{Kesinlik} \times \text{Duyarlılık})}{\text{Kesinlik} + \text{Duyarlılık}}$	(14)

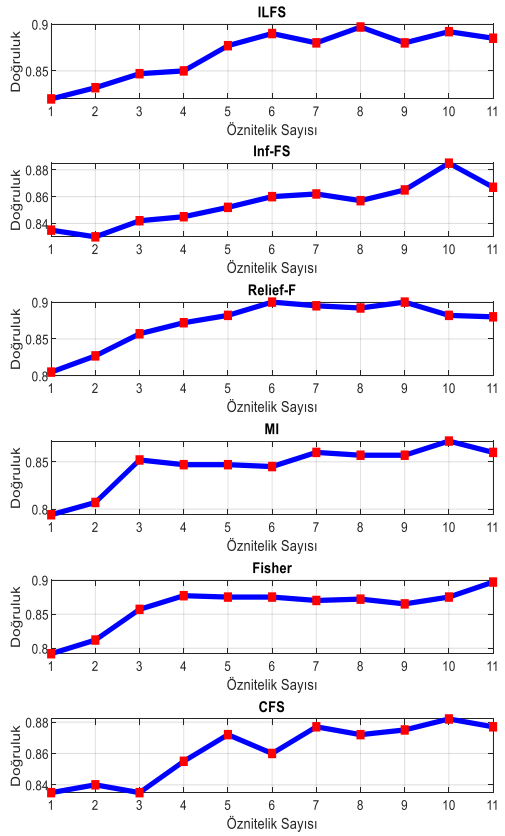
3 Bulgular ve tartışma

Fiziksel aktivite verileri birer dakikalık aralıklarla zamana göre alınan veriler içerdiğinden bu çalışmada zaman bölgesi öznitelik çıkarma yöntemleri geniş şekilde araştırılmıştır. Ayrıca, farklı öznitelik seçim yöntemleri kullanılarak özniteliklerin önem sırasına göre sıralanması sağlanmıştır. Öznitelik seçim algoritmasının çalışma süresi ve ilgili veri tabanına ait özniteliklerin sıralanması Tablo 4'te belirtilmektedir.

Tablo 4. Kullanılan seçim yöntemlerine ait sonuçlar

Yöntem	Çalışma Süresi (sn.)	Öznitelik Sıralaması
ILFS	0.056991	f3, f5, f6, f1, f4, f8, f2, f7, f10, f11, f9
Inf-FS	0.016444	f5, f9, f6, f1, f4, f8, f3, f2, f7, f11, f10
Relief-F	0.362623	f4, f8, f9, f10, f6, f2, f7, f1, f11, f5, f3
MI	0.041658	f9, f3, f5, f6, f8, f1, f4, f11, f10, f2, f7
Fisher	0.063520	f9, f6, f1, f4, f8, f5, f3, f2, f7, f11, f10
CFS	0.012652	f3, f9, f8, f6, f11, f5, f10, f1, f4, f2, f7

Yapılan çalışmada öznitelikler ilgili seçim algoritması ile sıralandıktan sonra Toplu Torbalı Ağaç sınıflandırıcısı kullanılarak kullanılan öznitelik sayısına göre sınıflandırılmıştır. Elde edilen sınıflandırma doğruluklarına karşılık kullanılan öznitelik sayısı grafiği Şekil 3'te gösterilmektedir.



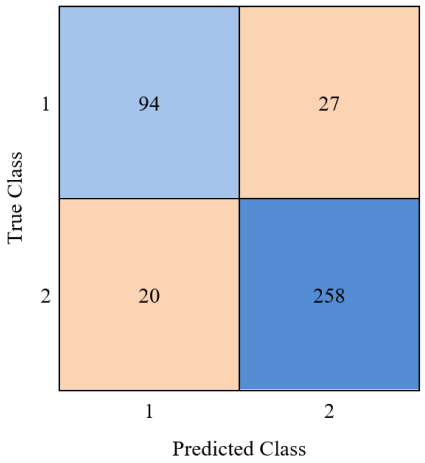
Şekil 3. Öznitelik seçim yöntemlerinin sınıflandırma başarımına etkisi

Öznitelik seçim yöntemlerinin kullanılması sonucu tüm özniteliklerin önem sırasına göre sıralanması sağlanmasına rağmen, Şekil 3'te görüleceği üzere belirli sayıda özniteliğin kullanılması durumunda tüm özniteliklerin kullanıldığı duruma göre daha yüksek sınıflandırma başarımının edilebileceği görülmektedir. Yapılan çalışmada diğer çalışmalar ile eşit şartlarda karşılaştırma yapılabilmesi açısından öznitelik sayısı 4 ile sınırlandırılmıştır. Bu şartlar altında farklı sınıflandırıcılarında kullanılması ile elde edilen sonuçlar Tablo 5'te gösterilmektedir. Tablo 5'teki sonuçların elde edilmesinde veri tabanındaki tüm veriler %80 eğitim ve %20 test olarak ayrılmıştır. Eğitim aşamasında kullanılan öznitelik seçim yöntemleri 10 katmanlı çapraz doğrulama ile ele alınmıştır. Eğitim aşamasında oluşturulan sınıflandırma modeli daha sonra test verileri ile sınanmıştır. Tüm bu işlemler her sınıflandırma yöntemi için 10 defa tekrarlanmış ortalama doğruluk ve standart sapma değerleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Öznitelik seçim yöntemlerinin farklı sınıflandırma yöntemleriyle birlikte kullanılması

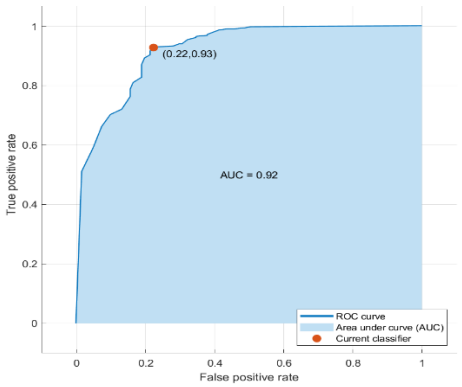
Yöntem	**KNN**	**TTA**	**KA**	**YSA**
ILFS	0.843±0.013	0.845±0.017	0.795±0.014	0.781±0.023
Inf-FS	0.846±0.014	0.854±0.008	0.848±0.003	0.806±0.007
Relief-F	0.842±0.016	0.865±0.011	0.848±0.010	0.855±0.020
MI	0.831±0.016	0.846±0.009	0.820±0.018	0.804±0.019
Fisher	0.845±0.008	**0.882±0.005**	0.833±0.023	0.826±0.009
CFS	0.849±0.012	0.872±0.016	0.842±0.036	0.807±0.018
	Lineer DVM	**RBF DVM**	**NB**	**KDA**
ILFS	0.748±0.018	0.697±0.001	0.718±0.013	0.721±0.018
Inf-FS	0.779±0.011	0.768±0.008	0.714±0.009	0.717±0.008
Relief-F	0.746±0.018	0.787±0.011	0.783±0.018	0.691±0.009
MI	0.724±0.012	0.777±0.014	0.726±0.009	0.699±0.017
Fisher	0.765±0.028	0.784±0.019	0.736±0.015	0.719±0.035
CFS	0.769±0.014	0.697±0.009	0.719±0.040	0.691±0.018

Tablo 5'e bakıldığında seçili ilk 4 özniteliğe göre en başarılı sonuçlara, Fisher öznitelik seçim algoritmasının TTA sınıflandırıcısı ile beraber kullanıldığında ulaşılabildiği tespit edilmiştir. En başarılı sonuçlara ait hata matrisi Şekil 4'de gösterilmektedir.

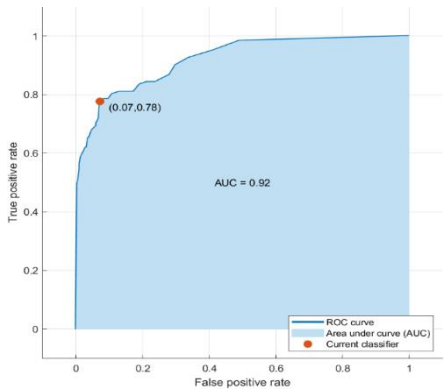


Şekil 4. Fisher ve TTA yöntemlerinin beraber kullanılması ile elde edilen test hata matrisi

Şekil 5'te her bir sınıf için alıcı işletim karakteristiği (receiver operating characteristic, ROC) eğrileri gösterilmektedir. Bu eğriler, en iyi öznitelik birleşimi durumu için doğru pozitif oranına karşı yanlış pozitif oranını göstermektedir. Eğri altındaki alan (area under the curve, AUC) değeri sınıflandırıcının genel başarımının bir ölçüsüdür. Bu alan değeri büyüdükçe ilgili sınıfa ait daha başarılı bir sınıflandırma işleminin gerçekleştiği tespit edilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 5. Fisher ve TTA yöntemlerinin beraber kullanılması ile elde edilen ROC ve AUC değerleri
(a) Depresyon **(b)** Depresyonda değil

Sunulan yöntemden elde edilen sınıflandırma doğruluklarının referans çalışma [27] ile karşılaştırıldığı bulgular Tablo 6'de verilmektedir.

Geliştirilen yöntemden elde edilen sınıflandırma doğruluk değerlerinin kullanılan tüm sınıflandırıcılarda referans çalışmaya göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Ayrıca, referans çalışmada sunulan en iyi dört öznitelik seçimi ile yöntemimizden elde edilen en iyi dört özniteliğin diğer başarım ölçüm metriklerine göre karşılaştırması Tablo 7'de sunulmaktadır. Standart sapma ve minimum değerleri ortak öznitelik olarak yer alırken Dalga Formu Uzunluğu ve Karekök Ortalama öznitelikleri referans çalışmaya göre tüm metriklerde daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 6. Bulguların referans çalışma ile karşılaştırılması

Sınıflandırma Yöntemi	Referans Çalışmanın [27] Doğruluğu	Sunulan Yöntemin Doğruluğu
KNN	0.675	0.845
DVM (Lineer)	0.727	0.784
DVM (RBF)	0.724	0.765
KA	0.707	0.833
YSA	0.719	0.826
NB	0.694	0.736
KDA	0.700	0.719

Tablo 7. Bulguların referans çalışma ile karşılaştırılması

Başarım Ölçüm Metrikleri	Referans Çalışma [27] DVM (Lineer) (Dört öznitelik: ortalama. standart sapma. max. min)	Sunulan Yöntem TTA. Fisher Öznitelik Seçimi (Dört öznitelik: (min. standart sapma. DFU. KO)
Kesinlik	0.735	0.780
Duyarlılık	0.729	0.820
Doğruluk	0.727	0.880
Özgüllük	0.726	0.910
F1-Skoru	0.724	0.800

Sunulan yöntemin, referans çalışmasına [27] göre genel olarak daha doğru tahminler yaptığı yüksek doğruluk değerinden anlaşılmaktadır. Ancak, veri setindeki verilerin denge durumuna göre F1-Skorunun daha anlamlı sonuç vermesi beklenir. Tablo 7 incelendiğinde, benzer şekilde F1-Skor değerinin de referans çalışmasına göre daha yüksek olduğunu, dolayısıyla, geliştirdiğimiz modelin daha dengeli bir performans sergilediği görülmektedir.

Literatürde Deprejson veri setini kullanan ve yüksek başarım sunan fakat veri seti üzerinde değişiklikler yapan çalışmalar da bulunmaktadır. Örneğin, 0.99 doğruluk elde eden Zakariah ve Alotaibi [46], 0.84 doğruluk elde eden Jakobsen vd. [47]'nin çalışmasında olduğu gibi %98 F1-Skoru elde eden Raihan vd. [28]'nın çalışmasında da sentetik veri üretilmesini sağlayan bir aşırı örnekleme algoritması (SMOTE) kullanılarak yapay veri üretimi yapılmış ve veri seti yapay olarak büyütülmüştür. Ayrıca, bu çalışmaların bazılarında mevcut veri seti sentez açısından üçe bölünmüş ve aktivite verilerinin dışında demografik veriler de sınıflandırmaya dâhil edilmiştir. Benze şekilde Aminifar vd. [48] de yapay veri artırma tekniği uyguladığı çalışmasında

dağıtık makine öğrenimi yaklaşımı ile %76.8 doğruluk elde etmiştir.

Kumar vd. [49], veri setinde yer alan bireylerin 48 saatlik verisini kullanmış ve bu verilerin ikişer saatlik ortalamalarını alarak Konvolüsyonel nöro bulanık modeli ile 0.851 doğruluk elde etmiştir. Calzada vd. [50] ise grup sayısını dengelemek amacıyla bazı verileri veri setinden çıkararak ilerlemiş ve numunelerin seçiminde 1 saat boyunca elde edilen 60 değerin sadece ilk değeri tutmuştur. İstatistiksel öznitelikleri kullanarak rastgele orman sınıflandırıcısı ile 0.893 doğruluk elde etmiştir.

Salinas vd. [51] veri seti içinden yedi günlük verileri seçerek yedi günün altında kaydı olan verileri elemiştir. Kalan veriler, dakika başına her motor aktivite kaydının bir görüntünün pikseli olarak temsil edildiği iki boyutlu bir evrişimsel ağa (2D-CNN) verilmek üzere önceden işlenmiş ve %76.72'lik doğruluk oranı elde etmiştir.

Yapılan çalışmada farklı öznitelik seçim yöntemleri kullanılarak mevcut öznitelikler önem sırasına göre Tablo 4'te belirtildiği üzere sıralanmaktadır. Öznitelik sayısının sınırlandırıldığı durum için Fisher öznitelik seçimi yönteminde kullanılan ilk dört özniteliğin ilgili sınıfları diğer yöntemlere göre daha iyi temsil edebildikleri deneysel olarak ispat edilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmada öznitelik sayısının sınırlandırılmadığı ve en az özniteliğin kullanıldığı durum için en yüksek sınıflandırma doğruluğu, Relief-F öznitelik seçim yöntemi akabinde tespit edilen ilk 6 adet özniteliğin TTA sınıflandırma yöntemi ile beraber kullanıldığı modelde % 90.05 olarak tespit edilmiştir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, günlük fiziksel aktivite verilerinden yola çıkarak depresyonda tanı destekleyici makine öğrenimi temelli bir yöntem geliştirilmiştir. Ayrıca 24 saatlik tam gün verilerini kullanarak referans çalışmada sunulan veri setine bağlı kalınmıştır. Çalışmada gün içinde birer dakikalık aralıklarla sunulan veri setindeki değerler üzerinden Fisher öznitelik seçimi yöntemi ile belirlenen minimum değer, standart sapma, dalga formu uzunluğu ve karekök ortalama öznitelikleri kullanılmıştır. Temelinde birkaç karar ağacından oluşan kombinasyonu kullanan Toplu Torbalı Ağaç sınıflandırma yöntemi ile referans çalışmasına göre doğruluğu 0,153 kadar artırarak 0,88 doğruluk değerinde ulaşım başarılmıştır. F1-Skoru da referans çalışmaya göre 0.724'ten 0,800 değerine çıkarılmıştır.

Literatürde yüksek başarıma sahip yapılan çalışmaların çoğu veri setini bölerek, azaltarak ya da yapay olarak çoğaltarak başarımı artırmaktaydı. Bu durum daha geniş bir veri seti ihtiyacının olduğuna işaret etmektedir. Yeterli bir veri setinde tüm yöntemlerin ortak bir paydada karşılaştırılması mümkün olacaktır.

Literatürdeki diğer çalışmaların sonuçları ile birlikte bu çalışmadan elde ettiğimiz sonuçlar da değerlendirildiğinde, fiziksel aktivite verilerinin makine öğrenim algoritmaları ile yorumlandığı uygun bir modelin depresyonda destekleyici tanı olarak katkı potansiyelinin yüksek olduğu görülmektedir.

Özetle bu çalışmada, depresyonu olan ve olmayan bireyleri fiziksel aktivite verilerini kullanarak geliştirdiğimiz makine öğrenimi temelli yöntemle %88 doğruluk payı ile ayırt etme sağlanmıştır. Sadece dört öznitelik kullanarak elde ettiğimiz bu başarımın, öznitelik sayısını arttırdığımızda %90'ın üzerine çıkabildiğini de gösterilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, depresyonun en temel özelliklerinden biri olarak kabul edilen psikomotor retardasyonun (konuşma, yüz ifadesi, ses tonu, göz hareketleri ve duruş yanında fiziksel hareketlerin hızı vb.) makine öğrenimi ile objektif olarak hem niceliksel hem de niteliksel olarak analiz edilebileceği potansiyeli taşıdığını göstermektedir. Bu yöntem sayesinde, klinik görüşme ve sübjektif hasta şikayetlerine dayanan depresyon tanısının desteklenmesi, semptom şiddetinin değerlendirilmesi ve tedavi sürecinin takibinde bireysel değerlendirmelerden kaynaklanan farklılıkların en aza indirgenmesinin mümkün olabileceği değerlendirilmektedir.

Bu çalışmadan elde edilen tecrübe sayesinde, sonraki çalışmalarımızda, fiziksel aktivitenin yanında farklı biyobelirteçlerin de değerlendirilebileceği geniş ve dengeli bir veri seti oluşturmak ve mevcut çalışmalarda yaygın olarak kullanılan temel istatistiksel özniteliklerin yanında bu biyobelirteçleri daha iyi temsil edebilecek farklı özniteliklerin de eklenmesi ile depresyon tanısını destekleme ve tedavi takibini sağlamada kullanılabilecek en uygun modeli araştıracağız. Ayrıca bu modelin tespitinde Poligon Alan Ölçütü Yaklaşımı [52] gibi yenilikçi karşılaştırma metriklerinin de kullanılması planlanmaktadır. Uygun modelin bulunması ve kullanılması, gerçek zamanlı uygulamalarda öznitelik vektör boyutunu ve hesaplama karmaşıklığını azaltacağı için gelecekteki çalışmalarımızda tamamen otomatik olarak çalışan ve depresyon tespitinde hekimlere yardımcı olabilecek bir cihazın tasarımına odaklanacağız.

Çıkar çatışması

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

[1] Z. S. Syed, K. Sidorov, and D. Marshall, Depression severity prediction based on biomarkers of psychomotor retardation. Proceedings of the 7th Annual Workshop on Audio/Visual Emotion Challenge, pp. 37-43, Mountain View, CA, USA, 2017.

[2] American Psychiatric Association, Desk reference to the diagnostic criteria from DSM-5 (R). Arlington, TX: American Psychiatric Association Publishing, 2013.

[3] D. Schrijvers, E. R. A. de Bruijn, Y. Maas, C. De Grave, B. G. C. Sabbe, and W. Hulstijn, Action monitoring in major depressive disorder with psychomotor retardation, Cortex, 44(5), 569–579, 2008. https://doi.org/ 10.1016/j.cortex.2007.08.014.

[4] W. H. Liu, L. Z. Wang, H. R. Shang, Y. Shen, Z. Li, E. F. Cheung, R. C. Chan, The influence of anhedonia on feedback negativity in major depressive disorder, Neuropsychologia, 53, 213–220, 2014. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.11.023.

[5] S. A. Almaghrabi, S. R. Clark, and M. Baumert, Bio-acoustic features of depression: A review, Biomed. Signal Process. Control, 85, 105020, 1-16 2023. https://doi.org/10.1016/j.bspc.2023.105020.
[6] D. Bennabi, P. Vandel, C. Papaxanthis, T. Pozzo, and E. Haffen, Psychomotor retardation in depression: a systematic review of diagnostic, pathophysiologic, and therapeutic implications, Biomed Res. Int., 2013, 158746, 1-13, 2013. https://doi.org/10.1155/2013/158746.
[7] T. Bracht, A. Federspiel, S. Schnell, H. Horn, O. Höfle, R. Wiest, T. Dierk, W. Strik, T. J. Müller, S. Walther, Cortico-cortical white matter motor pathway microstructure is related to psychomotor retardation in major depressive disorder, PLoS One, 7(12), 1-8. e52238, 2012.
[8] S. Calugi, G. B. Cassano, A. Litta, P. Rucci, A. Benvenuti, M. Miniati, L. Lattanzi, V. Mantua, V. Lombardi, A. Fagiolini, and E. Frank, Does psychomotor retardation define a clinically relevant phenotype of unipolar depression?, J. Affect. Disord., 129(1–3), 296–300, 2011.
[9] S. Walther, S. Hügli, O. Höfle, A. Federspiel, H. Horn, T. Bracht, R. Wiest, W. Strik, and T. J. Müller, Frontal white matter integrity is related to psychomotor retardation in major depression, Neurobiol. Dis., 47(1), 13–19, 2012.
[10] D. Schrijvers, W. Hulstijn, and B. G. C. Sabbe, Psychomotor symptoms in depression: a diagnostic, pathophysiological and therapeutic tool, J. Affect. Disord., 109(1–2), 1–20, 2008.
[11] I. B. Hickie, S. L. Naismith, P. B. Ward, C. L. Little, M. Pearson, and E. M. Scott, Psychomotor slowing in older patients with major depression: relationships with blood flowin the caudate nucleus andwhite matter lesions, Psychiatry Res., 155(3), 211–220, 2009.
[12] T. F. Quatieri and N. Malyska, Vocal-source biomarkers for depression: A link to psychomotor activity Proc, Conf. Int. Speech Commun. Assoc., Interspeech, International Speech Communication Association (ISCA), pp. 1059–1062, 2012.
[13] N. Cummins, S. Scherer, J. Krajewski, S. Schnieder, J. Epps, and T. F. Quatieri, A review of depression and suicide risk assessment using speech analysis, Speech Commun., 71, 10–49, 2015.
[14] D. Shin, W. I. Cho, C. H. K. Park, S. J. Rhee, M. J. Kim, H. Lee, N. S. Kim, and Y. M. Ahn, Detection of minor and major depression through voice as a biomarker using machine learning, J. Clin. Med., 10(14), 3046, 2021. https://doi.org/10.3390/jcm10143046.
[15] S. Suparatpinyo and N. Soonthornphisaj, Smart voice recognition based on deep learning for depression diagnosis, Artificial Life and Robotics, 28(2), 332–342, 2023. https://doi.org/10.1007/s10015-023-00852-4
[16] H. Tian, Z. Zhu, and X. Jing, Deep learning for depression recognition from speech, Mob. Netw. Appl., 1-16, 2023.
[17] P. J. Benson, S. A. Beedie, E. Shephard, I. Giegling, D. Rujescu, and D. St. Clair, Simple viewing tests can detect eye movement abnormalities that distinguish schizophrenia cases from controls with exceptional accuracy, Biol. Psychiatry, 72(9), 716–724, 2012.
[18] S. Brakemeier, A. Sprenger, I. Meyhöfer, J. E. McDowell, L. H. Rubin, S. K. Hill, M. S. Keshavan, G. D. Pearlson, C. A. Tamminga, E. S. Gershon, S. S. Keedy, J. A. Sweeney, B. A. Clementz, and R. Lencer, Smooth pursuit eye movement deficits as a biomarker for psychotic features in bipolar disorder—Findings from the PARDIP study, Bipolar Disord., 22(6), 602–611, 2020. https://doi.org/10.1111/bdi.12865
[19] M. Gao, R. Xin, Q. Wang, D. Gao, J. Wang, and Y. Yu, Abnormal eye movement features in patients with depression: Preliminary findings based on eye tracking technology, Gen. Hosp. Psychiatry, 84, 25–30, 2023.https://doi.org/10.1016/j.genhosppsych.2023.04.010
[20] E. S. Kangas, E. Vuoriainen, S. Lindeman, and P. Astikainen, Auditory event-related potentials in separating patients with depressive disorders and non-depressed controls: A narrative review, Int. J. Psychophysiol., 179, 119–142, 2022. https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2022.07.003
[21] F. Li and Y. Ding, Data mining in cognitive function training of depression patients applications, in 2019 10th International Conference on Information Technology in Medicine and Education (ITME), pp. 98-101, Qingdao, China, 2019.
[22] Y. Baek, K. Jung, and S. Lee, Effects of sleep restriction on subjective and physiological variables in middle-aged Korean adults: an intervention study, Sleep Med., 70, 60–65, 2020.
[23] J.-G. Choi, I. Ko, and S. Han, Depression level classification using machine learning classifiers based on actigraphy data, IEEE Access, 9, 116622–116646, 2021. https://doi.org/10.1109/access.2021.3105393
[24] J. Kim, T. Nakamura, H. Kikuchi, K. Yoshiuchi, T. Sasaki, and Y. Yamamoto, Covariation of depressive mood and spontaneous physical activity in major depressive disorder: toward continuous monitoring of depressive mood, IEEE J. Biomed. Health Inform., 19 (4), 1347–1355, 2015.
[25] M. Abbas, J.-C. Roy, G. Robert, and R. L. Bouquin Jeannes, Utility of actimetry to detect apathy in old-age depression: A pilot study, in 2022 30th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), pp.1203-1207, Belgrade, Serbia, 2022.
[26] R. K. Thelagathoti and H. H. Ali, A correlation network Model for analyzing mobility data in depression related studies, 16th International Conference on Health Informatics HEALTHINF, pp. 416–423, 2023
[27] E. Garcia-Ceja, M. Riegler, P. Jakobsen, J. Tørresen, T. Nordgreen, K. J. Oedegaard, and O. B. Fasmer, Depresjon: a motor activity database of depression episodes in unipolar and bipolar patients, in Proceedings of the 9th ACM multimedia systems conference, pp. 472–477, 2018.
[28] M. Raihan, A. K. Bairagi, and S. Rahman, A machine learning based study to predict depression with

monitoring actigraph watch data, 12th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), pp. 1-5, 2021.
[29] A. Arora, P. Chakraborty, and M. P. S. Bhatia, Identifying digital biomarkers in actigraph based sequential motor activity data for assessment of depression: a model evaluating SVM in LSTM extracted feature space, Int. J. Inf. Technol., 15 (2), 797-802, 2023.
[30] M. M. Misgar and M. P. S. Bhatia, Detection of depression from IoMT time series data using UMAP features, in 2022 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS), pp. 623-628, Greater Noida, India, 2022,
[31] L. Ladha and T. Deepa, Feature selection methods and algorithms, International Journal on Computer Science and Engineering, 3(5), 1787–1797, 2011.
[32] I. Guyon, S. Gunn, M. Nikravesh, and L. A. Zadeh, Feature Extraction: Foundations and Applications. Berlin, Germany, Springer, 2006.
[33] G. Roffo, S. Melzi, U. Castellani, and A. Vinciarelli, Infinite latent feature selection: A probabilistic latent graph-based ranking approach, IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), pp. 1407-1415, Venice, Italy, 2017.
[34] G. Roffo, S. Melzi, U. Castellani, A. Vinciarelli, and M. Cristani, Infinite Feature Selection: A graph-based feature filtering approach, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 43(12), 4396–4410, 2021.
[35] H. Liu and H. Motoda, Eds., Computational Methods of Feature Selection. Chapman and Hall/CRC, 2007.
[36] M. Zaffalon and M. Hutter, Robust feature selection using distributions of mutual information, in Proceedings of the 18th International Conference on Uncertainty in Artificial Intellegence (UAI-2002), San Francisco, CA, pp. 577–584, 2002.
[37] Q. Gu, Z. Li, and J. Han, Generalized Fisher score for feature selection, arXiv [cs.LG], 2012.
[38] M. A. Hall, Correlation-based Feature Selection for Machine Learning. Hamilton, 1999.
[39] K. Bhavsar, V. Vakharia, R. Chaudhari, J. Vora, D. Y. Pimenov, and K. Giasin, A comparative study to predict bearing degradation using discrete wavelet transform (DWT), tabular generative adversarial networks (TGAN) and machine learning models, Machines, 10(3), pp.1-18, 2022.
[40] J. Brownlee, Machine learning algorithms from scratch with Python, Machine Learning Mastery, 2016.
[41] J. S. L. Senanayaka, H. Van Khang, and K. G. Robbersmyr, Towards online bearing fault detection using envelope analysis of vibration signal and decision tree classification algorithm, 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 1-6 Sydney, NSW, Australia, 2017,
[42] C. Cortes, and V. Vapnik, Support-vector networks. Machine Learning, 20(3), 273–297, 1995. https://doi.org/10.1007/bf00994018
[43] F. Cheng, C. Yang, H. Zhu, Y. Li, and F. Zhang, A concentration interval identification method of cobalt ions based on optimal spectral bands selection and naive Bayes classification, China Automation Congress (CAC), pp. 7762-7766, Beijing, China, 2021.
[44] I. A. P. Banlawe, J. C. Dela Cruz, J. C. P. Gaspar, and E. J. I. Gutierrez, Decision tree learning algorithm and naïve Bayes classifier algorithm comparative classification for mango pulp weevil mating activity, IEEE International Conference on Automatic Control & Intelligent Systems (I2CACIS), pp. 317-322, Shah Alam, Malaysia, 2021.
[45] W. Jinjia, J. Shaonan, and Z. Yaqian, Quadratic discriminant analysis based on graphical lasso for activity recognition, in 2019 IEEE 4th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP), pp. 70-74, Wuxi, China, 2019.
[46] M. Zakariah and Y. A. Alotaibi, Unipolar and bipolar depression detection and classification based on actigraphic registration of motor activity using machine learning and uniform manifold approximation and projection methods, Diagnostics (Basel), 13(14), 2323, 2023. https://doi.org/10.3390/diagnostics13142323
[47] P. Jakobsen, E. Garcia-Ceja, M. Riegler, L. A. Stabell, T. Nordgreen, J. Torresen, O. B. Fasmer, and K. J. Oedegaard,, Applying machine learning in motor activity time series of depressed bipolar and unipolar patients compared to healthy controls, PLoS One, 15, 8, e0231995, 1-16 2020.
[48] A. Aminifar, F. Rabbi, V. K. I. Pun, and Y. Lamo, Monitoring motor activity data for detecting patients' depression using data augmentation and privacy-preserving distributed learning, Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc., pp. 2163–2169, Mexico 2021.
[49] A. Kumar, S. R. Sangwan, A. Arora, and V. G. Menon, Depress-DCNF: A deep convolutional neuro-fuzzy model for detection of depression episodes using IoMT, Appl. Soft Comput., 122, 108863, 1-16, 2022.
[50] L. A. Zanella-Calzada, C. E. Galván-Tejada, N. M. Chávez-Lamas, M. D. C. Gracia-Cortés, R. Magallanes-Quintanar, J. M. Celaya-Padilla, J. I. Galván-Tejada, and H. Gamboa-Rosales, Feature extraction in motor activity signal: Towards a depression episodes detection in unipolar and bipolar patients, Diagnostics (Basel), 9(1), 1-13, 2019.
[51] C. H. Espino-Salinas, C. E. Galván-Tejada, H. Luna-García, H. Gamboa-Rosales, J. M. Celaya-Padilla, L. A. Zanella-Calzada, and J. I. G. Tejada, Two-dimensional Convolutional Neural Network for depression episodes detection in real time using motor activity time series of depresjon dataset, Bioengineering, 9(9), 1-17, 2022.
[52] O. Aydemir, A new performance evaluation metric for classifiers: polygon area metric. Journal of Classification, 38, 16-26. 2021. https://doi.org/10.1007/s00357-020-09362-5

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 060-064

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Bor arsenit bazlı nano-transistörlerde elektrot genişliğinin enerji aralığı üzerindeki etkisinin incelenmesi, bir DFT çalışması

Investigating the width effect on energy gaps of electrodes in boron arsenide based nano-transistors, a DFT study

Nilüfer Ertekin[1,*]

[1] *Yalova Üniversitesi, Elektrik elektronik Mühendisliği Bölümü, Yalova, Türkiye*

Abstract

This study deals with electronic properties of Boron Arsenide nanoribbons using Density function theory (DFT) calculations. Under specific conditions, nanoribbons can be used as Nano-transistors. It is feasible to modify nanoribbons' electronic properties, such as bandgap and conductivity, by varying their width and edge shape. Source, drain, and gate are basic parts of a conventional field-effect transistor (FET). The channel's conductivity can be changed by applying a voltage to the gate electrode. In current research, Boron Arsenide nanoribbons has been investigated as lead electrode of a transistor and stability of the sheet has been confirmed by positive phonon vibrational modes. Utilizing the band structure spectrum, band gap as an electronic property is measured and reported. Different width values for electrodes have been considered and it has represented that the band gap is size dependent and increasing in ribbon's size to bulk structure, results in decrements in band gap energy value

Keywords: Nano-transistor, BAs Nanoribbon, Band gap, Armchair edge, Density function theory (DFT)

Öz

Bu çalışma, Yoğunluk Fonksiyon Teorisi (DFT) hesaplamalarını kullanarak Boron Arsenit nanoşeritlerin elektronik özellikleri araştırılmıştır. Belirli koşullar altında, nanoşeritler Nano-transistör olarak kullanılmaktadır. Şeritlerin genişliği ve kenar şeklini değiştirerek, nanoşeritlerin bant aralığı ve iletkenliği gibi elektronik özellikleri değiştirilebilir. Source, drain, ve gate, geleneksel bir alan etkili transistörün (FET) temel parçaları olarak tanımlanır. Kanalın iletkenliği, kapı elektroduna bir gerilim uygulayarak değişmektedir. Bu araştırmada Boron Arsenide nanoşeritleri bir transistörün lead elektrotu olarak kullanımı incelenmiştir ve tabakaların kararlılıkları pozitif fonon titreşim modları ile doğrulanmıştır. Band yapısı spektrumu kullanılarak, elektronik özelliği olarak bant aralığı ölçülüp, rapor edilmiştir. Elektrotlar için farklı genişlik değerleri kullanarak bant aralığının boyuta bağlı olduğu ve şeridin boyutunun artmasıyla bant aralığı enerji değerinde azalmaya yol açtığı gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Nano-transistör, BAs Nanoribon, Bant aralığı, Armchair kenar, Yoğunluk fonksiyonu teorisi (YFT)

1 Introduction

A nano-transistor is a transistor made from extremely small materials. These fundamental elements of modern electronic technology are studied and developed with the goal of controlling the flow of electrical current. To enhance performance and increase the number of transistors that can be packed onto a chip, traditional transistors, also known as metal-oxide-semiconductor field-effect transistors (MOSFETs), have had their size decreased during a period of several decades. This miniaturization is carried to the nanoscale by nano-transistors, which have dimensions on the order of nanometres. The development of two-dimensional (2D) materials including graphene [1], h-BN [2], transition-metal dichalcogenides (TMDC) [3-4], and more [5-11] has brought about a great deal of interest in the field of nanoscience and technology. They can be utilized to create smaller and faster field-effect transistors. The lower carrier mobility and lack or large band gap of these materials [12-13], however, restrict their field of application, necessitating more research into alternate materials with a wider range of applications [14].

Boron arsenide (BAs) is a compound made up of boron (B) and arsenic (As) atoms. It is a semiconductor element with special qualities that make it appealing for a variety of applications. In addition, Boron arsenide (BAs) nanoribbons are thin ribbons or strips with a width measured in nanometers. They are one-dimensional nanostructures that have received interest owing to their distinctive electronic and thermal characteristics [15-18].

BAs nanoribbons may have metallic behavior or be semiconducting with a bandgap, depending on the width and type of edge and this property make them potential candidates for nano-electronic devices, including field-effect transistors (FETs), sensors, and nanoscale logic circuits. Armchair nanoribbons contain edges that, by being parallel to the crystal's lattice vectors, present a zigzag pattern. The name "armchair" comes from the zigzag pattern's resemblance to an armchair's arms.

The electronic characteristics of armchair nanoribbons depend on their width and the characteristics of the material they are formed of [18-19]. It is important to note that BAs nanoribbons are still in their early years, and additional study

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: nilüfer.ertekin@yalova.edu.tr (N. Ertekin)
Geliş / Recieved: 06.06.2023 Kabul / Accepted: 18.10.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1310492

is required to completely comprehend their properties, production processes, and prospective applications.

Based on the above-mentioned details, in the current study, we investigated the effect of BAs nanoribbons as the lead electrodes in nano-transistors by employing first-principles density functional theory (DFT)- based periodic calculations. A pure BAs sheet was made and the system relaxed and reached its minimum energy.

In the following structure, stability is checked by phonon distribution, and Band structure is calculated for optimized structure specifically. After developing the lead electrode from the structure, the effect of different values of width in the bandgap of the electrode has been investigated using band structure and density of function dispersions. Understanding the electronic properties of materials requires an understanding of the band structure and density of states (DOS), two fundamental concepts in DFT.

One of the most fundamental and important properties of a crystalline solid is its electronic band structure. The exact estimation of electronic band structures is an essential problem of computational condensed matter physics [20].

DOS diagrams present an easy way to characterize advanced electronic structures. It is a simple and useful way to determine the electronic structure of a material. Section 2 describes computational details and the result of our approach is described in Section 3.

2 Computational details

In this study the analysis has been performed by DFT-based periodic calculations, using the Quantum Espresso Package. A BAs sheet with a hexagonal structure was considered. Electronic structure calculations and geometry optimizations including lattice constant and atomic positions are done based on an iterative solution of the Kohn-Sham equation [21] and ultra-soft Pseudopotentials by minimizing the total energy.

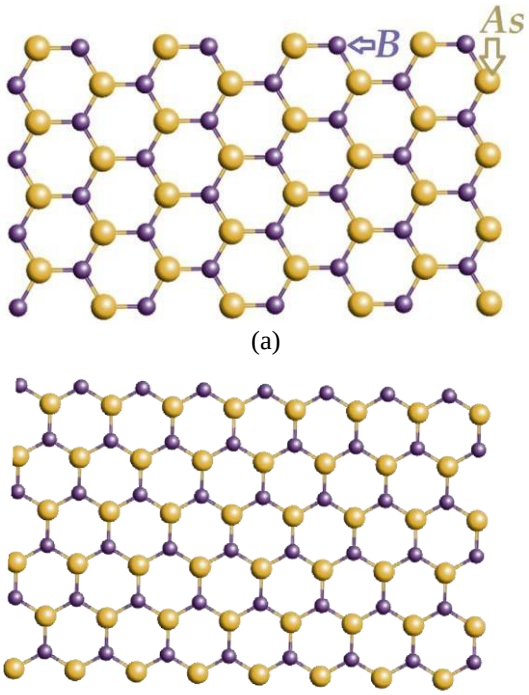
There are two fundamental types of nanoribbons: those with armchair-style edges and those with zigzag edges. Both structures are depicted schematically for BAs in Figure 1. The direction of these edges within the sheet varies by 30°. In this study, the armchair edge was modeled and all dangling bonds were terminated by hydrogen atoms Following, nanoribbons of various widths were created, their electronic properties were obtained, and they were compared to one another based on their gap energies.

Both valence band maximum (VBM) and conduction band minimum (CBM) details are extracted and reported

3 Results and discussions

Pristine Boron Arsenide structure was created and has been exposed in Figure 2a and optimized and the convergence limits for energy, forces, and stress were reached -26.7 Ry, 0 Ry/Bohr, and 0.21 kBar respectively.

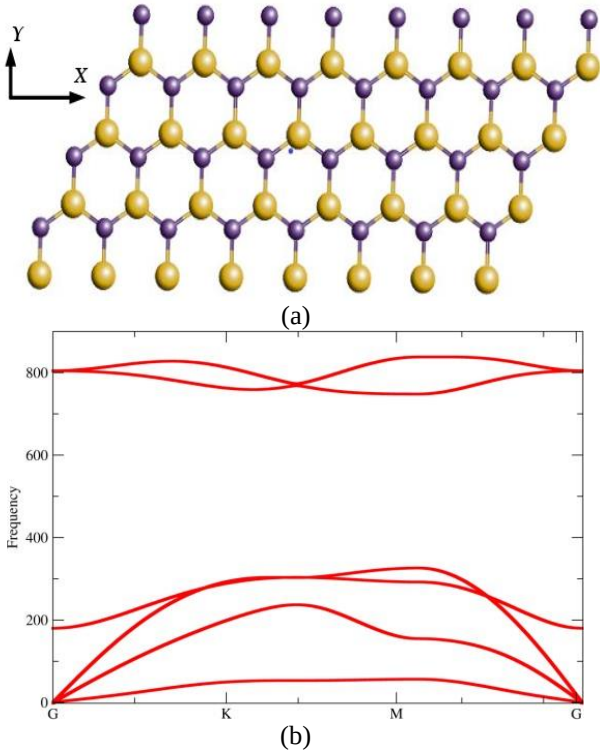
For investigating the dynamical stability of materials, phonon calculations are an appropriate technique in general. The phonon spectrum provides information about the frequencies and wave vectors associated with quantized lattice vibrations. The phonon spectrum of the modeled structure has been shown in Figure 2b. The phonon dispersion is along Γ-M -K -Γ within the Brillouin zone and there were no imaginary frequencies in phonon dispersion, this means the structure's dynamic stability and the system is in local minimum energy.



(a)

(b)

Figure 1. a- Armchair-style edge b- Zigzag-style edge of BAs sheet



(a)

(b)

Figure 2. (a)- structure (b)- phonon spectrum of BAs sheet

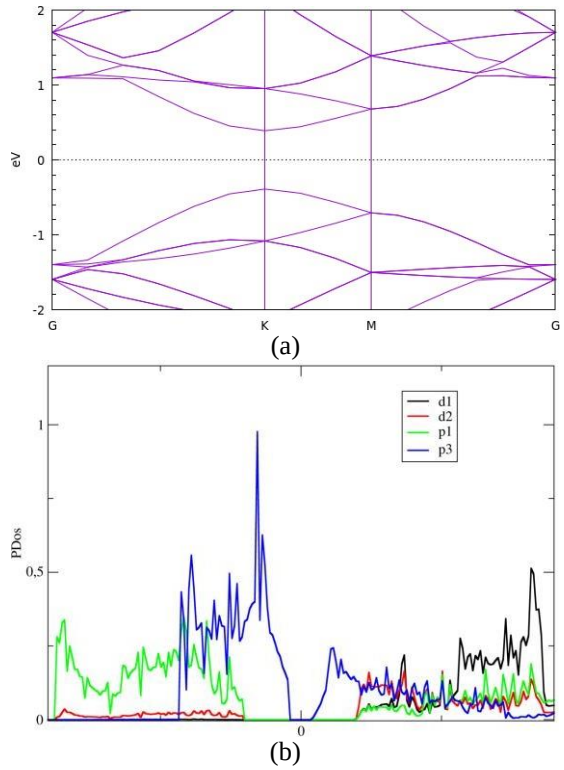


Figure 3. (a)- The energy band structure diagram (b)- DOS of pristine BAs sheet

The energy band structure and density of states diagrams of pristine BAs sheet have been shown in Figures 3a, and 3b. The band gap is 0.76, as can be seen in Figure 3a,which is consistent with earlier studies [14]. The conduction band minimum value of the structure also corresponds with the valence band maximum value at the K point of the Brillouin zone. it is a direct band gap and VBM and CBM energies are 0.38 and -0.38 respectively. The density of state dispersion of the system was exposed in Figure 3b. It represents the distribution of available electronic states as a function of energy. The width of an armchair nanoribbon, which defines the number of atomic rows in the ribbon, affects the specific form and properties of the band structure.

In the current research, we investigated the effect of width on nanoribbons with 13Å, 17Å, 23Å, and 47Å widths respectively. Figure 4 represented the structure of nanoribbons and their band structures with different widths. The electrodes with 13Å, 17Å, 23Å, and 47Å width represented 0.96, 0.88, 0.86, and 0.78 gap energies respectively. Figure 5 depicts the band gaps produced for the various width ABsNRs and GNR. Table 1 summarizes the energy of the band gap, valence, and conduction bands for an accurate representation of the total data.

It was understood from the table and figures that, as the width of the nanoribbon gets larger the band gap of the electrode slowly narrows related to the quantum confinement effect. As the ribbon width decreases, quantum confinement becomes more significant, and the electronic states become more localized. This confinement can lead to an increase in the band gap, making narrower nanoribbons more likely to exhibit semiconducting behavior [23, 24]

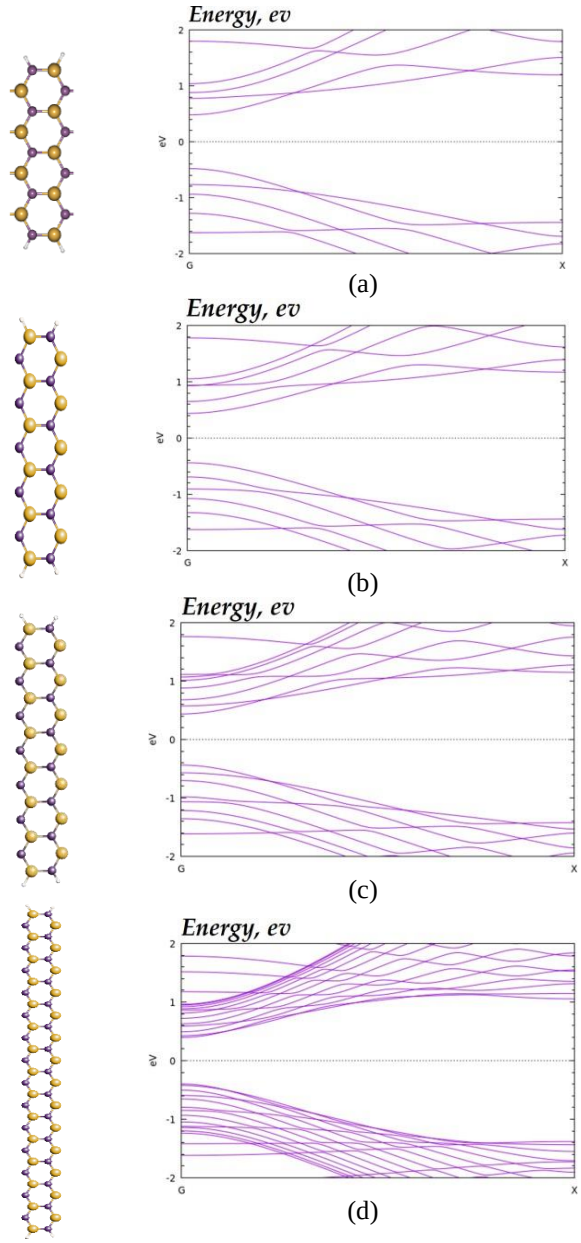


Figure 4. BAs nanoribbons with different width andtheir band structure spectrums

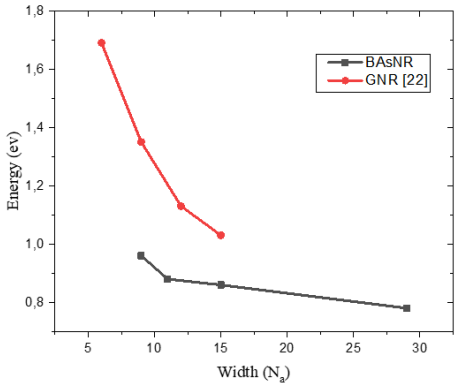


Figure 5. Band gaps according to the varying width for BAsNR and GNR.

Table 1. The band gap, valence, and conduction bands ofdifferent widths of the nanoribbons

	This work				Other works (Armchair graphene nanoribbon)		
Structure	Width (Å)	VB (eV)	CB (eV)	Band gap (eV)	Structure	Band gap (eV)	Ref.
9-aBAsNR	13	-0.48	0.48	0.96	6-aGNR	1.69	[22]
11-aBAsNR	17.5	-0.44	0.44	0.88	9-aGNR	1.35	[22]
15-aBAsNR	23	-0.43	0.43	0.86	12-aGNR	1.13	[22]
29-aBAsNR	47	-0.39	0.39	0.78	15-aGNR	1.03	[22]

The source and drain electrodes in a nano-transistor, commonly referred to as the leads, have a significant impact on how the transistor operates and its performance. The characteristics and arrangement of these leads can shape the transistor's behavior. The width of these leads is particularly important because it determines how much current the transistor can handle and how efficiently it conducts electricity. Increasing the width of nanoribbons can increase the mobility of electrons [18, 25], and this can influence the performance of the leads and the transistor. While wider leads can facilitate larger currents, they can also introduce unwanted side effects, such as increased capacitance and resistance, which might influence the speed of switching and the power usage of the transistor.

4 Conclusions

Using DFT and Quantum ESPRESSO package [15], the geometrical, electronic, and phonon calculation of BAs sheets were performed, and as nano-transistor electrodes, nanoribbon structures with different widths were extracted from the sheet. The electronic calculations represented that the proposed BAs material is a semiconductor with a direct band gap which has below 1ev gap energy, making it an appropriate choice for nano-transistor applications. The result showed that by decreasing in width, the band gap increased and the band gap is a size-dependent subject. This is due to quantum confinement and the electronic states become more concentrated as the ribbon width gets smaller. The band gap could expand because of this limitation. The width of source and drain electrodes in a nano-transistor, often called leads, is a critical factor in determining the transistor's current-carrying capacity and efficiency. Widening nanoribbons can improve electron mobility, which affects both lead and transistor performance, but wider leads can introduce unwanted effects like increased capacitance and resistance, potentially influencing switching speed and power usage.

Conflict of interest:

The author declares that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): %4

References

[1] A. K. Geim, and K. S. Novoselov, The Rise of Graphene. Nature Materials, 6, 183- 191, 2007. https://doi.org/10.1038/nmat1849.

[2] L. Song *et al*., Large Scale Growth and Characterization of Atomic Hexagonal Boron Nitride Layers. Nano Lett. 10, 3209- 3215, 2010. https://doi.org/ 10.1021/nl1022139.

[3] J.A Wilson and A.D. Yoffe, The transition metal dichalcogenides discussion and interpretation of the observed optical, electrical, and structural properties, Advances in Physics, 18:73, 193335, 1969. https://doi.org/ 10.1080/00018736900101307.

[4] S. Manzeli, D. Ovchinnikov and D. Pasquier, 2D transition metal dichalcogenides. Nat Rev Mater, 2, 17033, 2017. https://doi.org/10.1038/natrevmats.2017.33.

[5] A. Zhou *et al*., From structural ceramics to 2D materials with multi-applications: A review on the development from MAX phases to MXenes. J Adv Ceram 10, 1194–1242, 2021. https://doi.org/10.1007/s40145-021 0535-5.

[6] M. Xu, T. Liang, M. Shi, and H. Chen, Chemical Reviews, 113 (5), 3766-3798, 2013. https://doi.org/10.1021/cr300263a.

[7] M. Mathew *et al*., A review on mechanisms and recent developments in p-n heterojunctions of 2D materials for applications. J Mater Sci 56, 9575–9604, 2021. https://doi.org/10.1007/s10853-021-05884-4

[8] P. Miro, M. Audiffred, and T. Heine, An Atlas of Two-Dimensional´ Materials. Chem. Soc. Rev. 43, 6537−6554, 2014. https://doi.org/10.1039/C4CS00102H

[9] V.S. Pratik, T. Anjana, T. Ranjit and S.R. Chandra, Nanoribbons of 2D materials: A review on emerging trends, recent developments and future perspectives, Coordination Chemistry Reviews, 453, 214335,2022. https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.214335.

[10] S. Zhang *et al.*, Atomically Thin Arsenene and Antimonene: Semimetal- Semiconductor and IndirectDirect Band-Gap Transitions. Angewandte.

Chemie, Int. Ed. 54, 3112− 3115, 2015. https://doi.org/10.1002/anie.201411246

[11] S. Zhang *et al*., Antimonene Oxides: Emerging Tunable Direct Bandgap Semiconductor and Novel Topological Insulator. Nano Lett. 17, 3434−3440 2017. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b00297

[12] F. Xia, D. B. Farmer, Y. M. Lin and P. Avouris, Graphene Field Effect Transistors with High on/off Current Ratio and Large Transport Band Gap at Room Temperature. Nano Lett. 10, 715718, 2010. https://doi.org/10.1021/nl9039636

[13] G. He, *et al.* Conduction Mechanisms in CVD-Grown Monolayer MoS2 Transistors: From Variable-Range Hopping to Velocity Saturation. Nano Lett. 15, 5052−5058, 2015. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b01159

[14] M. Kamaraj and V. Subramanian, Exploring Multifunctional Applications of Hexagonal Boron Arsenide Sheet: A DFT Study ACS Omega, 3, 9533-9543, 2018. https://doi.org/10.1021/acsomega.8b00946.

[15] H. Shan., Q. He, X. Luo and Y. Zheng, First-Principles Calculations of Monolayer h-BN Nanosheets and Nanoribbons with Ultrahigh Phonon-Limited Hole Mobility for Wide Band Gap P-Channel Transistors. The Journal of Physical Chemistry C, 127, 9278-9286, 2023. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.3c00349

[16] J. Cao, et al., On functional boron nitride: Electronic structures and thermal properties, Materials Today Electronics, 2, 100005, 2022. https://doi.org/10.1016/j.mtelec.2022.100005.

[17] T. Miao., M. Xiang, D. Li, X. Wang, Electrical and thermal transport properties of high crystalline PdTe2 nanoribbons under a strong magnetic field – Nanoscale, 14, 10101-10107, 2022. https://doi.org/10.1039/D2NR02049A

[18] D. Yulan *et al*., First-principal prediction of the electronic property and carrier mobility in boron arsenide nanotubes and nanoribbons. Journal of Applied Physics 28, 124303, 2019. https://doi.org/10.1063/1.5110868

[19] N.M. Díez *et al.,* Width-Dependent Band Gap in Armchair Graphene Nanoribbons Reveals Fermi Level Pinning on Au (111) ACS Nano, 11, 11661-11668, 2017. https://doi.org/10.1021/acsnano.7b06765.

[20] N.R. Knøsgaard, and K.S. Thygesen, Representing individual electronic states for machine learning GW band structures of 2D materials. Nat Commun 13, 468, 2022. https://doi.org/10.1038/s41467-022-28122-0.

[21] W. Kohn and L. J. Sham, Self-Consistent Equations Including Exchange and Correlation Effects, Phys. Rev., 140.A1133, 1965. https://doi.org/10.1103/PhysRev.140.A1133

[22] N. Merino-Díez, *et al.*, Width-dependent band gap in armchair graphene nanoribbons reveals Fermi level pinning on Au (111). ACS nano, 11, 11661-11668. https://doi.org/10.1021/acsnano.7b06765

[23] G. Kalosakas, N.N. Lathiotakis, and K. Papagelis, Width dependent elastic properties of graphene nanoribbons. Materials, 14, 5042, 2021. https://doi.org/10.3390/ma14175042

[24] S. Dutta, and S. K. Pati, Novel properties of graphene nanoribbons: a review. Journal of Materials Chemistry, 20, 8207-8223, 2010. https://doi.org/10.1039/C0JM00261E

[25] B. Zeng *et al.*, First-principles prediction of the electronic structure and carrier mobility in hexagonal boron phosphide sheet and nanoribbons. The Journal of Physical Chemistry C, 120(43), 25037-25042, 2016. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b07048

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 065-073

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Güncel tasarım standartlarına göre soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerin eğilme dayanımlarının hesabı

Calculation of flexural strength of cold formed steel sections according to current design standards

Yakup Bölükbaş[*,1]

[1] AksarayÜniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray Türkiye

Öz

Son yıllarda soğuk şekil verilmiş çelik elemanların gerek taşıyıcı gerekse tamamlayıcı yapı elemanı olarak kullanımı oldukça popüler hale gelmiştir. Bu elemanların, imalat özelliği gereği ince et kalınlıklarına (t≤6 mm) sahip olması bu elemanların tasarımında burkulma ve burulma dayanımlarını kritik hale getirmektedir. Bu çalışmada ülkemiz inşaat sektöründe kullanıma sunulan tırnaklı C profillerin eğilme dayanımı TS EN 1993-1-3, AISI S100-16 ve DSM ile hesaplanacaktır. Seçilen 72 adet profilin bu tasarım yöntemleri ile dayanımları belirlendikten sonra aralarında karşılaştırılma yapılmış ve yöntemlerin performansı test edilmiştir. Yöntemler arasında oluşan farklar grafik üzerinde gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Soğukta şekil verilmiş çelik, Eğilme elemanı, Efektif genişlik metodu, Doğrudan dayanım metodu

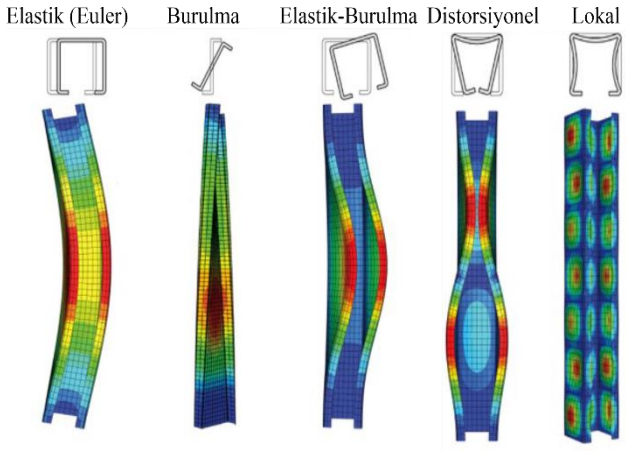
Abstract

In recent years, using cold-formed steel members as structural and complementary structural elements has become very popular. The fact that these elements have thin wall thicknesses (t≤6 mm) due to their manufacturing characteristics makes the buckling and torsional strengths critical in designing these elements. In this study, the flexural strength of clawed C profiles used in the construction industry in our country will be calculated with TS EN 1993-1-3, AISI S100-16, and DSM. After determining the strengths of 72 selected profiles with these design methods, a comparison was made between them, and the performance of the methods was tested. The differences between the methods are shown on the graph.

Keywords: Cold formed steel, Bending element, Effective width Method, Direct strength method

1 Giriş

Son yıllarda soğukta şekil verilmiş çelik kesitler gerek taşıyıcı gerekse tamamlayıcı yapı elemanı olarak kullanımı oldukça popüler hale gelmiştir. Bu elemanlar, kısa açıklıklarda yapısal çeliğe göre yüksek taşıma gücü-ağırlık oranına sahip olmaları, kesit şeklinde sağladıkları esneklik ve kolay montaj imkânı ile tercih edilmektedir. Diğer taraftan, soğuk şekil verilmiş çelik elemanların imalat özelliği gereği ince et kalınlığına (t≤6 mm) sahip olması bu kesitlerin yük etkisi altında akma gerilmelerinin çok daha düşük seviyesinde burkulmasına sebep olmaktadır. Lokal burkulma deformasyonu gösteren bu elemanlar çoğu zaman göçme durumuna gelmez ve yük taşımaya devam eder. Burkulma sonrası davranış adı verilen bu olgu soğuk şekil verilmiş kesitler için ana tasarım kriteridir. Ayrıca soğukta şekil verilmiş bu kesitler çoğu zaman açık profillerden (C, U vb.) oluşmaktadır. Bu durum elemanların tasarımında burkulma ve burulma dayanımlarını kritik hale getirmektedir. Soğuk şekil verilmiş çelik elemanlar lokal, global ve distorsiyonel burkulma tiplerini ya da bu burkulma tiplerinin etkileşimini birlikte gösterebilirler. Lokal ve distorsiyonel burkulmalar kesit üzerindeki elemanların (başlık, gövde ya da tırnak) deformasyonu iken global burkulma elastik burkulma ya da burulmalı burkulma olarak ortaya çıkmaktadır. Şekil 1'de bu burkulma şekilleri kesit üzerinde gösterilmiştir.



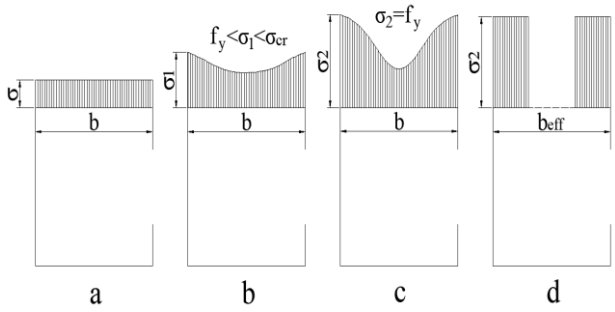
Şekil 1. Soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerin burkulma tipleri [1]

Günümüzde soğuk şekil verilmiş çelik elemanların tasarımında iki yöntem öne çıkmaktadır. Bu yöntemlerden ilki; ince levhaların burkulma davranışını modelleyebilmek

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / ybolukbas@aksaray.edu.tr (Y. Bölükbaş)
Geliş / Recieved: 02.06.2023 Kabul / Accepted: 20.10.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngmuh.1309045

amacıyla von Karman tarafından geliştirilen ve daha sonra Winter tarafından soğuk şekil verilmiş çelik elemanlar için yenilenen Efektif Genişlik Metodudur (Effective Width Method, EWM) [2, 3]. Diğeri ise görece daha yeni bir metot olan Doğrudan Dayanım Metodudur (Direct Strength Method, DSM) [4]. EWM hemen hemen tüm ülke standartlarında kullanılmaktadır. Ancak DSM; Amerikan, Kanada ve Avusturalya standartlarında kullanılmasına rağmen Avrupa ve ülkemiz standartlarında kullanılmamaktadır [5-7].

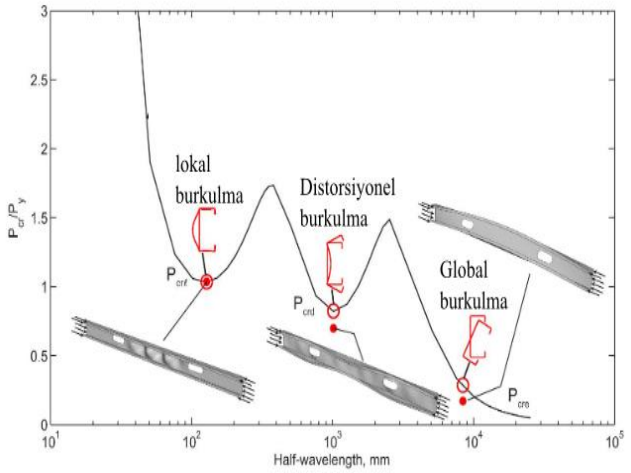
Yük altıdaki soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerin basınç gerilmeleri etkisindeki başlık ve gövde üzerindeki gerilme dağılımı yüklemenin ilk anlarında (Şekil 2a) düzgün olarak dağılmaktadır. Ancak artan yükler kesit ortasında lokal burkulma deformasyonu oluşturması (Şekil 2b) kesit ortasındaki gerilmenin sabit kalmasına ve artan gerilemelerin kesit köşelerindeki lifler tarafından taşımasıyla eleman yük taşımaya devam eder. Bu gerilme durumu kesit köşesindeki liflerin akma gerilmesine ulaşmasına kadar devam eder (Şekil 2c). EWM kesit üzerindeki düzgün olmayan bu dağılımını dikkate almak yerine daha kolay modellenecek şekilde dağılımın kesit ortasında kalan bölümü çıkararak, köşelerde düzgün gerilme durumunu ele alır. Böylece kesitin genişliği efektif olarak yeni belirlenen genişlik olur (Şekil 2d).



Şekil 2. Efektif gerilme konsepti [8]

Efektif genişlik metodunda kesiti oluşturan elemanların tek tek burkulma sonrası gerilme dağılımını hesaplanması amaçlanmaktadır. Ancak kesit şeklinin karmaşıklaşmasıyla (tırnaklı C, Z ve omega) bu hesaplamalar giderek daha hantal hale gelmektedir. Her bir kesit parçasının için tek tek efektif genişliğin hesaplanması ve kesit köşelerindeki gerilme aktarımının hesaplanmasında oluşan zorluklar araştırmacıları alternatif çözüm arayışına itmiştir. Bu araştırmalar sonucunda Schafer ve Peköz tarafından Doğrudan dayanım metodu (DSM) ortaya atılmıştır [4]. Bu yaklaşım kesiti oluşturan elemanların tek tek burkulma durumuna bakmak yerine kesitin tümü için geçerli dayanım eğrileri oluşturmayı amaçlamaktadır. Soğuk şekil verilmiş çelik kesitlerde oluşan hâkim burkulma modlarının her biri için kritik burkulma gerilmeleri sonlu elemanlar ya da sonlu şerit yöntemi ile tahmin edilerek kesitin taşıma gücü hesaplanmaktadır (Şekil 3).

Her iki yöntemde soğuk şekil verilmiş çelik elemanların tasarımında iyi sonuçlar verse de özellikle distorsiyonel burkulma davranışının etkili olduğu kesitlerde DSM daha iyi sonuç verdiği yapılan araştırmalar sonucunda ortaya konulmuştur. Ayrıca kesitin tüm burkulma modlarını ve bu modlar arasındaki etkileşimi tahmin etmede DSM daha tutarlı sonuçlar verdiği belirtilmektedir [9].



Şekil 3. Karakteristik burkulma eğrisi [9]

Literatürde eğilme etkisindeki soğukta şekil verilmiş çelik elemanlar ile ilgili çok sayıda araştırma bulunmaktadır. Bunların arasında tasarım yöntemlerini karşılaştıran çalışmaların bir kısmı incelenmiştir. Bu alanda önemli çalışmada Yu ve Schafer eğilme etkisindeki C ve Z kesitlerin lokal burkulma davranışını incelemek amacıyla 2003 yılında yapılmıştır. Araştırmacılar 4,9 m açıklığa kirişler üzerinde 4 nokta eğilme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Bu testlerde elemanların yanal burulmalı burkulma ve distorsiyonel burkulma yapması önlenmiş ve sadece lokal burkulma davranışı elde edilmiştir. Deneylerde değişen gövde yüksekliği-kalınlık oranı ve gövde yüksekliği-başlık genişliği oranlarına sahip elemanlar test edilmiştir. Çalışma sonucunda deneysel veriler ile tasarım yöntemleri karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar AISI (1996), S136 (1994) ve NAS (2001) standartlarının taşıma gücü tahminin deneysel sonuçlar ile tutarlı olduğu vurgulanmıştır. Ancak özellikle narin gövdelerdeki kesitler EWM ile yapılan tahminlerin aşırı güvenli tarafta kaldığını belirten araştırmacılar DSM'nin dayanım tahmininin tüm kesitlerde deney sonuçları ile daha tutarlı olduğu belirlenmiştir. Araştırmacıların yaptığı diğer çalışmada ise benzer bir deney sadece distorsiyonel burkulma davranışı için tasarlanan kesitler üzerinde yapılmıştır. Bu çalışmada ise değişen gövde kalınlık oranı ve başlık kalınlık oranları ile elemanlar test edilmiştir. Çalışma sonucunda EWM kullanan Amerikan ve Kanada standartlarının taşıma gücü tahminlerinin test sonuçlarına göre %8 ile %15 oranında fark olduğu Avrupa standardında ise bu oranın %4 olduğu görülmüştür. DSM kullanılan hesaplamalarda ise fark %2 olduğu görülmüştür [10, 11]. Bir diğer çalışmada soğuk şekil verilmiş çelik elemanlar üzerine yapılan çalışma sonuçlarını derleyerek DSM yönteminin performansını gözlemlemiştir. Araştırmacı DSM yönteminin brüt enine kesit özelliklerini kullandığını, ancak elemanın elastik burkulma davranışının doğru bir şekilde hesaplanması gerektiğini belirtmiştir. Bunun için sonlu şerit yöntemi veya genelleştirilmiş kiriş teorisi gibi sayısal yöntemlerin, gerekli burkulma davranışını hesaplamada en iyi seçim olduğunu belirtmiştir [12]. 2009

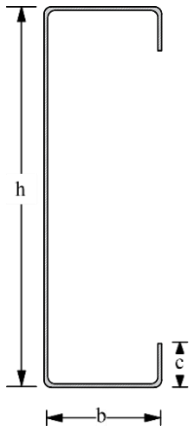
yılında yapılan çalışmada ise lokal-global burkulma etkileşiminden etkilenen soğuk şekil verilmiş çelik kolon elemanlarına yönelik son çalışmalar derlenmiştir. Ayrıca çalışmada bu elemanların dayanım tahmin için kullanılan EWM ve DSM yöntemlerini tek ve birleştirilmiş bir çözüm yöntemi önerilmiştir [12]. Batista'nın 2010 yılında yaptığı çalışmada ise yeni geliştirilen efektif kesit yönteminin (Effective Section Method) hakim diğer iki yöntem ile karşılaştırılması yapılmıştır [13,14]. Dinis ve Camotim yaptıkları çalışmada lokla-distorsiyonel burkulma modu etkileşiminden etkilenen, düzgün ana eksen burkulmasına maruz kalan, soğuk şekillendirilmiş çelik tırnaklı kanal kirişlerinin burkulma sonrası davranışına ilişkin sayısal bir araştırmayı sunmuştur [15]. Bir diğer çalışmada C kesit ve bu kesit kullanılarak oluşturulan I ve R kesitlere sahip soğukta şekil verilmiş çelik kirişlerin ortam sıcaklığındaki yapısal davranışı üzerine, geniş bir deneysel test programı ve sonlu eleman analiz sonuçlarına dayanan bir araştırma çalışması sunulmaktadır. İlk olarak, kirişlerin göçme yüklerini ve göçme modlarını değerlendirmek için dört noktalı eğilme testi yapılmıştır. Daha sonra deneysel sonuçlarla karşılaştırmak için uygun bir sonlu elemanlar modeli geliştirilmiş ve kirişlerin kalınlık, yükseklik ve uzunluğunun yapısal davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için parametrik bir çalışma yapılmıştır [16]. Anbarasu yaptığı çalışmada farklı kesit geometrisine ve akma gerilmesine sahip 60 elemanın sayısal parametrik çalışması yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizinden ve Doğrudan dayanım metodu (DSM) ile elde edilen nihai dayanımların karşılaştırılmasına dayanarak tırnaklı C kesitler için alternatif tasarım denklemi önermiştir [17]. Diğer çalışmada eğilme etkisi altında soğuk şekillendirilmiş basit mesnetli kirişlerin burkulması ve burkulma modlarında karşılaştırılması ile ilgili sayısal sonuçları verilmiştir [18]. Fan ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada ise 8 adet paslanmaz çelik tırnaklı C kirişin burulmalı burkulma kapasitesi testleri gerçekleştirilmiş ve her numunenin mekanik performansı ve göçme modları ortaya konmuştur. ABAQUS yazılımı kullanılarak her numunenin sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve sayısal simülasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak, sonlu eleman modelinin doğruluğu incelenmiştir. Doğrulanmış sonlu eleman modeli kullanılarak bir parametrik analiz yapılmıştır. [19].

Soğuk şekil verilmiş çelik elemanların kesit şekillerinin oluşturulmasında sunulan esneklik, bu elemanların tasarımında toptan bir çözüm üretmeyi zorlaştırmaktadır. Uluslararası literatürde bu alanda çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Ancak ulusal düzeyde bu elemanların tasarım yöntemlerini irdeleyen çalışma sayısı oldukça azdır. Ülkemizde bulunan çelik firmalarının piyasaya sundukları soğukta şekil verilmiş çelik C kesitlerin tasarım yöntemleri üzerine yapılan çalışmalar hem ulusal literatüre hem de sektöre önemli katkılar sunacaktır.

Bu çalışmada ülkemiz inşaat sektöründe kullanıma sunulan tırnaklı C profillerin eğilme dayanımı TS EN 1993-1-3, AISI S100-16 ve DSM ile hesaplanacaktır. Seçilen 72 adet profilin bu tasarım yöntemleri ile dayanımları hesapladıktan sonra aralarında karşılaştırılma yapılmış ve yöntemlerin tahmin gücü test edilmiştir. Yöntemler arasında oluşan tahmin farkları grafik üzerinde gösterilmiştir.

2 Materyal ve metot

Çalışmada incelenecek kesitler, ülkemizde bulunan çelik firmalarının sektöre sunduğu tırnaklı C profillerden seçilmiştir. Profillerin kesit ölçüleri 4 farklı gruba ayrılmıştır. Gövde yüksekliklerine göre belirlenen gruptaki profiller kendi aralarında kalınlık ve tırnak genişliği bakımından değişiklikler göstermektedir. Bu şekilde değişken kesit kalınlığı, gövde yüksekliği, başlık ve tırnak genişliği kapsayan 72 adet profil seçilmiştir. Çalışma için seçilen profillerin kesit ölçüleri Tablo 1'de verilmiştir. Burada profil isimlendirmesi C100.50.15.1,5 şeklinde yapılmış ve bu isimlendirme 100 mm gövde yüksekliğine (h), 50 mm başlık genişliğine (b), 15 mm tırnak genişliğine (c) ve 1.5 mm kalınlığa (t) sahip C kesiti ifade etmektedir (Şekil 4).



Şekil 4. Çalışmada kullanılan kesit özellikleri.

Tüm kesitlerde çelik sınıfı imalatçı firma kataloğuna göre S275 çelik sınıfı olarak alınmıştır. Bu sebeple kesitlerin akma dayanımı 275 MPa, kopma dayanımları ise 430 MPa olarak alınmıştır. Elastisite modülü TS EN 1993-1-3'e göre 205 GPa olarak alınmıştır. Kesitlerin eğilme tasarımı yapılacağından açıklık 1000 mm olarak seçilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan profillerin kesit ölçüleri

	Profil ismi	h (mm)	b (mm)	c (mm)	t (mm)	r (mm)
1.Grup	C100.50.15.1,5	100	50	15	1.5	2.0
	C100.50.15.2,0	100	50	15	2.0	2.0
	C100.50.15.2,5	100	50	15	2.5	2.0
	C100.60.15.1,5	100	60	15	1.5	2.0
	C100.60.15.2,0	100	60	15	2.0	2.0
	C100.60.15.2,5	100	60	15	2.5	2.0
	C100.70.15.1,5	100	70	15	1.5	2.0
	C100.70.15.2,0	100	70	15	2.0	2.0
	C100.70.15.2,5	100	70	15	2.5	2.0
	C100.50.25.1,5	100	50	25	1.5	2.0
	C100.50.25.2,0	100	50	25	2.0	2.0
	C100.50.25.2,5	100	50	25	2.5	2.0
	C100.60.25.1,5	100	60	25	1.5	2.0
	C100.60.25.2,0	100	60	25	2.0	2.0
	C100.60.25.2,5	100	60	25	2.5	2.0
	C100.70.25.1,5	100	70	25	1.5	2.0
	C100.70.25.2,0	100	70	25	2.0	2.0
	C100.70.25.2,5	100	70	25	2.5	2.0

Tablo 2.(Devam) Çalışmada kullanılan profillerin kesit ölçüleri

2.Grup	C150.70.20.1,5	150	70	20	1.5	2.0
	C150.70.20.2,0	150	70	20	2.0	2.0
	C150.70.20.2,5	150	70	20	2.5	2.0
	C150.80.20.1,5	150	80	20	1.5	2.0
	C150.80.20.2,0	150	80	20	2.0	2.0
	C150.80.20.2,5	150	80	20	2.5	2.0
	C150.90.20.1,5	150	90	20	1.5	2.0
	C150.90.20.2,0	150	90	20	2.0	2.0
	C150.90.20.2,5	150	90	20	2.5	2.0
	C150.70.30.1,5	150	70	30	1.5	2.0
	C150.70.30.2,0	150	70	30	2.0	2.0
	C150.70.30.2,5	150	70	30	2.5	2.0
	C150.80.30.1,5	150	80	30	1.5	2.0
	C150.80.30.2,0	150	80	30	2.0	2.0
	C150.80.30.2,5	150	80	30	2.5	2.0
	C150.90.30.1,5	150	90	30	1.5	2.0
	C150.90.30.2,0	150	90	30	2.0	2.0
	C150.90.30.2,5	150	90	30	2.5	2.0
3.Grup	C200.90.30.1,5	200	90	30	1.5	2.0
	C200.90.30.2,0	200	90	30	2.0	2.0
	C200.90.30.2,5	200	90	30	2.5	2.0
	C200.100.30.1,5	200	100	30	1.5	2.0
	C200.100.30.2,0	200	100	30	2.0	2.0
	C200.100.30.2,5	200	100	30	2.5	2.0
	C200.110.30.1,5	200	110	30	1.5	2.0
	C200.110.30.2,0	200	110	30	2.0	2.0
	C200.110.30.2,5	200	110	30	2.5	2.0
	C200.90.50.1,5	200	90	50	1.5	2.0
	C200.90.50.2,0	200	90	50	2.0	2.0
	C200.90.50.2,5	200	90	50	2.5	2.0
	C200.100.50.1,5	200	100	50	1.5	2.0
	C200.100.50.2,0	200	100	50	2.0	2.0
	C200.100.50.2,5	200	100	50	2.5	2.0
	C200.110.50.1,5	200	110	50	1.5	2.0
	C200.110.50.2,0	200	110	50	2.0	2.0
	C200.110.50.2,5	200	110	50	2.5	2.0
4.Grup	C250.120.50.1,5	250	120	50	1.5	2.0
	C250.120.50.2,0	150	120	50	2.0	2.0
	C250.120.50.2,5	150	120	50	2.5	2.0
	C250.130.50.1,5	250	120	50	1.5	2.0
	C250.130.50.2,0	150	120	50	2.0	2.0
	C250.130.50.2,5	150	120	50	2.5	2.0
	C250.140.50.1,5	250	120	50	1.5	2.0
	C250.140.50.2,0	150	120	50	2.0	2.0
	C250.140.50.2,5	150	120	50	2.5	2.0
	C250.120.70.1,5	250	120	70	1.5	2.0
	C250.120.70.2,0	150	120	70	2.0	2.0
	C250.120.70.2,5	150	120	70	2.5	2.0
	C250.130.70.1,5	250	120	70	1.5	2.0
	C250.130.70.2,0	150	120	70	2.0	2.0
	C250.130.70.2,5	150	120	70	2.5	2.0
	C250.140.70.1,5	250	120	70	1.5	2.0
	C250.140.70.2,0	150	120	70	2.0	2.0
	C250.140.70.2,5	150	120	70	2.5	2.0

2.1 TS EN 1993-1-3 (Eurocode 3)

Standart soğuk şekil verilmiş çelik elemanların eğilme dayanımı hesaplanırken iki farklı durumu incelemektedir. Bu iki durum için hesaplanan dayanımlardan en küçük olan moment kesitin moment dayanımı olarak belirlenir.

2.1.1 Basınç başlığının akma durumu (Elastik burkulma):

Bu durumda kesitin moment dayanımı ($M_{c,Rd}$) aşağıdaki şekilde hesaplanır. Burada kesitin Efektif genişlik metodu ile elde edilen efektif kesit özellikleri kullanılmaktadır.

$$M_{c,Rd} = \begin{cases} \dfrac{W_{eff} f_{yb}}{\gamma_{M0}}, & W_{eff} < W_{el} \\ \dfrac{f_{yb} W_{el} + (W_{pl} - W_{el}) 4 \left(1 - \dfrac{\lambda_{emax}}{\lambda_{e0}}\right)}{\gamma_{M0}}, & W_{eff} = W_{el} \end{cases} \quad (1)$$

Burada W_{eff} efektif kesit modülü, W_{el} elastik kesit modülü, W_{pl} plastik kesit modülü, f_{yb} kesitin akma dayanımı, λ_{e0} minimum narinlik, λ_{emax} maksimum narinliği temsil etmektedir.

2.1.2 Yanal burulmalı burkulma durumu:

Eğilme durumundaki kesitin yanal burulmalı burkulma dayanımı ($M_{b,Rd}$) için TS EN 1993-1-1 bölüm 6.3.2.2'de verilen denklem kullanılır.

$$M_{b,Rd} = X_{LT} \frac{W_{eff} f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (2)$$

$$X_{LT} = \frac{1}{\emptyset_{LT} + \left(\emptyset_{LT}^{\,2} - \bar{\lambda}_{LT}^{\,2}\right)^{0.5}} \leq 1 \quad (3)$$

$$\emptyset_{LT} = 0.5 \left[1 + \alpha_{LT} \left(\bar{\lambda}_{LT} - 0.2\right) + \bar{\lambda}_{LT}^{\,2}\right] \quad (4)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \quad (5)$$

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{L^2} \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 G I_t}{\pi^2 E I_z}} \quad (6)$$

Burada X_{LT} azaltma faktörü, λ_{LT} boyutsuz narinlik, $\emptyset_{LT}$ azaltma faktörü tanımlamak için katsayı, α_{LT} kusur katsayısı, M_{cr} kritik burkulma momenti, C_1 moment faktörü, E elastisite modülü, I_z zayıf eksen atalet momenti, L burkulma boyu, I_w çarpılma katsayısı, G kayma modülü, I_t St. Venant burulma sabitini temsil etmektedir.

2.2 AISI S100-16

Bu standart soğuk şekil verilmiş çelik elemanların eğilme dayanımını üç farklı durum üzerinden değerlendirmektedir. Bu üç durum için hesaplanan momentlerden en küçüğü elemanın eğilme dayanımı olarak belirlenir.

2.2.1 Akma ve yanal burulmalı burkulma durumu:

Kesitin yanal burulmalı burkulma ve akma davranışında gösterdiği eğilme dayanımı (M_{ne}) aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır. Sunulan denklemler tek ya da çift simetrik eksene sahip profiller için verilmiştir.

$$M_{ne} = S_f F_n \leq M_y \quad (7)$$

$$F_n = \begin{cases} F_n = F_y, & F_{cre} \geq 2.78 F_y \\ \dfrac{10}{9} F_y \left(1 - \dfrac{10 F_y}{36 F_{cre}}\right), & 2.78 F_y > F_{cre} > 0.56 F_y \\ F_{cre}, & F_{cre} \leq 0.56 F_y \end{cases} \quad (8)$$

$$F_{cre} = \frac{C_0 r_0 A}{S_f} \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t} \quad (9)$$

$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{K_y L_y}{r_y}\right)^2} \quad (10)$$

$$\sigma_t = \frac{1}{Ar_0^2}\left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2}\right] \quad (11)$$

Burada S_f elastik kesit modülü, F_n nominal gerilme, M_y akma momenti, F_y akma dayanımı, F_{cre} kritik elastik yanal burulmalı burkulma gerilmesi, C_o moment faktörü, r_0 polar atalet momenti, A kesit brüt alanı, σ_{ey} eğilmeli burkulma dayanımı, σ_t burulmalı burkulma dayanımını temsil etmektedir.

2.2.2 *Lokal burkulma durumu:*

Kesitin lokal burkulma durumu için eğilme dayanımı (M_{nl}) aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır. Burada kesitin efektif özellikleri EWM ile hesaplamaktadır.

$$M_{nl} = S_e F_n \leq S_{et} F_y \quad (12)$$

Burada S_e efektif kesit modülü, F_n nominal gerilme, F_y akma dayanımı, S_{et} çekme başlığına göre efektif kesit modülünü temsil etmektedir.

2.2.3 *Distorsiyonel burkulma durumu:*

Kesitin distorsiyonel burkulma durumu için eğilme dayanımı (M_{nd}) aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$M_{nd} = \begin{cases} M_y, & \lambda_d \leq 0.673 \\ \left[1 - 0.22\left(\frac{M_{crd}}{M_y}\right)^{0.5}\right]\left(\frac{M_{crd}}{M_y}\right)^{0.5} M_y, & \lambda_d > 0.673 \end{cases} \quad (13)$$

Burada $\lambda_d = \sqrt{(M_y/M_{crd})}$ şeklinde hesaplanır. M_{crd} kritik distorsiyonel burkulma momenti sonlu elemanlar ya da sonlu şerit metodu kullanan analiz yöntemleri ile hesaplanır. Çalışmada CUFSM yazılımı kullanılmıştır [20].

2.3 *Doğrudan Dayanım Metodu (DSM)*

Bu yöntem Amerikan AISI S100-16 standardının içinde yer almaktadır. Bu yöntem soğukta şekil verilmiş çelik elemanların eğilme dayanımını üç farklı durumdan inceler. Burada akma ve yanal burkulma durumu AISI S100-16'da verilen şekilde kullanılmaktadır. Ancak lokal ve distorsiyonel burkulma durumu ise aşağıda verilmiştir.

2.3.1 *Lokal burkulma durumu:*

Kesitin lokal burkulma durumu için eğilme dayanımı (M_{nl}) aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$M_{nl} = \begin{cases} M_{ne}, & \lambda_l \leq 0.776 \\ \left[1 - 0.15\left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}}\right)^{0.4}\right]\left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}}\right)^{0.4} M_{ne}, & \lambda_l > 0.776 \end{cases} \quad (14)$$

Burada $\lambda_l = \sqrt{(M_y/M_{crl})}$ şeklinde hesaplanır. M_{crl} kritik lokal burkulma momenti sonlu elemanlar ya da sonlu şerit metodu kullanan analiz yöntemleri ile hesaplanır. Çalışmada CUFSM yazılımı kullanılmıştır.

2.3.2 *Distorsiyonel burkulma durumu:*

Kesitin distorsiyonel burkulma durumu için eğilme dayanımı (M_{nd}) aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$M_{nd} = \begin{cases} M_y, & \lambda_d \leq 0.673 \\ \left[1 - 0.22\left(\frac{M_{crd}}{M_y}\right)^{0.5}\right]\left(\frac{M_{crd}}{M_y}\right)^{0.5} M_y, & \lambda_d > 0.673 \end{cases} \quad (15)$$

Burada $\lambda_d = \sqrt{(M_y/M_{crd})}$ şeklinde hesaplanır. M_{crd} kritik distorsiyonel burkulma momenti sonlu elemanlar ya da sonlu şerit metodu kullanan analiz yöntemleri ile hesaplanır. Çalışmada CUFSM yazılımı kullanılmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

Belirlenen 72 adet soğukta şekil verilmiş çelik profillerin eğilme dayanımı her üç tasarım yaklaşımı ile hesaplanmıştır. Elde edilen dayanım değerleri her bir profil için karşılaştırılmıştır. Ayrıca tasarım yöntemi kesitlerin göçme modu tahminleri de karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Tablo-2'de verilmiştir. Tabloda bulunan burkulma modları isimlendirilirken; LTB yanal burulmalı burkulma, F eğilmeli burkulma ve L lokal burkulma modunu temsil etmektedir. Sonuçlarda soğuk şekil verilmiş çelik elemanların tasarımında ülkemizde kullanılan TS EN 1993-1-3, Amerikan standardı AISI S100-16 ve DSM ile hesaplanan dayanımları verilmiştir. Tablo incelendiğinde TS EN 1993-1-3 eğilme dayanımı tahmininde AISI S100'e göre en fazla %10 farklılık gösterirken (Şekil 5) DSM yöntemi ile ise bu fark %14 seviyesinde olduğu görünmektedir (Şekil 6). Özellikler büyük gövde yüksekliğine sahip kesitlerde (C200, C250) bu fark büyük değerlere ulaşmaktadır. Burkulma modu tahmininde TS EN 1993-1-3 standardının diğer iki standarda göre farklılık göstermektedir. AISI S100 ile DSM arasında burkulma modu tahmini yakın görünse de özellikle etkileşimli modlarda tahminler arasında farklar oluşmaktadır. Dayanım tahmininde ise AISI S100 ile DSM arasında maksimum %17 fark görünmüştür (Şekil 7).

Kesitlerin eğilme dayanımları tahminleri incelendiğinde Şekil 5-7 tasarım yöntemler arasındaki tahmin farkının anlaşılmasını kolay hale getirmek amacıyla hazırlanmıştır. Şekil 5 incelendiğinde TS EN 1993-3-1 standardı kesit gövde narinliği arttıkça AISI S100'e göre daha yüksek moment değerleri tahmin etmiştir. İki standardın hesapladığı moment değerleri arasında en fazla %14 fark oluşmuştur. Ancak TS EN 1993-3-1 ile DSM arasındaki moment dayanım tahminleri incelendiğinde (Şekil 6) ise DSM gövde narinliği arttıkça daha güvenli tarafta moment değerleri hesaplamıştır. AISI ve DSM arasındaki moment dayanımları arasında ise DSM' nin büyük oranda güvenli tarafta moment değerleri hesapladığı görülmektedir (Şekil 7).

4 Sonuçlar

Ülkemizde soğuk şekil verilmiş çelik elemanların tasarımında kullanılan TS EN 1993-3-1 standardının C kesit şekline sahip eğilme elemanlarının tasarımında nasıl kullanıldığı kısaca açıklanmıştır. Ayrıca bu elemanların tasarımında kullanılan Amerikan standardı AISI S100-16 ve bu standardın önerdiği diğer tasarım yöntemi olan doğrudan dayanım metodunun hesaplama adımlarına kısaca

değinilmiştir. Ülkemiz çelik sektöründe kullanıma sunulan profillerden seçilen 72 adet soğuk şekil verilmiş çelik elemanın eğilme dayanımları yukarıda belirtilen üç tasarım yöntemi ile hesaplanmıştır. Çalışmanın son kısmında ise her üç yöntem ile hesaplanan dayanımlar ve burkulma modu tahminleri karşılaştırılmıştır.

Burkulma modları tahminleri karşılaştırıldığında, TS EN 1993-3-1 yapısı gereği kesitin elastik burkulma ya da yanal burulmalı burkulma yapması durumunu kontrol etmekte. Bu sebeple AISI S100 ve DSM' nin lokal burkulma olarak tahmin ettiği modu Eğilme burkulması olarak tahmin ettiği görülmektedir. Seçilen kesitlerin gövde yükseklikleri-kesit kalınlıkları oranı (gövde narinliği) arttıkça lokal burkulma modu hâkim olurken, küçük gövde narinliklerinde yanal burulmalı burkulma ve lokal-yanal burulmalı burkulma etkileşimi görülmektedir. Tasarım yapısı gereği DSM her bir burkulma modu için kritik gerilme hesapladığından burkulma modu tahminleri daha keskindir.

Bu sonuçlar ışığında soğuk şekil verilmiş çelik C elemanların gövde narinliği yüksek kesitlerde TS EN 1993-3-1 ile DSM yöntemi kullanılarak kontrol yapılması eleman güvenliği açısından fayda sağlayacaktır. Ancak düşük gövde narinliklerinde (C100, C150) tüm yöntemler birbirine yakın sonuçlar vermiştir.

Soğukta şekil verilmiş elemanlar doğaları gereği çok sayıda kesit şekline sahip olabilir. Bu sebeple her kesit şeklinin ve farklı malzeme özelliklerinin eleman davranışına olan etkisini belirlemek hem literatüre hem de sektöre önemli katkılar sağlamaktadır. Bu tür kesitler için özellikle Amerikan standartlarında sektör paydaşları için uygulamaya yönelik kesti taşıma gücü tabloları oluşturularak, bu tür kesitlerin karmaşık tasarım hesaplamaları yapmadan bir ön veri seti ortaya çıkarılmaktadır. Ülkemizde bu şekilde çalışmaların yapılmasının gerekli olduğu aşikardır.

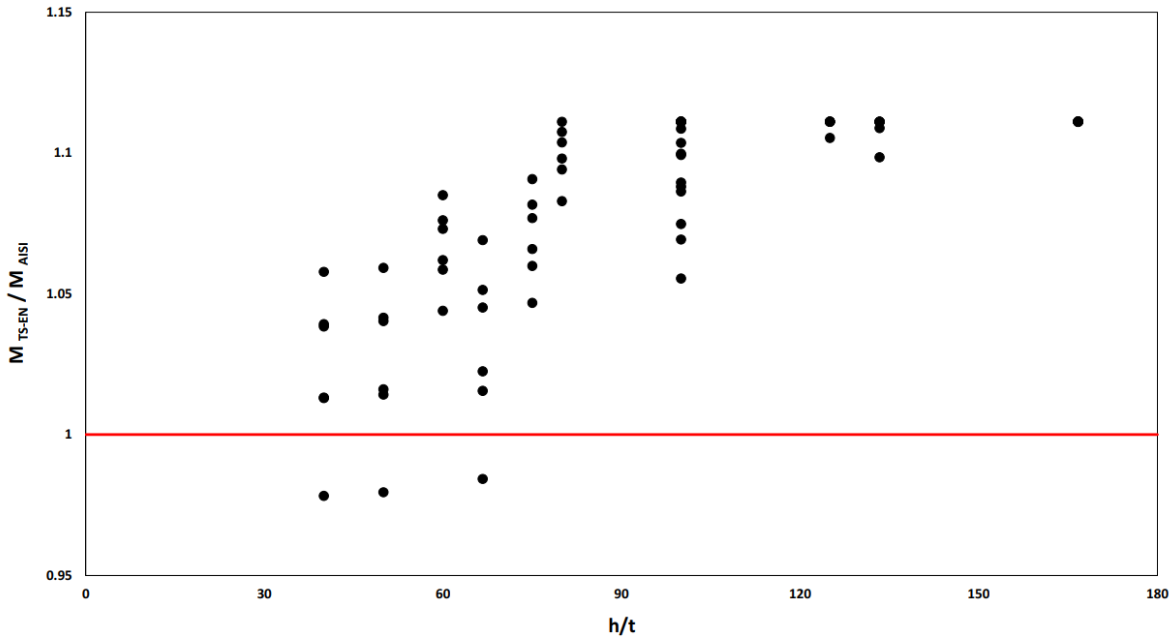
Gelecekte yapılacak çalışmalarda, soğukta şekil verilmiş çelik elemanların deneysel, torik ve numerik çalışmalar yapılması planlanmaktadır.

Tablo 2. Hesaplama sonucunda elde edilen moment değerleri

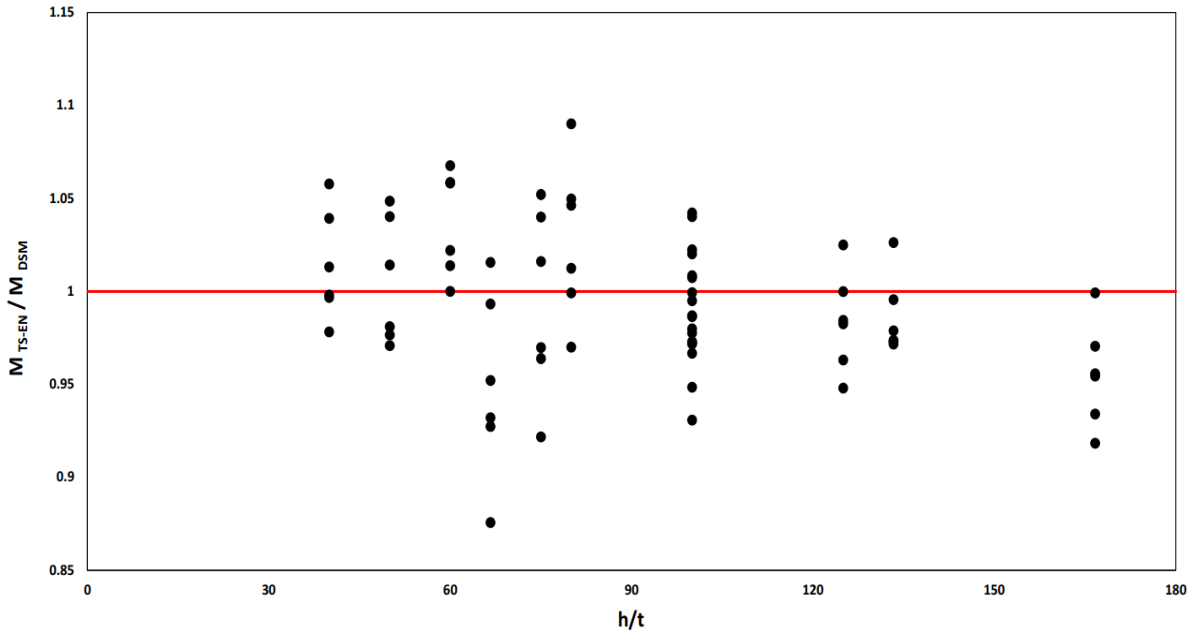
Profil ismi	TS EN 1993-3-1		AISI S100-16		DSM	
	Moment Dayanımı (kNm)	Mod.	Moment Dayanımı (kNm)	Mod.	Moment Dayanımı (kNm)	Mod.
C100.50.15.1,5	2.627	LTB	2.669	L	2.759	L+LTB
C100.50.15.2,0	3.54	LTB	3.614	L	3.625	L+LTB
C100.50.15.2,5	4.367	LTB	4.464	L	4.464	L+LTB
C100.60.15.1,5	2.911	LTB	2.847	L	3.123	L+LTB
C100.60.15.2,0	4.032	LTB	3.968	L	4.11	L+LTB
C100.60.15.2,5	5.078	LTB	5.013	L	5.088	L+LTB
C100.70.15.1,5	3.05	LTB	2.901	L	3.483	L+LTB
C100.70.15.2,0	4.461	LTB	4.283	L	4.595	L+LTB
C100.70.15.2,5	5.652	LTB	5.443	L	5.671	L+LTB
C100.50.25.1,5	2.941	LTB	2.896	L+LTB	2.896	L+LTB
C100.50.25.2,0	3.862	LTB	3.808	L+LTB	3.808	L+LTB
C100.50.25.2,5	4.757	LTB	4.695	L+LTB	4.695	L+LTB
C100.60.25.1,5	3.24	LTB	3.1	L	3.262	L+LTB
C100.60.25.2,0	4.466	LTB	4.293	L+LTB	4.293	L+LTB
C100.60.25.2,5	5.506	LTB	5.298	L+LTB	5.298	L+LTB
C100.70.25.1,5	3.344	LTB	3.128	L	3.606	L
C100.70.25.2,0	5.011	LTB	4.731	L+LTB	4.779	L+LTB
C100.70.25.2,5	6.242	LTB	5.901	L+LTB	5.901	L+LTB
C150.70.20.1,5	5.408	LTB	5.124	L	5.81	L
C150.70.20.2,0	7.852	LTB	7.501	L	7.55	L
C150.70.20.2,5	9.932	LTB	9.514	L	9.718	L+LTB
C150.80.20.1,5	5.577	LTB	5.189	L	5.88	L
C150.80.20.2,0	8.328	LTB	7.813	L	8.587	L+LTB
C150.80.20.2,5	10.777	LTB	10.148	L	10.63	L+LTB
C150.90.20.1,5	5.694	LTB	5.226	L	5.89	L
C150.90.20.2,0	8.582	LTB	7.934	L	9.31	L+LTB
C150.90.20.2,5	11.541	LTB	10.725	L	11.54	L+LTB
C150.70.30.1,5	5.772	LTB	5.398	L	5.904	L
C150.70.30.2,0	8.617	LTB	8.13	L	8.19	L+LTB
C150.70.30.2,5	10.733	LTB	10.139	L+LTB	10.139	L+LTB
C150.80.30.1,5	5.888	LTB	5.42	L+LTB	6.059	L
C150.80.30.2,0	9.066	LTB	8.419	L+LTB	8.922	L+LTB
C150.80.30.2,5	11.798	LTB	10.995	L+LTB	11.051	L+LTB
C150.90.30.1,5	5.956	LTB	5.416	L+LTB	6.126	L

Tablo 2. (Devam) Hesaplama sonucunda elde edilen moment değerleri

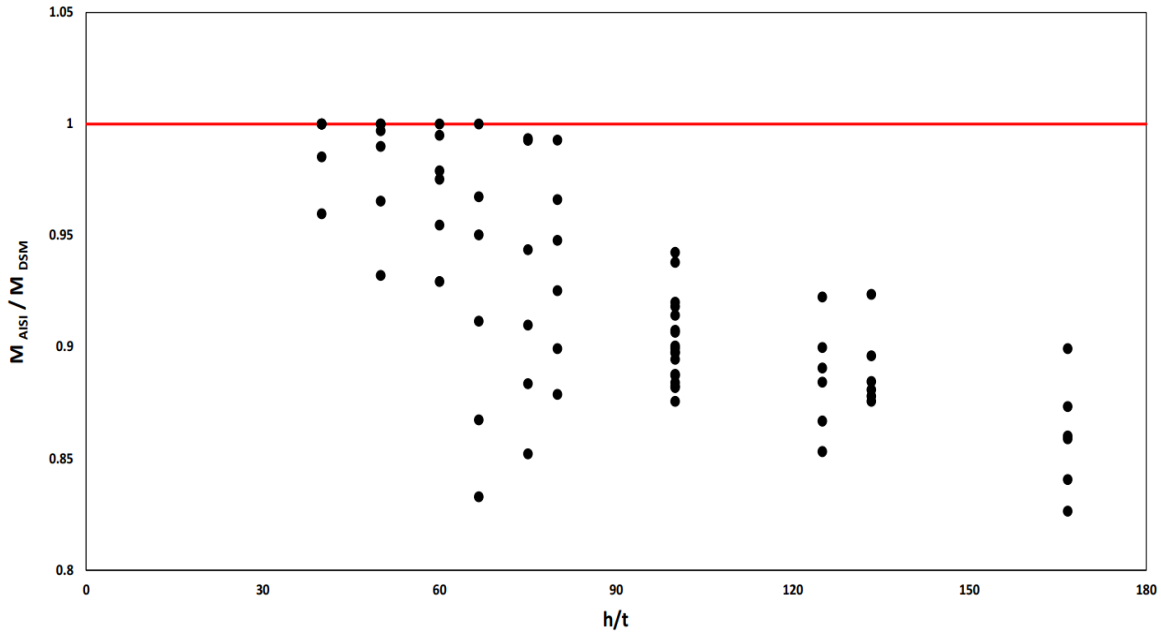
C150.90.30.2,0	9.306	LTB	8.532	L+LTB	9.655	L+LTB
C150.90.30.2,5	12.66	LTB	11.668	L+LTB	11.964	L+LTB
C200.90.30.1,5	8.378	F+LTB	7.627	L	8.622	L
C200.90.30.2,0	13.457	F+LTB	12.368	L	13.734	L
C200.90.30.2,5	18.106	F+LTB	16.72	L	17.306	L+LTB
C200.100.30.1,5	8.479	F+LTB	7.647	L	8.709	L
C200.100.30.2,0	13.739	F+LTB	12.498	L	13.921	L
C200.100.30.2,5	18.758	F+LTB	17.144	L	18.528	L+LTB
C200.110.30.1,5	8.508	F+LTB	7.657	L	8.743	L
C200.110.30.2,0	13.965	F+LTB	12.597	L	14.036	L
C200.110.30.2,5	19.158	F+LTB	17.357	L	19.75	L+LTB
C200.90.50.1,5	8.864	F+LTB	7.978	L	8.637	L
C200.90.50.2,0	14.336	F+LTB	12.99	L	13.783	L
C200.90.50.2,5	19.858	F+LTB	18.085	L	18.216	L+LTB
C200.100.50.1,5	8.835	F+LTB	7.952	L	8.874	L
C200.100.50.2,0	14.518	F+LTB	13.066	L	14.2	L
C200.100.50.2,5	20.404	F+LTB	18.424	L	19.438	L+LTB
C200.110.50.1,5	8.797	F+LTB	7.917	L	8.987	L
C200.110.50.2,0	14.567	F+LTB	13.11	L	14.459	L
C200.110.50.2,5	20.643	F+LTB	18.579	L	20.66	L+LTB
C250.120.50.1,5	11.447	F	10.302	L	11.994	L
C250.120.50.2,0	19.034	F	17.131	L	19.371	L
C250.120.50.2,5	27.802	F	25.022	L	27.82	L
C250.130.50.1,5	11.37	F	10.233	L	12.172	L
C250.130.50.2,0	18.96	F	17.064	L	19.685	L
C250.130.50.2,5	27.872	F	25.084	L	28.254	L
C250.140.50.1,5	11.265	F	10.138	L	12.267	L
C250.140.50.2,0	18.834	F	16.95	L	19.867	L
C250.140.50.2,5	27.852	F	25.067	L	28.625	L
C250.120.70.1,5	11.707	F	10.537	L	11.717	L
C250.120.70.2,0	19.485	F	17.536	L	19.01	L
C250.120.70.2,5	28.5	F	25.65	L	27.347	L
C250.130.70.1,5	11.654	F	10.488	L	12.008	L
C250.130.70.2,0	19.445	F	17.5	L	19.448	L
C250.130.70.2,5	28.608	F	25.748	L	28.042	L
C250.140.70.1,5	11.599	F	10.439	L	12.136	L
C250.140.70.2,0	19.393	F	17.545	L	19.7	L
C250.140.70.2,5	28.681	F	25.813	L	28.442	L



Şekil 4. M_{TS-EN} / M_{AISI} gövde narinliğine göre değişimi



Şekil 5. M_{TS-EN} / M_{DSM} gövde narinliğine göre değişimi



Şekil 6. M_{AISI} / M_{DSM} gövde narinliğine göre değişimi

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı: (iThenticate): %5

Kaynaklar

[1] K. Piyawat, C. Ramseyer and T.H.K. Kang, Development of an axial load capacity equation for doubly symmetric built-up cold-formed sections, Journal of Structural Engineering, 139(2), 789-803, 2013. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000780

[2] T. Von Karman, E.E. Sechler and L. H. Donnell, The strength of thin plates in compression. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 54(2), 53-56,1932. https://doi.org/10.1115/1.4021738

[3] G. Winter, Strength of thin steel compression flanges, Transactions of the American Society of Civil Engineers, 112(1), 527-554, 1947. https://doi.org/10.1061/TACEAT.0006092

[4] B.W. Schafer and T. Peköz, Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic buckling solutions. 14th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, pp 69-76, St. Louis, Missouri U.S.A, October 15-16, 1998.

[5] TS EN 1993-1-3, Çelik yapıların projelendirilmesi-Bölüm 1-3: Genel kurallar- Soğukta biçimlendirilmiş

ince ölçülü elemanlar ve saçla kaplama için. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2007.

[6] AISI S100-16, North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. American Iron and Steel Institute, Washington, DC, 2016.

[7] EN 1993-1-3 (2006) (English): Eurocode 3: Design of steel structures- Part 1-3: General rules-Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. 2006, The European Union Per Regulation: Brussels.

[8] D. Dubina, V. Ungureanu and R. Landolfo, Design of Cold-formed Steel Structures: Eurocode 3: Design of Steel Structures, European Convention for Constructional Steelwork, 2012.

[9] C.D.Moen and B. W. Schafer, Direct Strength Method for Design of Cold-Formed Steel Columns with Holes, Journal of structural engineering, 137(5), 559-570, 2011. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000310

[10] B.W. Schafer, Review: The Direct Strength Method of cold-formed steel member design. Journal of Constructional Steel Research, 64(7-8), 766-778, 2008. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.01.022

[11] C. Yu and B.W. Schafer, Local buckling tests on cold-formed steel beams, Journal of structural engineering, 129(12),1596-1606,2003. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:12(1596)

[12] C. Yu and B.W. Schafer, Distortional buckling tests on cold-formed steel beams. Journal of structural engineering,132(4),515-528,2006. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:4(515)

[13] E.D. Batista, Local-global buckling interaction procedures for the design of cold-formed columns: Effective width and direct method integrated approach. Thin-Walled Structures, 47(11), 1218-1231, 2009. https://doi.org/10.1016/j.tws.2009.04.004

[14] E.D. Batista, Effective section method: A general direct method for the design of steel cold-formed members under local-global buckling interaction. Thin-Walled Structures, 48(4-5), 345-356, 2010. https://doi.org/10.1016/j.tws.2009.11.003

[15] P.B. Dinis and D. Camotim, Local/distortional mode interaction in cold-formed steel lipped channel beams. Thin-Walled Structures, 48(10-11), 771-785, 2010. https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.01.005

[16] L. Laim, J.P.C. Rodrigues, and L.S. da Silva, Experimental and numerical analysis on the structural behaviour of cold-formed steel beams. Thin-Walled Structures,72,1-13,2013. https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.06.008

[17] M. Anbarasu, Local-distortional buckling interaction on cold-formed steel lipped channel beams. Thin-Walled Structures, 98, 351-359, 2016. https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.10.003

[18] A.D. Martins et al., Distortional failure of cold-formed steel beams under uniform bending: Behaviour, strength and DSM design. Thin-Walled Structures, 118,196-213,2017. https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.04.009

[19] S.G. Fan et al., Experimental study and numerical simulation analysis of distortional buckling capacity of stainless steel lipped C-section beams. Engineering Structures,250,2022. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113428

[20] Johns Hopkins University, CUFSM (version 5.04) Finite strip elastic buckling analysis program, 〈 http://www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm/〉, 2020.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 074-083

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Usage of boroxide and ulexite ores in ferromanganese production

Boroksit ve üleksit cevherlerinin ferromangan üretiminde kullanımı

Mustafa Engin Kocadağistan[1,*], Mehmet Zinnur Ayşen[2], İsmail Seçkin Çardaklı[3]

[1,2,3] *Atatürk University, Engineering Faculty, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 25240, Erzurum, Türkiye*

Abstract

This study investigated the possibilities of using low-grade manganese ores in ferromanganese production by smelting process. It is aimed to increase the consumption areas of boron ores. Fluorspar, ulexite, and boroxide were added to manganese ores, and slag fluidity at determined temperatures was examined. Reference samples without flux were used for comparison. The charge materials were melted in graphite crucibles at 1650 °C for 2 hours. The metal/slag phases were separated from each other and their chemical analyses were made. At the end of the experiments, thanks to boron ores, Mn leakage in the slag phase was reduced to a minimum, while 99% Mn was obtained in the metal phase. As a result, it has been determined that the slag fluidity increases more with boron ores (compared to fluorspar), the smelting time decreases, it is possible to use boron ores in ferromanganese production, and their usage areas can be increased.

Keywords: Ferromanganese, Ulexite, B_2O_3, CaF_2, Smelting, Manganese

Öz

Bu çalışmada, düşük tenörlü mangan cevherlerinin ergitme prosesi ile ferromangan üretiminde kullanım olanakları araştırılmıştır. Bor cevherinin tüketim alanlarının arttırılması hedeflenmektedir. Manganez cevherlerine fluorspat, üleksit ve boroksit ilave edilerek cürufun belirlenen sıcaklıklarda akışkanlığı incelenmiştir. Karşılaştırma için flaksız referans numuneleri kullanılmıştır. Şarj malzemeleri kapaklı grafit potalara konularak 1650 °C sabit sıcaklıkta 2 saat ergitilmiştir. Metal/cüruf fazları birbirinden ayrılarak kimyasal analizleri yapıldı. Deneyler sonunda bor cevheri sayesinde cüruf fazında Mn sızıntısı minimuma indirilirken, metal fazında ise %99 Mn elde edilmiştir. Sonuç olarak bor cevherleri ile cüruf akışkanlığının daha fazla arttığı (fluorspat ile karşılaştırıldığında) ve erime süresinin azaldığı, bor cevherlerinin ferromangan üretiminde kullanılmasının mümkün olduğu ve kullanım alanlarının arttırılabileceği tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Ferromanganez, Üleksit, B_2O_3, CaF_2, Ergitme, Manganez

1 Introduction

Manganese has an important role in the iron and steel industry. As an alloying element, Manganese ore increases its toughness, strength, machinability, hardenability, and wear resistance when used in iron-containing products and steels [1]. Manganese ore has two significant properties in steelmaking: its ability to combine with sulfur to form MnS (manganese sulfide) and its deoxidation capacity [2]. Enhances machinability by integrating with sulfur to form a soft inclusion (MnS) in the steel, enabling a consistent built-up edge along with a place for the chip to break. In steels, manganese enhances strength, stiffness, hardness, toughness, hardenability, wear resistance as well as forging and rolling qualities [3]. The chemical properties of manganese ore are similar to those of iron ore. It oxidates in a humid environment. As the temperature increases, it shows a combustion reaction with oxygen and air. It can be decomposed from water at high temperatures. It is easily soluble in diluted mineral acids and releases hydrogen gas. It can form compounds by reacting with many elements such as halogens, nonmetals, sulfur, carbon, oxygen, and nitrogen [4]. It can easily form compounds with oxygen, sulfur, and phosphorus in smelting over 1244°C. For this reason, it is used in the removal of oxygen, phosphorus, and sulfur from metals and especially iron. It forms various alloys with iron, silicon, copper, and aluminum. Ferromanganese (78% Mn) and silicomanganese (65-70% Mn) are the most commonly used alloys. Most of the manganese produced in the world (about 90 percent) is used in the steel industry as an alloying material [5]. Forging, durability, toughness, abrasion, rigidity, and hardness properties of steel can be improved by manganese. Manganese can also be used to remove oxygen and sulfur from steel [6]. Fluorite (fluorspar-CaF_2) contains 51.3% Ca and 48.7% F when pure and is used as a fluxing reagent in metallurgy. The development of basic steel production methods has also increased fluorite production. The use of boron minerals instead of fluorite in the iron and steel industry and ferroalloy production is also becoming widespread. A compact structure slag can be obtained by adding boron products to the slag pollinated in the iron and steel industry. In the iron and steel industry, compact structure slag can be obtained by adding boron products to the dusting slag. Using colemanite with fluorite in steelmaking slag prevents slag dusting. In addition, powder slag, which is an environmental problem, can be converted into a compact structure as a recyclable product [7, 8]. Blast furnace slag is formed as a result of metallurgical processes in blast furnaces in iron and steel plants. The charge rate of

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mengink@atauni.edu.tr (M. E. Kocadağistan)
Geliş / Recieved: 25.08.2023 Kabul / Accepted: 21.10.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngmuh.1349906

the raw material and the smelting processes affect the chemical structure of the slag. The amount of slag varies according to the amount of material charged. Approximately 0.2-0.6 ton of slag can be obtained from 1 ton of melted hot metal. It contains (by weight) 0.5-0.8% FeO, 35-42% CaO, 35-40% SiO_2, 8-9% MgO, 8-15% Al_2O_3, 0.3-1.0% MnO and 0.7-1.5% S. In the production of high-carbon ferromanganese, there is approximately 20% MnO in the slag composition [9]. This ratio is quite high, especially when considering low-grade manganese ores. This situation also increases the cost of ferromanganese production. For this, it is very important to increase the fluidity of the slag and to reduce the slag smelting temperature. Manganese losses are at maximum levels in the smelting processes with fluorspar, and research is carried out for the use of other fluxes instead of fluorspar. Several studies indicate that boron ores can be used as a replacement product for fluorspar in the iron-steel and ferromanganese production [7, 10-12]. Ferroalloys are used in steel production to remove unwanted elements, control graphite formation, and produce other alloys. According to the purposes of use; it is used to provide metal solidification, to give the final composition to the molten steel as desired, and to make the final deoxidation [13]. In research on the role of carbon in ferromanganese alloy, it has been reported that carbon increases the lattice parameter and product strength of γ-Fe-Mn alloys and strongly suppresses the martensitic transformation (γ→ε) [14-16].

In this study, it was determined that boron ores used instead of fluorspar reduced the manganese leakage in the slag to 1% and increased the manganese in the metal phase to 99%. As a result, it was determined that the fluidity of slag increased more than fluorspar and the smelting time decreased, and it is possible to use boron ores in ferromanganese production.

2 Material and methods

Boron ores used in the experiments were obtained from the Balıkesir Bigadiç region and manganese ore from the Erzincan-Kemaliye region as run-of-mine. The analyzes of the ores and activated carbon were made in the laboratories of Atatürk University East Anatolia High Technology Application and Research Center (DAYTAM) with the ICP-MS device, and the results are given in Table 1. CaF_2 (fluorspar), CaO and Activated carbon were purchased commercially.

CaF_2 (fluorspar) and CaO with a purity of 99% and a size of 45 microns were used in smelting experiments to compare with boron ores. Activated carbon was used in smelting experiments instead of coke powder. The ores were crushed in a jaw crusher, ground in a ball mill, and sieved with a mechanical sieve for grain size classification. Dimensions of crucibles used in smelting experiments; wall thickness=5 mm, height=120 mm, base thickness=5 mm, and Ø=70 mm, conical shaped, and maximum operating temperature is 3000 °C and made of extruded clay unbound graphite material. The crucible covers have a 10 mm diameter hole in the middle for the gas outlet (Figure 1).



Figure 1. Graphite crucibles used in the experiments

Smelting experiments were carried out in an atmosphere-controlled laboratory furnace (ACF 17/12, maximum temperature 1700 °C, continuous use temperature 1650 °C, and internal volume 12 liters). The calcination process was carried out in a muffle furnace with a maximum temperature of 1200 °C. The ores were classified in -325 mesh grain size by sieving process and used in the experiments.

Two different studies were carried out for calcination processes. In order to remove the natural moisture of manganese ores, they were kept in a drying oven at approximately 120 °C for 8 hours. For ulexite ore, TGA analyses were made according to the results obtained, and the calcination process was applied in the muffle furnace at selected temperatures.

Table 1. Chemical analysis results of the ores and activated carbon used in the experiments

Ore	B	Na	Mg	P	K	Ca	Sr	Ba	Si	Al	Mn	Fe
	Concentration (%)											
Ulexite (calcined)	12.95	3.66	1.71	0.003	0.01	4.22	1.04	0.01	0.18	-	-	-
B_2O_3	29.56	0.06	0.03	0	0.01	0.03	0.001	0	0.01	-	-	-
Manganese ore	-	0.03	0.98	0.1	0.034	0.85	-	-	0.1	0.67	36.3	6.2

	sulfur	ash	humidity	Volatile matter	fixed carbon
Activated carbon (weight-%)	0.028	0.84	0.29	3.48	95.36

TGA analysis results are given in Figure 2. According to the TGA results, it was determined that the chemically bound water contained in 1 g of ore was completely removed after 6 hours at a temperature of approximately 400°C. According to these results, the calcination process was applied to ulexite ore and it was used in smelting experiments.

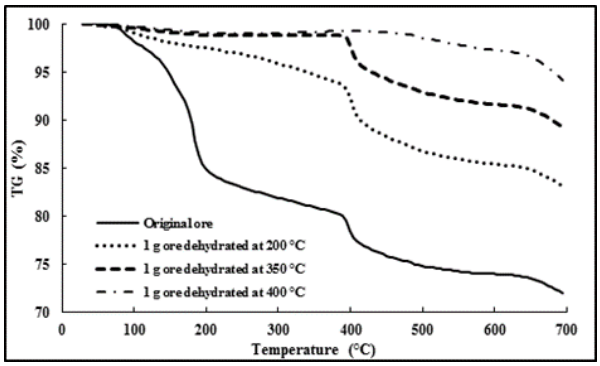


Figure 2. TGA analysis of ulexite ore

The experimental plan of the smelting experiments is given in Table 2. Fluorspar, ulexite, and B_2O_3 added samples, and reference samples without any fluxes were prepared for smelting experiments.

Depending on the fluxes used in the experiments, coding was done according to the basicity ratios, and this coding was used in all experiments. According to the coding;

- **R1**= reference sample with 1% basicity
- **R1.25**= reference sample with 1.25% basicity
- **U1-1**= The charge material consisting of 1 basicity and 2.5% ulexite ore
- **U1-1.25**= The charge material consisting of 1.25 basicity and 2.5% ulexite ore
- **U2-1**= The charge material consisting of 1 basicity and 5% ulexite ore
- **U2-1.25**= The charge material consisting of 1.25 basicity and 5% ulexite ore
- **B1-1**= The charge material consisting of 1 basicity and 2.5% B_2O_3 ore
- **B1-1.25**= The charge material consisting of 1.25 basicity and 2.5% B_2O_3 ore
- **B2-1**= The charge material consisting of 1 basicity and 5% B_2O_3 ore
- **B2-1.25**= The charge material consisting of 1.25 basicity and 5% B_2O_3 ore
- **C1-1**= The charge material consisting of 1 basicity and 2.5% fluorspar
- **C1-1.25**= The charge material consisting of 1.25 basicity and 2.5% fluorspar
- **C2-1**= The charge material consisting of 1 basicity and 5% fluorspar
- **C2-1.25**= The charge material consisting of 1.25 basicity and 5% fluorspar

As an example of how the samples used in smelting experiments are prepared; The mixing ratios for sample **R1** are as follows: for 1 basicity (CaO/SiO_2=1); 100 g manganese ore, 15 g activated carbon (0.15), and 10 g CaO. The mixing ratios for sample **R1-1.25** are as follows: for 1.25 basicity (CaO/SiO_2=1.25); 100 g manganese ore, 15 g activated carbon (0.15), and 15 g CaO. The mixing ratios for sample **U1-1** are as follows: 100 g manganese ore, 15 g activated carbon (0.15), 10 g CaO and 3.125 g (2.5% of the total charge) ulexite for 1 basicity (CaO/SiO_2=1). The mixing ratios for sample **B1-1** are as follows: 100 g manganese ore, 15 g activated carbon (0.15), 10 g CaO and 3.125 g (2.5% of the total charge) B_2O_3 for 1 basicity (CaO/SiO_2=1). The mixing ratios for sample **C1-1** are as follows: 100 g manganese ore, 15 g activated carbon (0.15), 10 g CaO and 3.125 g (2.5% of the total charge) fluorspar for 1 basicity (CaO/SiO_2=1).

Table 2. Compositions of metal and slag obtained at the end of smelting experiments

Sample no		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Activate C/ore		0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Charge basicity (%)		1	1.25	1	1	1	1	1	1	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
Code		**R1**	**R1.25**	**U1-1**	**U2-1**	**B1-1**	**B2-1**	**C1-1**	**C2-1**	**U1-1.25**	**U2-1.25**	**B1-1.25**	**B2-1.25**	**C1-1.25**	**C2-1.25**
Flax amount(g)	**Ulexite**	0	0	**2.5**	**5**	0	0	0	0	**2.5**	**5**	0	0	0	0
	B_2O_3	0	0	0	0	**2.5**	**5**	0	0	0	0	**2.5**	**5**	0	0
	fluorspar	0	0	0	0	0	0	**2.5**	**5**	0	0	0	0	**2.5**	**5**
Weight (g)	**Metal**	40	41.05	42.19	45.22	45.12	50.87	40.06	43.06	42.75	46.80	45.98	51.75	40.69	43.68
	Slag	37.17	38.42	29.79	21.37	24.84	10.48	33.46	32.63	30.88	22.15	26.01	11.22	34.03	33.13
	Slag / Metal	0.93	0.94	0.71	0.47	0.55	0.21	0.84	0.76	0.72	0.47	0.57	0.22	0.84	0.76
Alloy composition (%)	**Mn**	60.38	65.07	72.35	81.20	73.49	82.17	69.89	78.76	72.7	82.08	75.03	83.36	70.88	79.0
	Fe	13.70	13.54	13.05	12.73	12.89	12.48	13.94	13.37	12.85	12.54	12.70	12.40	13.85	13.02
	Si	0.67	0.60	0.61	0.52	0.57	0.50	02.69	01.70	0.59	0.49	0.51	0.44	2.51	1.62
	C	6.91	6.05	6.79	6.72	6.71	6.54	6.93	6.98	6.70	6.68	6.60	6.27	6.90	6.85
	S	0.010	0.010	0.040	0.060	0.018	0.020	0.003	0.002	0.040	0.060	0.017	0.019	0.003	0.002
	P	0.22	0.22	0.22	0.21	0.21	0.20	0.205	0.20	0.21	0.20	0.20	0.20	0.209	0.202
	B	0.02	0.01	0.29	0.55	0.83	1.85	0	0	0.30	0.55	0.84	1.87	0	0
Slag composition (%)	**CaO**	29.12	34.13	37.48	42.43	38.40	47.89	54.42	52.36	41.72	47.61	43.96	50.43	60.37	58.86
	MnO	15.71	14.17	4.76	1.45	2.76	0.88	23.26	22.66	3.61	1.15	2.03	0.63	21.76	21.97
	SiO_2	37.65	38.25	36.88	36.56	32.27	29.53	58.46	59.70	37.20	37.39	34.07	30.04	60.34	61.5
	Fe_2O_3	0.209	0.216	0.086	0.029	0.133	0.003	0.180	0.20	0.086	0.029	0.127	0.003	0.185	0.229
	Al_2O_3	3.09	2.91	3.51	3.95	3.87	4.43	10.60	10.28	3.04	3.82	3.78	4.10	10.58	10.22
	MgO	4.15	3.92	4.07	5.27	4.62	5.72	5.47	5.02	4.58	5.02	4.28	5.35	5.20	4.98
	B_2O_3	0.31	0.25	2.01	4.09	5.54	9.99	0	0	1.94	4.84	5.51	9.86	0	0

These prepared charge materials were placed in the high-temperature furnace in graphite crucibles and the experiment began. The experiments were carried out in accordance with the experimental plan by smelting it at 1650 °C for 2 hours. After the furnace cooled down, the crucibles were broken. The slag and metal phases were sensitively separated from each other, weighed on a precision scale, and analyzed with ICP-MS. Using the data obtained as a result of ICP-MS, the amounts of B_2O_3, and the other compositions were calculated with the stoichiometric. Table 2 was created with the concentration values found.

3 Results and discussions

3.1 Effect of bacisity

In this study, the charge basicity was defined as the ratio of the total weight of CaO to the total weight of SiO_2 in the charge. Slag basicity was adjusted by adding CaO (%99.99 purity) to the charge.

The reduction of the primary oxides from the slag by carbon is shown in Equations 1 and 2 reactions [16]:

$$MnO + C(s) = Mn + CO(g) \quad (1)$$

$$SiO_2 + 2C(s) = Si + 2CO(g) \quad (2)$$

Change in the slag basicity affects the activity coefficients of the oxides. The increase in slag basicity increases the activity coefficient of MnO in the slag phase and decreases that of SiO_2. Thus, while it becomes easier for MnO to be reduced to the metal phase, it becomes difficult to reduce SiO_2 (Equations 1 and 2). This situation also coincides with the experimental results [16].

In the slag phase, the MnO concentrations of samples with a basicity of 1.25 are lower than the MnO concentrations of samples with a basicity of 1.00 (Figure 3c). When the **R**, **C**, **U**, and **B** samples in the slag phase are compared, the sample with the lowest MnO concentration is **B2-1.25**. The lowest MnO concentrations were obtained in samples **B** and **C**. While the highest MnO concentrations were obtained in **R** samples, MnO concentrations in **C** samples were lower than **R**'s and higher than in **U** and **B** samples. The SiO_2 concentrations of samples with a basicity of 1.25 in the slag phase are higher than the samples with a basicity of 1.00 (Figure 3d). However, when the **R**, **C**, **U**, and **B** samples in the slag phase are compared, the sample with the highest SiO_2 concentration is **C2-1.25**. SiO_2 concentrations determined in **R** samples are higher than **B** and **U** samples, and lower than **C** samples [16, 17]. In terms of the effect of basicity on the slag phase, the best results were obtained in the experiments using B_2O_3 ores with 1 and 1.25 basicity and 5 g flux addition.

In the metal phase, the Mn concentrations of samples with a basicity of 1.25 are higher than those of samples with a basicity of 1.00. When **R**, **C**, **U** and **B** samples in the metal phase are compared, the sample with the highest Mn concentration is **B2-1.25** (Figure 3a). The lowest Mn concentrations were obtained in **R** samples, while **C** samples were higher than **R** samples but lower than **U** samples. The Si concentrations of the samples with a basicity of 1.25 in the metal phase are lower than the samples with a basicity of 1.00 (Figure 3b).

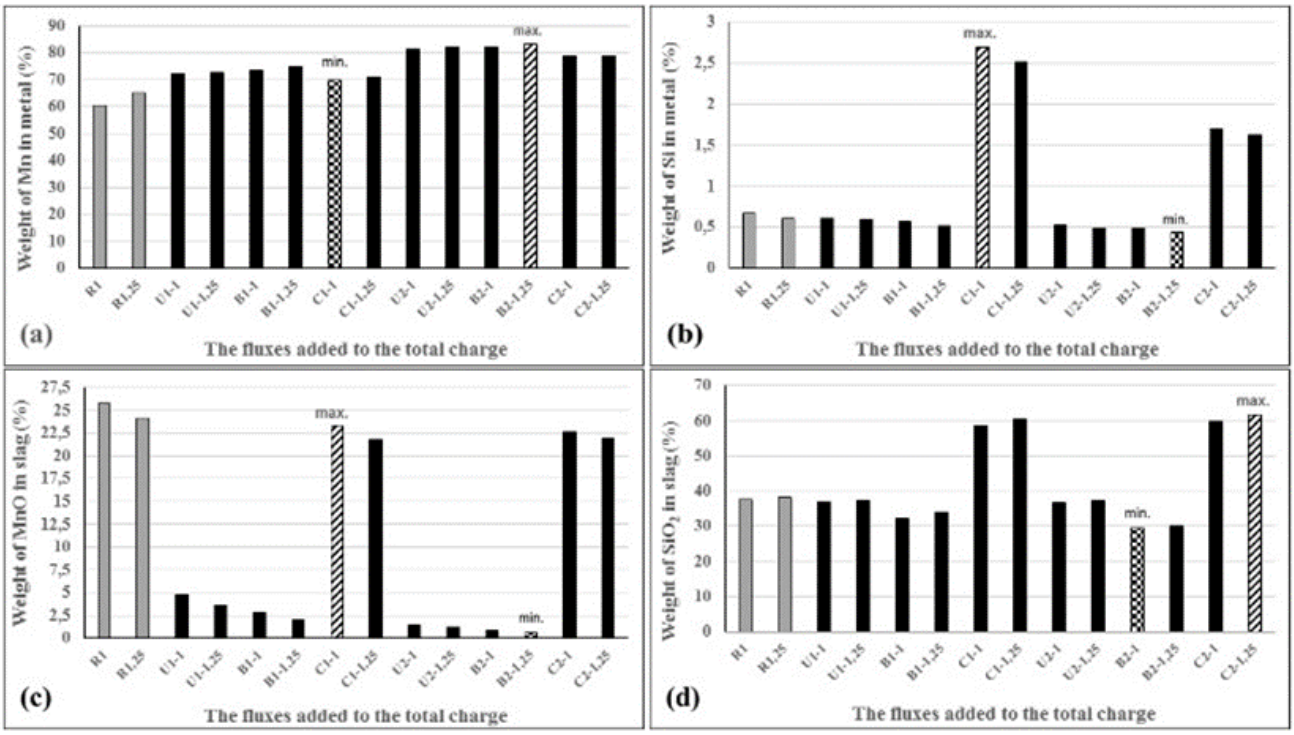


Figure 3. The amounts of Mn (a) and Si (b) obtained in the metal phase, and the amount of MnO (c) and SiO_2 (d) obtained in the slag phase at the end of the smelting experiments

However, when the **R**, **C**, **U**, and **B** samples in the metal phase are compared, the sample with the highest Si concentration is **C1-1**, and it is approximately 3 times higher than the other samples. Si concentrations determined in **R** samples are higher than **B** and **U** samples, and lower than **C** samples. In terms of the effect of basicity on the metal phase, the best results were obtained in experiments using boron ores with 1.25 basicity and 5 g flux addition.

The amount of CaO at 1.25 basicity was determined at higher rates than at 1.00 basicity. (Figure 4a). Adding CaO to the charge to adjust the basicity caused the CaO amounts to be high. The highest CaO amounts were detected in samples **C1-1.25** and **C2-1.25**. It was determined that the amounts of CaO and Si were much less in the samples where boron ore was added instead of fluorspar (Figure 3b, Figure 4a). In studies on the smelting of manganese ore, it has been reported that with the addition of CaF_2 to the system, silicon reacts with CaF_2, and the silicon content in the metal decreases, which is due to the increase in the amount of CaO in the slag (Equation 3) [16,17].

$$SiO_2 + 2CaF_2 = SiF_4(g) + 2CaO \quad (3)$$

As a result, it was determined that as the basicity increased, Mn, CaO, and Si ratios in boron-added samples were at better values than in fluorspar-added samples (both in the metal phase and the slag phase). It was determined that basicity did not have a significant effect on the amounts of Fe, C, S, P, and B in the metal phase, and the concentrations were below 1% in all samples.

3.2 Effect of Fluorspar addition

Fluorspar, which is used to produce steel in blast furnaces, iron, and electric furnaces, decreases the smelting temperature of the slag, increases its fluidity, and facilitates the mixing of sulfur and phosphorus in the iron into the slag. It also increases the smelting rate of the lime in the slag. Thanks to the addition of fluorspar, the metal-slag separation in the system improves due to the increase in slag fluidity [1, 12, 16]. In the smelting experiments using fluorspar, the best results for slag-metal separation were obtained in the sample **C2-1.25** (1.25 basicity and 5 g fluorspar added) compared to the **R1 and R1.25** samples.

Effect of fluorspar on Mn and MnO changes in metal and slag phases: Mn concentrations increased in all samples in the metal phase. Compared to **R** samples, Mn concentrations were higher in **C** samples.

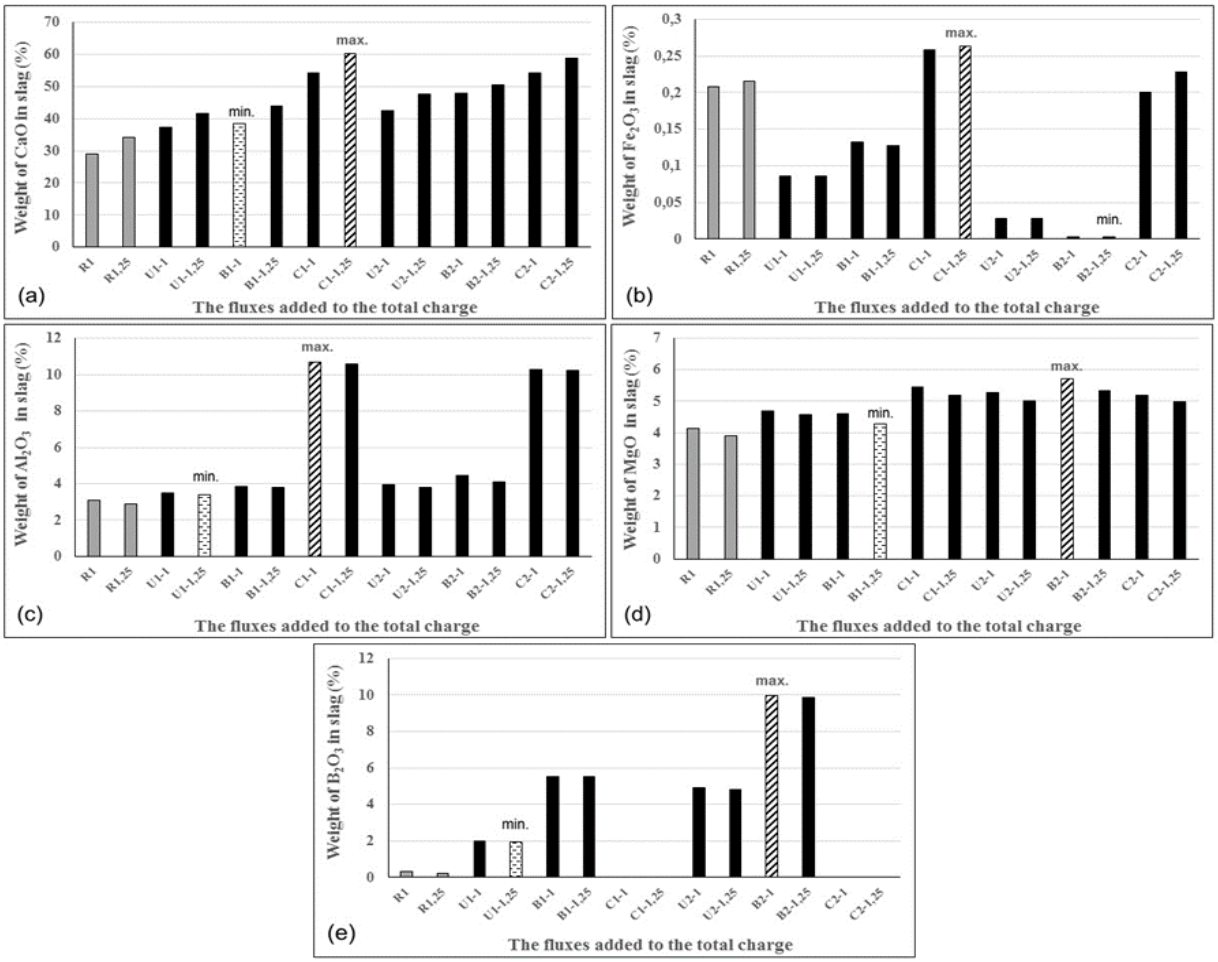


Figure 4. The amounts of CaO (a), Fe_2O_3 (b), Al_2O_3 (c), MgO (d), and B_2O_3 (e) obtained in the slag phase at the end of the smelting experiments

The highest Mn concentration increase rate was determined in the **C2-1.25** sample, with approximately 30%. Here, it can be seen that fluorspar is more effective at the melting temperature compared to **R** samples [1, 16, 17, 19]. In the slag phase, MnO concentrations are slightly lower in **C** samples compared to **R** samples. The highest MnO concentration was determined in sample **C1-1**. Compared to the MnO concentration values of **B** and **U** samples, it is seen that adding fluorspar does not have much effect on preventing MnO leakage in the slag phase (Table 2, Figure 3a, Figure 3c).

Effect of fluorspar on Si and SiO_2 changes in metal and slag phases: Si and SiO_2 concentrations in the metal and slag phases increased in **C** samples compared to **R** samples. The highest Si concentration in the metal phase was detected in the **C1-1** sample, and the highest SiO_2 concentration in the slag phase was detected in the **C2-1.25** sample. Approximately 4-5 times more Si concentration was measured in **C** samples in the metal phase. In the slag phase, this increase is approximately 60%. Considering the **B** and **U** samples, it is seen that fluorspar does not have much effect, especially in preventing more than desired Si transition to the metal phase (Table 2, Figures 3b and 3d) [16-18, 20-22].

Effect of fluorspar on Fe and Fe_2O_3 changes in metal and slag phases: The highest Fe concentration in the metal phase was obtained in the **C1-1** sample. The highest Fe_2O_3 concentration in the slag phase was obtained in the **C1-1.25** sample (Table 2, Figure 5a, Figure 4a, 4b). Fe concentrations in the metal phase are close values in all samples. It is known that in the production of high-carbon ferromanganese, almost all of the iron oxides in the ore are reduced [1, 12, 16, 18]. The fact that Fe_2O_3 in the slag phase is higher in **C** samples (especially compared to **B** samples) can be explained by the fact that the fluidity of the slag increases thanks to boron ores, and the reduction becomes easier.

Effect of fluorspar on C, S and P changes in metal and slag phases: The highest S concentration in the metal phase was obtained in the **U2-1.25** sample, and the P concentration was obtained in the **U1-1** sample. The lowest concentration values were detected in the **C2-1.25** sample. P concentrations were around 0.2% in all experiments. When the S concentrations were examined, the amount of **S** concentration obtained in the **C** samples was 0.01%, while it was 0.06% in the **U2-1.25** sample, where the maximum concentration was obtained. According to these results, it can be said that the effect of **C**, **B**, and **U** samples on S and P reduction in ferromanganese production is negligible (Figure 5c, 5d). When the carbon values in the metal phase were examined, the highest carbon concentration was obtained in the **C2-1** sample, while the lowest carbon concentration was obtained in the **B2-1.25** sample. These results are similar to the concentration values of S and P, and the same comments can be made (Figure 5b).

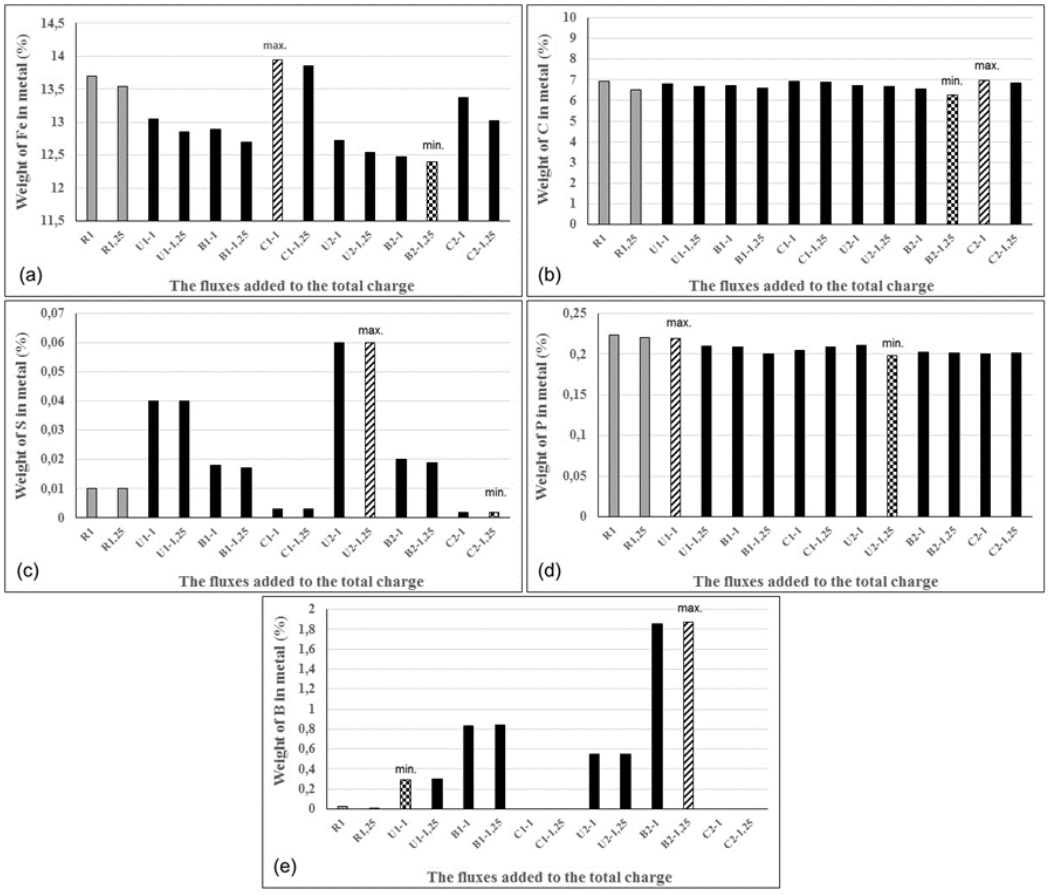


Figure 5. Fe (a), C (b), S (c), P (d), and B (e) amounts obtained in the metal phase at the end of smelting experiments

3.3 Effect of B_2O_3 addition

B_2O_3 flux, which was used to compare with reference samples and fluorspar flux in smelting experiments, gave much better results in Mn, Fe, and Si concentrations in metal and slag phases.

Effect of B_2O_3 on Mn and MnO changes in metal and slag phases: With the addition of B_2O_3, the Mn concentration in the metal phase in all **B** samples increased compared to **R** and **C** samples. The highest Mn concentration in the metal phase is 83.36% in **B2-1.25**. The lowest Mn concentration in the metal phase was obtained in sample **C1-1** with 70.88%. MnO concentrations in the slag phase are higher in **C** samples than in **B** samples. While the highest MnO concentration is 22% in the **C1-1** sample, MnO concentrations are below 3% in **B** samples (Figure 3a, Figure 3c). As a result, it was observed that the B_2O_3 flux added to the charge significantly increased Mn recovery and reduced MnO concentration (compared to fluorspar) [22].

Effect of B_2O_3 on Si and SiO_2 changes in metal and slag phases: The concentration of Si and SiO_2 in the metal phase decreased in all **B** samples compared to **R** and **C** samples with the addition of B_2O_3. While the maximum Si concentration in the metal phase was obtained in the **C1-1** sample, the minimum Si concentration was obtained in the **B2-1.25** sample. While the maximum SiO_2 concentration in the slag phase was obtained in the **C2-1.25** sample, the minimum SiO_2 concentration was obtained in the **B2-1** sample (Table 2, Figures 3b and 3d). As Mn concentrations in the metal increase, Si concentrations decrease. Likewise, the higher the MnO concentration in the slag phase, the greater the Si transition to the metal phase. Boron ores also increase Mn concentrations in the metal phase and thus decrease Si concentrations [1, 12, 16, 22].

Effect of B_2O_3 on Fe and Fe_2O_3 changes in metal and slag phases: Compared to **R** and **C** samples, Fe and Fe_2O_3 concentrations decreased in all **B** samples (Figure 4b, Figure 5a). The lowest Fe concentration in the metal phase and the lowest Fe_2O_3 concentration in the slag phase were obtained in the **B2-1.25** sample. The fact that the amount of iron oxide in the slag phase is higher than in **B** and **U** samples shows that boron ores are more effective in iron reduction [22].

Effect of B_2O_3 on C, S, and P changes in metal and slag phases: When compared with **R** and **C** samples, no significant changes were observed in the amounts of C, S, and P in the B_2O_3 added samples (Figure 5b, 5c, 5d).

Effect of B_2O_3 on B and B_2O_3 changes in metal and slag phases: While the highest boron concentration in the metal phase was detected in the **B2-1.25** sample, the lowest B_2O_3 concentration in the slag phase was detected in the **B2-1** sample (Figure 5e, Figure 4e). To obtain ferromanganese it is preferred that the amount of B_2O_3 be high in the slag phase and low in the metal phase.

3.4 Effect of Ulexite addition

Much better results were obtained in Mn, Fe, and Si concentrations in metal and slag phases with ulexite flux, which was used for comparison with reference samples and fluorspar flux in smelting experiments. When compared with B_2O_3, B_2O_3 flux was observed to be better than ulexite.

Effect of ulexite on Mn and MnO changes in metal and slag phases: With the addition of ulexite, the concentration of Mn in the metal phase in all **U** samples increased compared to R and C samples. The highest Mn concentration in the metal phase is in **U2-1.25** with 82.08%. The lowest Mn concentration in the metal phase was obtained in sample **C1-1** with 70.88%. MnO concentrations in the slag phase are higher in **C** samples than in **U** samples. While the highest MnO concentration is 22% in the **C1-1** sample, MnO concentrations are below 5% in the **U** samples (Figure 3a, Figure 3c). As a result, it was observed that ulexite flux added to the charge significantly increased Mn recovery and reduced MnO concentration (compared to fluorspar).

Effect of ulexite on Si and SiO_2 changes in metal and slag phases: The concentration of Si and SiO_2 in the metal phase decreased in all **U** samples compared to **R** and **C** samples with the addition of ulexite. While the maximum Si concentration in the metal phase was obtained in the **C1-1** sample, the minimum Si concentration was obtained in the **U2-1.25** sample. While the maximum SiO_2 concentration in the slag phase was obtained in the **C2-1.25** sample, the minimum SiO_2 concentration was obtained in the **U2-1** sample (Figures 3b and 3d). The results obtained in Mn and MnO concentrations in experiments conducted with ulexite ore are similar to those obtained with B_2O_3 [16, 22].

Effect of ulexite on Fe and Fe_2O_3 changes in metal and slag phases: Fe and Fe_2O_3 concentrations decreased in all **U** samples compared to **R** and **C** samples (Figure 4b, Figure 5a). The lowest Fe concentration in the metal phase and the lowest Fe_2O_3 concentration in the slag phase were obtained in the **U2-1.25** sample. In parallel with the results obtained in **B** samples, the amount of iron oxide in the slag phase in **U** samples is low, indicating that ulexite is also effective in iron reduction [22].

Effect of ulexite on C, S, and P changes in metal and slag phases: When compared with **R1**, **R1.25**, and **C** samples, no significant changes were observed in the amounts of C, S, and P in the ulexite added samples (Figure 5b, 5c, 5d).

Effect of ulexite on B and B_2O_3 changes in metal and slag phases: While the highest boron concentration in the metal phase was detected in the **U2-1** sample, the lowest B_2O_3 concentration in the slag phase was detected in the **U1-1.25** sample (Figure 5e, Figure 4e). To obtain ferromanganese it is preferred that the amount of B_2O_3 be high in the slag phase and low in the metal phase.

4 Conclusions

In this study, the possibility of using ulexite and B_2O_3 instead of CaF_2 (fluorspar), which is used as a flux in the production of high-carbon ferromanganese, was investigated and the following results were found;

The increase in slag basicity increased the MnO activity coefficient and decreased the SiO_2 activity coefficient in the slag phase. As a result, MnO was reduced, and the transition of Mn to the metal phase became easier. Likewise, SiO_2 was

also reduced, and the transition of Si to the metal phase became difficult (Figure 3, Figure 6) [16, 17, 20, 22]. Thus, by increasing the basicity of the slag, the transition of Si to the metal phase (more than desired) was prevented. In experiments using CaF_2 as flux, it was observed that the concentrations of Si and SiO_2 in the metal and slag phases were higher than in the reference samples. However, in experiments where ulexite and B_2O_3 were used as flux, it was observed that Si and SiO_2 concentrations were lower in the metal and slag phases compared to the **R** and **C** samples (Figures 3b and 3d) [16-19]. As a result, as basicity increases, the Mn ratio increases, the Si ratio decreases, and the ratio of Si in the metal phase to the amount of Si in the charge decreases [1, 12, 16].

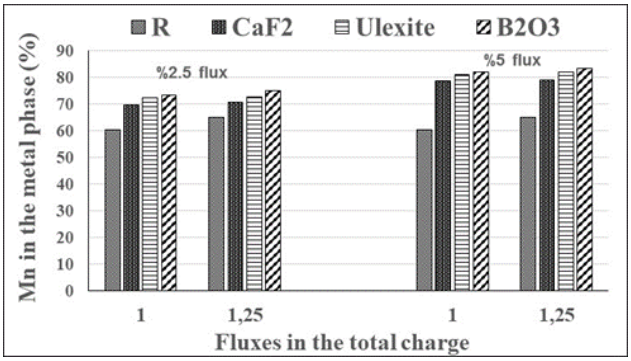


Figure 6. Changes in the concentration of Mn obtained in the metal phase at the end of the smelting experiments

When the fluxes used in smelting experiments are compared;

MnO concentrations in the slag phase are higher in **C** samples (compared to **R** samples). The amount of MnO is approximately 9-10 times less in **B** and **U** samples compared to **C** and **R** samples. The most successful result in terms of MnO yields in the slag phase was obtained in the **B2-1.25** sample (Figure 7). Thus, thanks to boron ores (compared to CaF_2), MnO leakage in the slag phase was reduced to minimum levels, and almost all of the Mn was transferred to the metal phase.

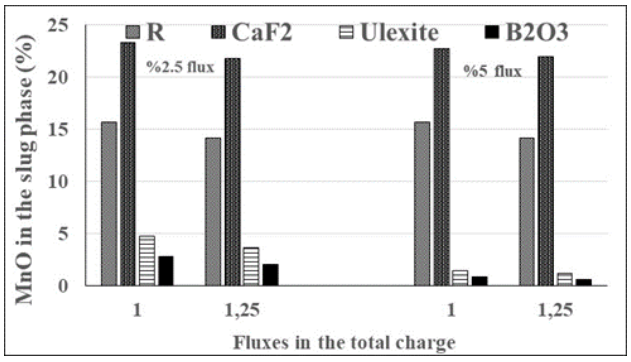


Figure 7. Changes in the concentration of MnO obtained in the slug phase at the end of the smelting experiments

When Fe and Fe_2O_3 concentrations are examined, similar values were obtained in all samples in the metal and slag phases (Figure 8). The minimum Fe_2O_3 concentration in the slag phase was obtained in the **B2-1.25** sample, and the maximum Fe concentration was obtained in the **C1-1.25** sample. The Fe_2O_3 concentration obtained in the **B2-1.25** sample in the slag phase is 0.003% (Figure 4b). These values are close to the iron oxide concentrations reported in the literature in the slag phase in ferromanganese production [1, 12, 16, 18, 22].

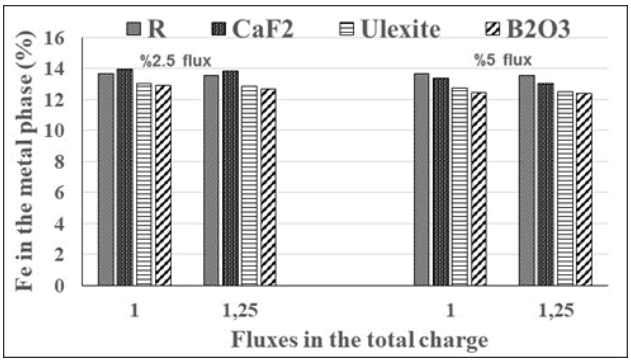


Figure 8. Changes in the concentration of Fe obtained in the metal phase at the end of the smelting experiments

Mn concentrations detected in the metal phase are significantly higher in **B** samples compared to **R** and **C** samples. The highest Mn yield in the metal phase was obtained in the **B2-1.25** sample. Mn yield is approximately 5% higher in **B** samples and 3% higher in **U** samples than in **C** samples. When Figure 6 is examined, the Mn yield is much higher in **B** and **U** samples than in **C** and **R** samples. Using boron ores in ferromanganese production, Mn recovery in the metal phase was more successful than fluorspar. It was determined that the slag/metal ratio was around 0.22 in samples **B** and **U**, while this ratio was 0.7-0.8 in samples **C** (Figure 9).

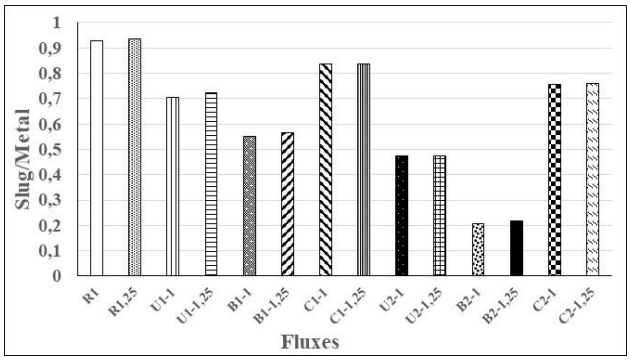


Figure 9. The yield of metal and slag phases at the end of smelting experiments

Research indicating that boron ores provide better slag fluidity than fluorspar, increase the fluidity of the slag and almost completely prevent manganese from mixing into the slag, also supports these results. Additives of B_2O_3 can be successfully used to form high-magnesium liquid steel-making slags. It is shown that 0.37–0.55 % B_2O_3 effectively stabilizes the highly basic slags of the steel and ferroalloy industries [1, 12, 16, 21].

The C concentrations in the metal phases are close to each other in all experiments, and the difference in C content between the samples is around 1%. At the end of the experiments, a high-carbon ferromanganese product was obtained (Figure 5b) [1].

When all experiments were examined, B_2O_3 flux, 1.25 basicity, and 5 g flux amount were determined as the best experimental parameters.

In this study, smelting experiments were carried out with Erzincan-Kemaliye manganese ores, and it was proven that ferromanganese with more than 80% Mn content and high carbon in the metal phase could be produced by using B_2O_3 and ulexite instead of CaF_2 as flux. It has been determined that thanks to the use of boron ores as flux, Mn leakage in the slag phase is minimized, while maximum Mn concentrations can be reached in the metal phase. It has been demonstrated that low-grade Turkish manganese ores can be used in ferromanganese production by minimizing manganese leakage in the slag phase. In addition, it is estimated that energy savings can be achieved in ferromanganese production by producing ferromanganese at lower temperatures since boron ores reduce the melting temperature of slag.

Acknowledgment

This work was supported by Research Fund of the Ataturk University. [Project Number: FYL-2020-8584]

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): %12

References

[1] E. Arancı, Mekanik aktivasyon işlemine tabi tutulmuş demirli mangan oksit cevherinden karbotermik yöntemle ferromangan üretimine karbonize çay atıklarının etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2014.

[2] Lamel grafitli dökme demirde mangan ve kükürt dengesi, https://dokumhane.net/kutuphane/lamel-grafitli-dokme-demirde-mangan-ve-kukurt-dengesi/, Accessed 26 January 2023.

[3] AZO Materials, The properties and efects of manganese as an alloying element, https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=13027, Accessed 5 October 2022.

[4] G. Eroğlu ve M. Şahiner, Üretimden ticarete manganez. MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni, 30, 99-109, 2020.

[5] W. Zhang and C. Y. Cheng, Manganese metallurgy review. Part I: Leaching of ores/secondary materials and recovery of electrolytic/chemical manganese dioxide, Hydrometallurgy, 89, 137-159, 2007. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2007.08.010.

[6] Y. Shen, W. Xue, W. Li, S. Li and X. Liu, Recovery of Mn^{2+}, Co^{2+} and Ni^{2+} from manganese nodules by redox leaching and solvent extraction. Transactions Nonferrous Metals Society of China, 17, 1105-1111, 2007. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(07)60233-7.

[7] O. Yılmaz, A. Dinçer ve E. Tahtakıran, Demir çelik üretiminde bor ürünü kullanımı, Teknik yazı, Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Metalurji Mühendisleri Odası Dergisi, 170, 39-42, 2011.

[8] A. K. Özçelik, Çelik cüruflarının borlu bileşiklerle kararlı hale getirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2019.

[9] A. Reuter, E. Málaga-Trillo, U. Binkle, E. Rivera-Milla, R. Beltre, Y. Zhou, M. Bastmeyer and C. A. O. Stuermer, Evolutionary analysis and expression of teleost Thy-1. Zebrafish, 1(3), 191-201, 2004. https://doi.org/10.1089/zeb.2004.1.191

[10] F. F. Uysal ve S. Bahar, Cüruf çeşitleri ve kullanım alanları, Trakya University Journal of Engineering Sciences, 19(1), 37-52, 2018.

[11] L. Özmen ve C. S. İmer, Çelik üretiminde bor oksitlerin kullanımı, 12. Uluslararası Metalurji-Malzeme Kongresi, sayfa 19-27, İstanbul, Türkiye, 28 Eylül-2 Ekim 2005.

[12] A. A. Babenko and A. G. Upolovnikova, Influence of basıcıty and boron oxıde content ın slags of $CaO–SiO_2–B_2O_3–Al_2O_3$ system on solubılıty of perıclase-carbon refractorıes. Ferrous Metallurgy Bulletin, 76, 4, 2020. https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-4-390-395.

[13] F. F. Grillo, J. L. Coletı, J. R. Olıveıra, J. A. S. Tenórıo, E. Junca, D. C. R. Espınosa, Use of computational thermodynamics in the analysis of hot metal desulphurization with slags based on marble waste and sodalite. Materials Transactions, 58, 1332-1338, 2016. https://doi.org/10.2320/matertrans.M2016016.

[14] S. Taşkaya, Ferro alaşımların genel yapısı ve ferro molibden (FeMo) istihsali. Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi, 1(1), 99-121, 2019.

[15] X. Lu, Z. Qin, Y. Zhang, X. Wang and F. Li, Effect of carbon on the paramagnetic antiferromagnetic transition and γ →ε martensitic transformation of Fe-24Mn alloysEffect of carbon on the paramagnetic-antiferromagnetic transition and γ →ε martensitic transformation of Fe-24Mn alloys. Ph.D. Thesis, Department of Materials Science & Engineering, Dalian Railway Institute, Dalian 116028, China, 2000.

[16] İ. S. Çardaklı, Production of high carbon ferromanganese from a manganese ore located in Erzincan. Ph.D. Thesis, Metallurgical and Materials Engineering Department, Middle East Technical University, Türkiye, 2010.

[17] F. Emeksiz, Smelting of high carbon ferromanganese from Denizli-Tavas manganese ore, Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, Türkiye, 1991.

[18] K. Tereyama, and I. Masao, I. Study on Thermal Decomposition of MnO_2 and Mn_2O_3 by Thermal Analysis, Transactions of the Japan Institute of Metals, 24 (11), 754–758, 1983. https://doi.org/10.2320/matertrans1960.24.754

[19] A. Geveci, METE 516 production of ferroalloys, METU Press, Middle East Technical University, Ankara, 1998.
[20] E. T. Türkdoğan and R. A. Hancock, Equilibrium measurements between carbon saturated Mn – Fe – Si melts and CaO – Al2O3 – MnO – SiO_2 slags, Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, 67, 573–600, 1957.
[21] G. J. W. Kor, Equilibria between liquid Mn – Si alloys and MnO – SiO2 – CaO – MgO slags, Metallurgical Transaction B., 10B, 367–374, 1979. https://doi.org/10.1007/BF02652507
[22] V. I. Zhuchkov, A. A. Akberdin, N. A. Vatolin, L.I. Leont'ev, O. V. Zayakin, A. S. Kim, and U. K. Konurov, Application of boron containing materials in metallurgy, Russian Metallurgy (Metally), 12, 1134–1137, 2011, https://doi.org/10.1134/S003602951112024X.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 084-093

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Thermal and structural analysis of oil-based type transformer

Yağlı tip transformatörde termal ve yapısal analiz

Beyza Nur Dursun[1,*], Bülent Ekici[2]

[1,2] *Marmara University, Department of Mechanical Engineering, 34854, İstanbul, Türkiye*

Abstract

In this paper, a hermetically sealed transformer with a power of 1600 kVA is used to make the mechanical calculations and analysed according to the heat generated by energy transmission. The heat generated on the transformer causes the insulation oil to heat up and increase in volume. Accordingly, the increasing insulation oil volume in the transformer tank causes a pressure increase on the tank. In our study, mechanical stresses created by the temperature and pressure increase due to the heat generated are calculated. These calculations are investigated according to strength, cooling, and construction approaches of tank with the corrugated wall and analysed its effect in design using ANSYS@FLUENT and ANSYS@MECHANICAL combination simulation software based on Finite Element Method. Temperature distribution and thermal limitations are critical to correct design. Temperatures exceeding the permissible thermal limits can cause serious damage to transformer components. On the other hand, a tested prototype tank is provided to compare the numerical, analytical, and experimental values. However according to the results, the stress concentrations are observed at the critical connection points, indicating the possibility of failure if an extra unexpected load is real.

Keywords: Winding, Design, Transformer, Structural and thermal analysis, Flow

Öz

Bu çalışmada, 1600 kVA gücünde hermetik olarak kapatılmış bir transformatör kullanılarak mekanik hesaplamalar yapılmış ve enerji iletiminden kaynaklanan ısıya göre analizleri yapılmıştır. Transformatörde oluşan ısı izolasyon yağının ısınmasına ve hacminin artmasına neden olur. Buna bağlı olarak trafo tankında artan izolasyon yağı hacmi tank üzerinde basınç artışına neden olur. Çalışmamızda sıcaklığın oluşturduğu mekanik gerilmeler ve oluşan ısıya bağlı olarak basınç artışı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar, oluklu duvarlı tankın mukavemet, soğutma ve yapım yaklaşımlarına göre incelenmiş ve sonlu elemanlar yöntemine dayalı ANSYS@FLUENT ve ANSYS@MECHANICAL kombinasyon simülasyon yazılımı kullanılarak tasarımdaki etkisi analiz edilmiştir. Sıcaklık dağılımı ve termal sınırlamalar doğru tasarım için kritik öneme sahiptir. İzin verilen termal sınırları aşan sıcaklıklar, transformatör bileşenlerinde ciddi hasara neden olabilir. Öte yandan sayısal, analitik ve deneysel değerlerin karşılaştırılması için test edilmiş bir prototip tank sağlanmıştır. Ancak sonuçlara göre, kritik bağlantı noktalarında gerilme yoğunlaşmaları gözleniyor, bu da ekstra beklenmedik bir yükün gerçek olması durumunda sorun olasılığını gösteriyor.

Anahtar kelimeler: Sargı, Dizayn, Trafo, Yapısal ve termal analiz, Akış

1 Introduction

A transformer is a device which transfers electrical energy (power) from one voltage level to another one with AC. [1] The history of the transformers is based on to the Faraday's Law of induction. After the induction coil found by Nicholas Callan in 1836, the transformer is developed in 1885. The design of transformer was succeeded in a few years.

The classifications of transformers can be done in different ways. But the most preferred classifications are based on the cooling types (distribution oil immersed or power oil immersed, cast resin), the primary and secondary voltages (step-up, step-down) and intended purpose (generator, power, network, special).

In general, the most commonly used transformer types are dry or oil types. When dry type transformers (cast resin) are used then cooling is supported by air which is not good option in terms of safety because of absence of extension tank. In addition to, air insulation is not efficient as oil insulation. Therefore, the requirements for the protection quality of the windings of a dry transformer are consequently much higher due to this weakness. Channels with special geometries are designed in order to remove heat by means of convection. Optimization of the total surface area of channels designed is a problem that must be solved.

Another problem must be considered is that the surfaces of transformer which is in contact with environment create risks when the transformer is mounted on a base. Fixation points of transformer may affect the performance of transformer.

Oil immersed type transformer has many advantages when compared with air cooled dry types. First of all, oil transformers can be used at high power and voltages levels, Secondly, it has higher impact resistance on outer surfaces because of more smooth external surfaces. Finally, the

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: beyzadursun@marun.edu.tr (B. N. Dursun)
Geliş / Recieved: 13.09.2023 Kabul / Accepted: 23.10.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngmuh.1359866

regional climate may be relatively humid and hot at which oil transformer's performance is better.

Oil immersed type transformer structures use either radiator or corrugated wall for cooling the oil tank.

Corrugated wall type is generally used up to 4000 kVA. If the power requirements exceed 4000 kVA, then transformer with radiators are better solutions. The only difference between structure of radiator and corrugated wall types is that corrugated wall is capable of absorbing volume expansion due to temperature increase because of elastic structure behaviour of corrugated wall whereas this is not valid for radiator type [2]. The tank with corrugated wall oil immersed transformer is also called as hermetically sealed oil transformer. The working principle of a sealed oil transformer is based on the expansion action of the tank due to the volume change of the insulating oil with increasing temperature [3]. When the insulating oil expands, the volume of the corrugated wall fins increases, preventing pressure rise inside the transformer [4], as shown in Figure 1.

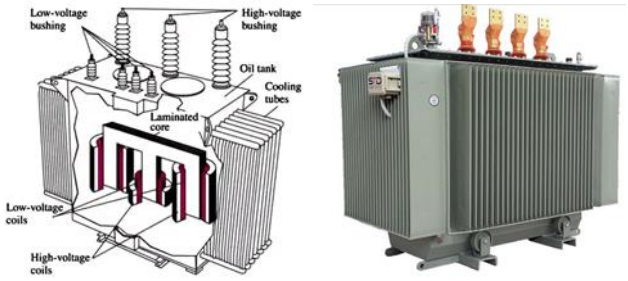


Figure 1. Hermetically sealed oil transformer

There are core and winding which are the heat source inside of the transformer tanks and there is a negative oil pressure between the tank and winding as shown in Figure 2. The heat generated from the heat source (winding) during current flow is dissipated through the cooling systems. Winding has 3 LV and 3 HV coils. The heat transfer is obtained as convection and conduction between heat source, oil, corrugated wall, and the air.

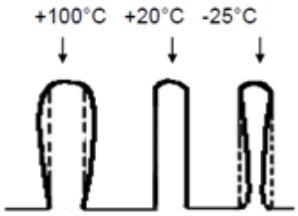


Figure 2. Corrugated wall fin volume change

The heat transfer of conduction is very small with respect to the convection according to the small thickness of the corrugated wall.

When the current flowed over the winding conductor, transformer losses some part of energy transformed as heat generation. The resistance to current flow in wiring produce heat and this causes temperature rise. The lifetime of a transformer is determined by the aging of the cellulose-based insulation within the windings. Therefore, excess temperature must be kept within the specified temperature limits.

When the transformer has excess (high) temperature, it can cause serious damage on the components. Temperature rise must be kept between 55ºC and 65ºC for standard oil-based transformers. These values are calculated assuming a maximum ambient temperature of 40ºC. F the transformer is sussed in an environment at which temperature is higher than this value then high temperature may cause a decrease in transformer life due to fatigue of the transformer. There will be a certain amount of wear on insulation paper for each excess temperature rise. It will consequently cause electrical discharge and mechanical stress and material deformation the tank.

On the other hand, viscosity of oil depends on the temperature. Increasing temperature changes viscosity and repeating cycles will cause to deterioration in the characteristics of oil. Additionally, the relative moisture within the oil is reduced with increasing temperature. The decrease in relative moisture content is due to the fact that solubility of water in the oil increases as the temperature of the oil increases. If the temperature rise is not controlled, then it can completely damage the transformer and even cause to fire. For this reason, the temperature rising must be well controlled so as not to cause damage on important and expensive power distribution devices or not to cause poor performance [5-8].

As a result of discussion above the transformer design must meet both thermal and structural integrity requirements under operating conditions.

In many studies, we can see some analysis and calculations to obtain the optimum design for the transformer. An expansion function is applied into the oil immersed transformer with corrugated wall regarding to the change of volume of the insulating oil with the increase in temperature [4]. Therefore, the thermal and structural stability of the transformer to cope with the pressure change due to temperature change is analysed. Also, there is a study related to a simulation using thermal analysis in finite element method model for the power distribution transformer. The study showed the maximum temperature is occurred in the region where the windings are located by [9].

In this study, the temperature limits are calculated analytically, analysed by using FEM method, and measured experimentally to compare results so as to develop a reliable numerical model for providing optimum life aging of the transformer to be reference to the designers. The proof of the reliability of FEM model showing results close to experimental and analytical values will help to use it for further design purposes especially for cost reduction.

2 Material and methods

Ansys program with two different features (CFD-Mechanical) were used to analyse the mechanical deformation on transformer when the oil temperature rises. In order to perform this analysis Fluid-Solid-Interaction approach is used.

CFD (Computational Fluid Dynamics) is a branch of fluid mechanics. The heat generated in the winding directly

accelerates the aging of the insulation material. The CFD model uses temperature as input to find the stresses or pressures on the walls due to thermal expansion of oil. ANSYS Fluent has two main solvers based on Finite Volume Method that offer solutions that reduce memory usage and solution speed, especially for large problems, high Reynolds number turbulence, and source term-dominated flows. There are advantages in this respect. In Finite Volume Method, the domain is discretized into a finite set of control volumes, and the general transport equations are solved for this set of control volumes. These are Continuity, Momentum and Energy Equations.

Mechanical feature represents to examine the interaction of a fluid flow with a solid structure by using Static Structural Module. In our system, the fluid is a cooling oil, and the solid structure is the tank. There is a pressure occurred by expansion of oil due to heating on the tank. When the pressure is so high, there can be a damage on the tank walls due to the stress. Moreover, these negative mechanical effects are not wanted in the parts. So, in our study, the stress on the tank is analysed to avoid these circumstances and be reference for future designs.

There are some studies on different boundary cooling conditions of oil and oil with water for FEM and CFD analyses. In [10], it is seen that the hybrid cooling system consisting of oil and water is more effective in the case of insulating oil than full oil. However, the power of the transformer is 5 kVA and there is no corrugated wall/radiator in the structure. The hybrid cooling system is very effective with these small features, but the insulation oil for our system consists of anhydrous oil since we have high power and winding dimensions.

Before starting the analysis, the tank design is obtained numerically due to electrical and mechanical parameters regarding to winding which made of copper. Then, the oil to be used in the tank and the temperature and the pressure factors resulting from the use of this oil are calculated. In the end, relevant boundary conditions are implemented to the analysis and then the mesh is applied, and the system is run.

The specifications for the worked transformer are determined as in Table 1.

Table 1. Specifications of worked transformer

Specifications	
Power of transformer	1600 kVA
Heat generated from windings (W_{55})	11,06-kW
Height of HV-LV winding	824 mm
Diameter of LV winding	293 / 392 mm
Diameter of HV winding	408 / 524 mm
Tank LxBxH	1700 x 590 x 1550 mm

Then, the construction of the transformer was designed by a 3D CAD software. Here, outer dimensions of the tank (made of S235JR) are used to absorb the heat generated by active part (coils/windings). The used corrugated wall dimensions are as:

38 pieces (N_1), on top and bottom horizontal side in Figure 3.
200 mm fin depth (T_{w1}),
1.2 mm fin thickness (s),
1200 mm fin height (H_w),
The dimension between two fins (T_k) is 45 mm.
13 pieces (N_2), on left and right vertical side in Figure 3
50 mm fin depth (T_{w2}),
1.2 mm fin thickness (s),
1200 mm fin height (H_w),
the dimension between two fins (T_k) is 45 mm.

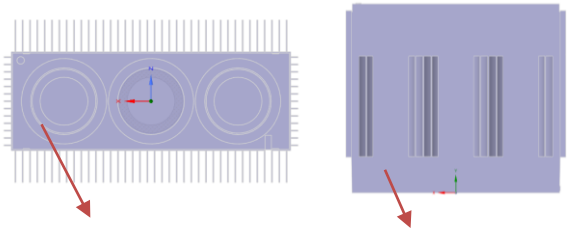


Figure 3. Oil volume

After drawn 3D of transformer, the geometry was imported into ANSYS software and fluent feature was connected to the geometry. Then, the oil volume of the transformer (Figure 3) was generated by Space-Claim interface.

2.1 Heat dissipation capacity

According to the construction of transformer, tank has a heat dissipation capacity depending on the oil temperature. We can perform calculation by making summation of its parts dissipation capacity. We can calculate the heat dissipation capacity of cover first, capacity of a fin of corrugated Wall secondly, then capacity of whole corrugated wall, and capacity of whole tank finally.

Heat dissipation capacity for cover seen as below Equation (1). Here, W_{55D} is a specific heat dissipation capacity for cover which is 0,6 kW/m^2. Bp is tank upper side bracket size which is 65 mm. The equation is multiplied with 2 due to the symmetry.

$$P_{55D} = 2W_{55D}(B + 2B_p) * 10^{-6} kW \quad (1)$$

$$P_{55D} = 2 * 0.6 * (590 + 2 * 65) * 10^{-6} = 8{,}64 * 10^{-4} kW$$

Heat dissipation capacity for a fin seen as below Equation (2). Here, W_k is characteristic heat dissipation for corrugated wall fins as seen Figure 4 due to fin depth. L_p is open form length for corrugated walls. K_2 is height effectivity factor for corrugated wall fin height as seen Figure 5. W_s is specific radiated heat which is 0.305 kW/m^2.

$$P_{55W} = H_w(W_k * L_p * K_2 + W_s * T_k) * 10^{-6} kW \quad (2)$$

L_{p1} = 404.2 mm for 200 mm fin side
L_{p2} = 104.8 mm for 50 mm fin side

$$P_{55W1} = 1200(0.283 * 404.2 * 0.97 + 0.305 * 45) * 10^{-6} = 0.15\ kW$$

$$P_{55W2} = 1200(0.342 * 104.8 * 0.97 + 0.305 * 45) * 10^{-6} = 0.06\ kW$$

Heat dissipation capacity for corrugated wall seen as below Equation (3). Here, E_w is fin extension length for sides as Equations (4) and (5). The equation is multiplied with 2 due to the symmetry.

$$P_{55WW} = (N_1 P_{55W1} + N_2 P_{55W2}) + \{2{,}24 * H_w * (E_{w1} + E_{w2}) + 0.86(T_{w1} + T_{w2} - 90)\} * 10^{-6} kW \quad (3)$$

$$E_{w1} = (L + 2s - (N_1 - 1) * T_k) * 0.5 = 18.7\ mm \quad (4)$$

$$E_{w2} = (B + 2s - (N_2 - 1) * T_k) * 0.5 = 26.2\ mm \quad (5)$$

$$P_{55WW} = 2 * (38 * 0.15 + 13 * 0.06) + \{2{,}24 * 1200 * (18.7 + 26.2) + 0.86(200 + 50 - 90)\} * 10^{-6} = 12.96\ kW$$

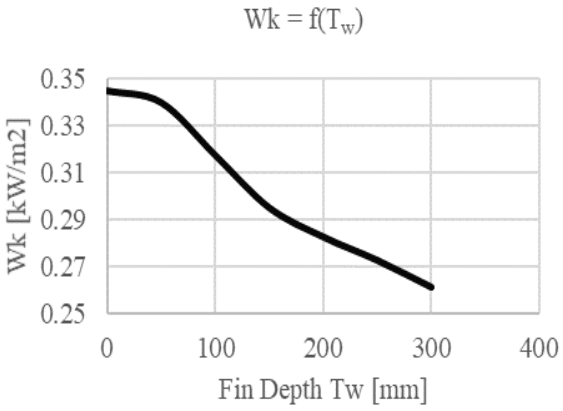


Figure 4. Characteristic heat dissipation for corrugated wall fins (W_k)

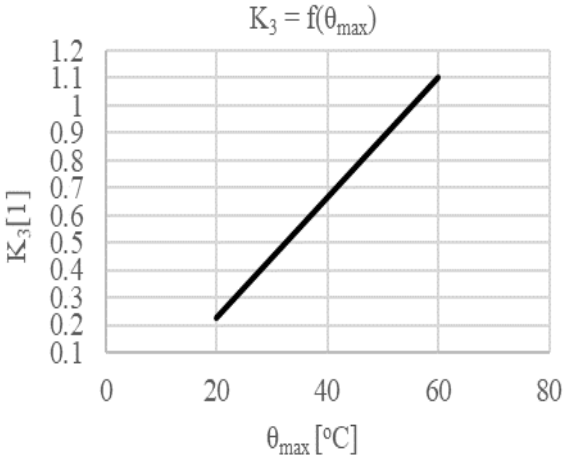


Figure 5. Height effectivity factor for corrugated wall height (K_2)

Heat dissipation capacity for tank seen as below Equation (6). [11,12,13] Here, K_3 is the heat dissipation capacity for max oil temperature which is 60°C as seen Figure 6.

$$P_{55} = (P_{55D} + P_{55WW}) * K_3\ kW \quad (6)$$

$$P_{55} = (8{,}64 * 10^{-4} + 12{,}96) * 1{,}1 = 14{,}25\ kW$$

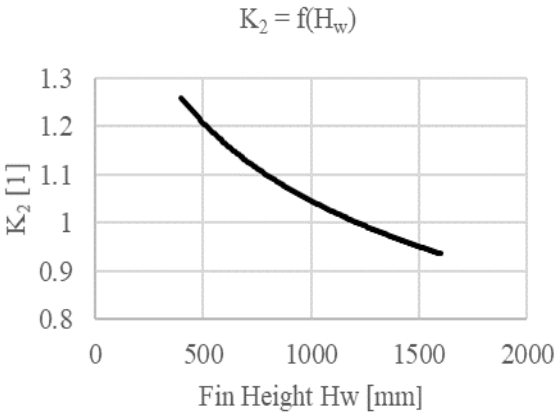


Figure 6. Heat dissipation capacity K_3 for oil temperature θ_{max}

2.2 *Pressure*

After calculated the heat dissipation occurred on tank due to transformer design, the pressure is obtained according to the temperature rise with Equations (7) and (8). Firstly, we need oil mas, density of oil, volume of oil at the related temperatures. The oil is filling at 25°C and the maximum ambient temperature is 40°C. As mentioned, Heat Dissipation Capacity chapter, the maximum oil temperature is 60°C. The oil mass for related tank is 1130 kg to fill the volume. The technical properties of used cooling oil which is mineral oil is shown as Table 2. [14-16]

Table 2. Properties of transformer oil

Property	Limits for transformer oil due to temperature			
	25°C	40°C	60°C	80°C
Density (kg/m^3)	890	880	869	856
Kinematic Viscosity (mm^2/sn)	17.08	9.59	5.37	3.43
Dynamic Viscosity (kg/m-sn)	0.015	0.008	0.005	0.003
Thermal Conductivity (W/m-K)	0.133	0.130	0.128	0.126
Specific Heat (J/kg-K)	1902	1974	2077	2187

$$T_{av,max} = T_{amb,max} + \left(T_{oil,rise} * \frac{\left(\frac{W_{55}}{P_{55}}\right)^{0.8}}{1{,}2} \right) °C \quad (7)$$

$$T_{av,max} = 40 + \left(60 * \frac{\left(\frac{11{,}06}{14{,}25}\right)^{0.8}}{1{,}2} \right) = 80{,}82\ °C$$

$$T_{max,rise} = T_{av,max} - T_{filling} = 55{,}82\ ℃ \quad (8)$$

After obtaining the temperature conditions, the pressure of tank was calculated in Equations (12) and (13). [17,18] Firstly, we need to oil volume of tank as Equation (9).

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{1130}{0.895} = 1262.57\ lt \quad (9)$$

The maximum density of the oil in Equation (11) is related to the maximum of volume for oil in Equation (10) and volume coefficient of expansion which is 0,000755774.

$$V_{max} = V^{*}\ av^{*}\ (T_{max,rise} + T_{filling} - 20) + V \quad (10)$$

$$V_{max} = 1262{,}57 * 0{,}000755774 * (55{,}82 + 25 - 20) + 1262{,}57 = 1320{,}6\ lt$$

$$\rho_{max} = 1130 / 1320.6 = 0{,}855\ kg/lt \quad (11)$$

$$P_{static,corrugated\ wall} = H_w * \rho_{max} * 0{,}0981\ Bar = (1{,}2 * 0{,}855) * 0{,}0981 = 0{,}1\ bar \quad (12)$$

$$P_{static,bottom} = H_k * \rho_{max} * 0{,}0981\ Bar = (1{,}55 * 0{,}855) * 0{,}0981 = 0{,}13\ bar \quad (13)$$

Now, we have the static pressures for corrugated wall and bottom.

2.3 CFD base

After the calculations are done and obtaining a good mesh, the setup for solution is generated. We must add boundary conditions for using sections which are cooling oil, winding and the corrugated wall in transformer to get results in CFD. When see the Table 3, the Taurus mineral datasheet consists of properties as density, volume, etc.

Table 3. Taurus mineral oil datasheet

Property	Unit	Test Method	Specification Limits	
1-Function			Min	Max
Viscosity, 40°C	mm^2/s	ISO 3104		12.0
Viscosity, -30°C	mm^2/s	ISO 3104		1800
Pour point	°C	ISO 3016		-40
Water content	mg/kg	IEC 60814		30
Breakdown voltage				
-Before treatment	kV	IEC 60156	30	
-After treatment	kV	IEC 60296	70	
Density, 20°C	kg/dm^3	ISO 12185		0.895
DDF at 90°C		IEC 60247		0.005

Secondly, the heat flux is calculated for the winding according to 11,06-kW heat generated with 3 HV and LV coils. The heat generated is divided to heat dissipating surfaces to obtain heat flux in Equation (14). There are 4 areas as shown Figure 7 to dissipate the heat in a coil. In above equation, the heat flux was calculated according to the areas.

$$A_1 = 2\pi rh = 2 * \pi * 0{,}262 * 0{,}824 = 1.35\ m^2$$

$$A_2 = 2\pi rh = 2 * \pi * 0{,}204 * 0{,}824 = 1.05\ m^2$$

$$A_3 = 2\pi rh = 2 * \pi * 0{,}147 * 0{,}824 = 0.76\ m^2$$

$$A_4 = 2\pi rh = 2 * \pi * 0{,}196 * 0{,}824 = 1.01\ m^2$$

$$A = 3A_1 + 3A_2 + 3A_3 + 3A_4 = 12{,}52\ m^2$$

$$\dot{q} = Q/A = 11060/12{,}52 = 883{,}1 \quad (14)$$

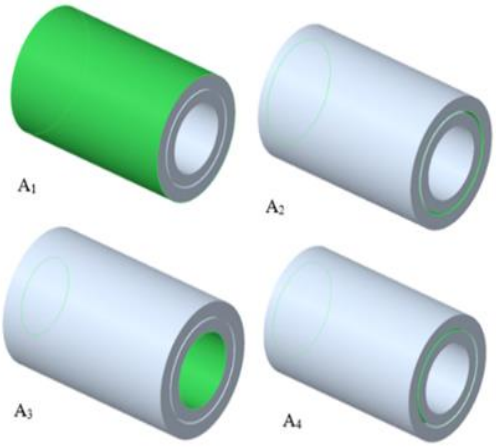


Figure 7. Heat dissipating surfaces (green areas)

Latest, the convective heat transfer coefficient of air for heat transfer between corrugated wall fin surface and the air is calculated with Equation (15). For this calculation, we need a heat dissipation capacity to examine. 0.06 kW fin side heat dissipation (P_{55W2}) capacity was considered. This 0.06 kW energy consists of one fin area with whole surfaces The heat transfer from internal fin to external fin is equal to the heat transfer from external fin to air on same plane. The fin physical properties are shown below Figure 8.

The 0.06 kW (60 W) heat dissipation capacity is valid for all surfaces as $4A_1$, $2A_2$ and $2A_3$. The thermal conductivity (k) of used material (S235JR) is 45 W/m°C.

$$Q = k * A_{all} * \Delta T \quad (15)$$

$$A_{all} = 4A_1 + 2A_2 + 2A_3$$

$$A_1 = 0{,}05 * 1{,}2 = 0{,}06\ mm^2$$

$$A_2 = 0{,}0084 * 1{,}2 = 0{,}01\ mm^2$$

$$A_3 = 0{,}05 * 0{,}0012 = 0{,}00006\ mm^2$$

We can neglect the heat transfer obtained from A3 side as the area is so small.

$$A_{all} = 4A_1 + 2A_2 = 0{,}24 + 0{,}02 = 0{,}26\ mm^2$$

$$60 = 45 * 0{,}26 * \Delta T$$

$$\Delta T = 5{,}13\ ℃$$

So, now we can calculate the heat transfer obtain an external one surface from A_1 side.

$$Q = k * A * \Delta T = 45 * 0{,}06 * 5{,}13 = 13{,}85\ W$$

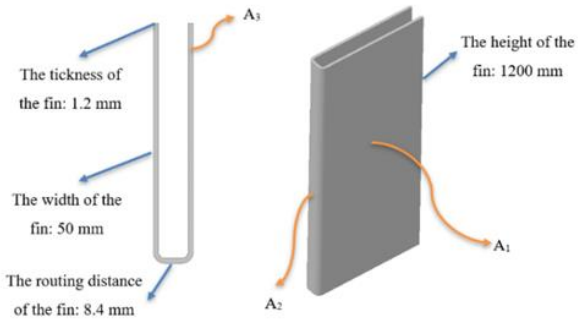


Figure 8. Corrugated wall fin physical properties

This 13.85 Watt is a heat transfer from internal fin to external fin based on the A_1 surface. We have also another heat transfer from external fin to air based on the A_1 surface. So, these are in same plane and have same heat transfer too. We have infinitely long fin according to the a/b ratio that is going to infinity as 1.2/1200=0.001. It can be determined from Fourier's law of heat conduction as $Q = \sqrt{hpkA}\Delta T$ (Equation (16)). The thermal conductivity of air at 26ºC is $0.2632\ W/mK$. [19] The temperature of the wall is approximately equal to $T_{max,rise}$. $T_{max,rise}$ is 55,82℃ so we can progress with 55℃.

$$\Delta T = T_{wall} - T_{air} = 55 - 26 = 29℃$$

$$p = 2(0.05 + 1.2) = 2.5\ m$$

$$A = 0.05 * 1.2 = 0.06\ m^2$$

$$Q = \sqrt{hpkA}\Delta T \qquad (16)$$

$$Q = \sqrt{h * 0.06 * 0.2632 * 2.5} * 29$$

$$\sqrt{h * 0.06 * 0.2632 * 2.5} * 29.82 = 13.85$$

h = 5.2 W/m℃

After the boundary conditions of the tank and windings are entered, some justifications must be entered for the system calculation.

2.3.1 Circulation type

The system has natural circulation because the density of the transformer oil changes caused by temperature differences.

2.3.2 State of the system

The state of the overall system that contains balanced flows and does not change over time is called the steady state, and this is described for our mentioned system.

2.3.3 Model of the system

In our system there are viscous and energy that are obtained according to the heat transfer between the winding, tank wall and the air. For the viscous model of the system is defined as Spalart-Allmaras Equation for some advantages (simple one equation, eddy viscosity transport equation consists, gives good results for pressure solutions with quality mesh) [20].

2.3.4 Solution of the system

Pressure-velocity coupling algorithms are used because of the small Mach number. Moreover, Couple method is preferred for be robust and efficient single-phase implementation for steady-state flows which our system has [21,22].

3 Mechanical base

After the CFD solution is done, static structural module is applied to examine the obtained stress and strain on the tank. In this study, there is an interaction of a fluid flow with a solid structure when fluid flow exerts the pressure or thermal loads on the structure. The loads may cause structural deformation.

We can transfer the geometry and the solution to result the structural response. Here, we have a fixed support on the wheelbase connection to the wheel, imported earth gravity and body temperature.

4 Result and discussion

Ansys FSI simulations give following results. It can be seen that the maximum temperature of the corrugated wall oil volume is occurred under the cover due to the rise of the oil flow with increasing temperature. The maximum temperature of the whole transformer oil is occurred on the winding section specially the middle of the oil channels because of the heat source as seen Figure 9.

The maximum pressure which is sum of static and working (dynamic) pressure is occurred on the bottom of the tank according to the hydrostatic pressure of oil. Analytical calculations made in this study show the total pressure is sum of the working and static pressures as seen Figure 10.

We have the temperature rise test result by Schneider Electric Laboratory as seen Table 4.

Table 4. Experimental results

Max oil temperature	Max temperature on LV winding	Max temperature on HV winding
43.3 ºC	59.6 ºC	58.3 ºC

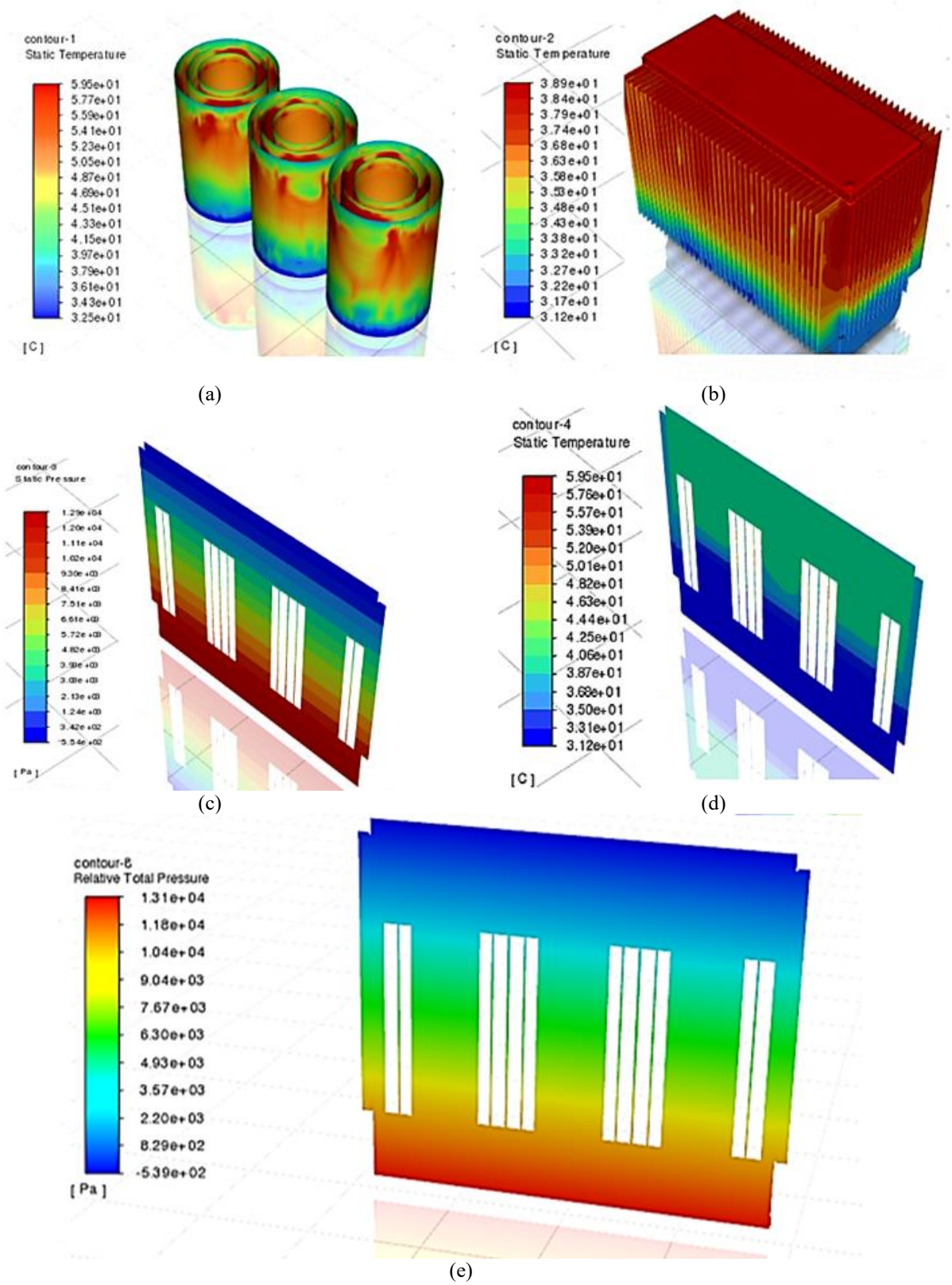


Figure 9. CFD results (a) Temperature distribution on windings oil volume (b) Temperature distribution on transformer oil volume (c) Pressure distribution on transformer oil volume with middle section (d) Temperature distribution on transformer oil volume with middle section (e) Working pressure on middle section of transformer oil volume

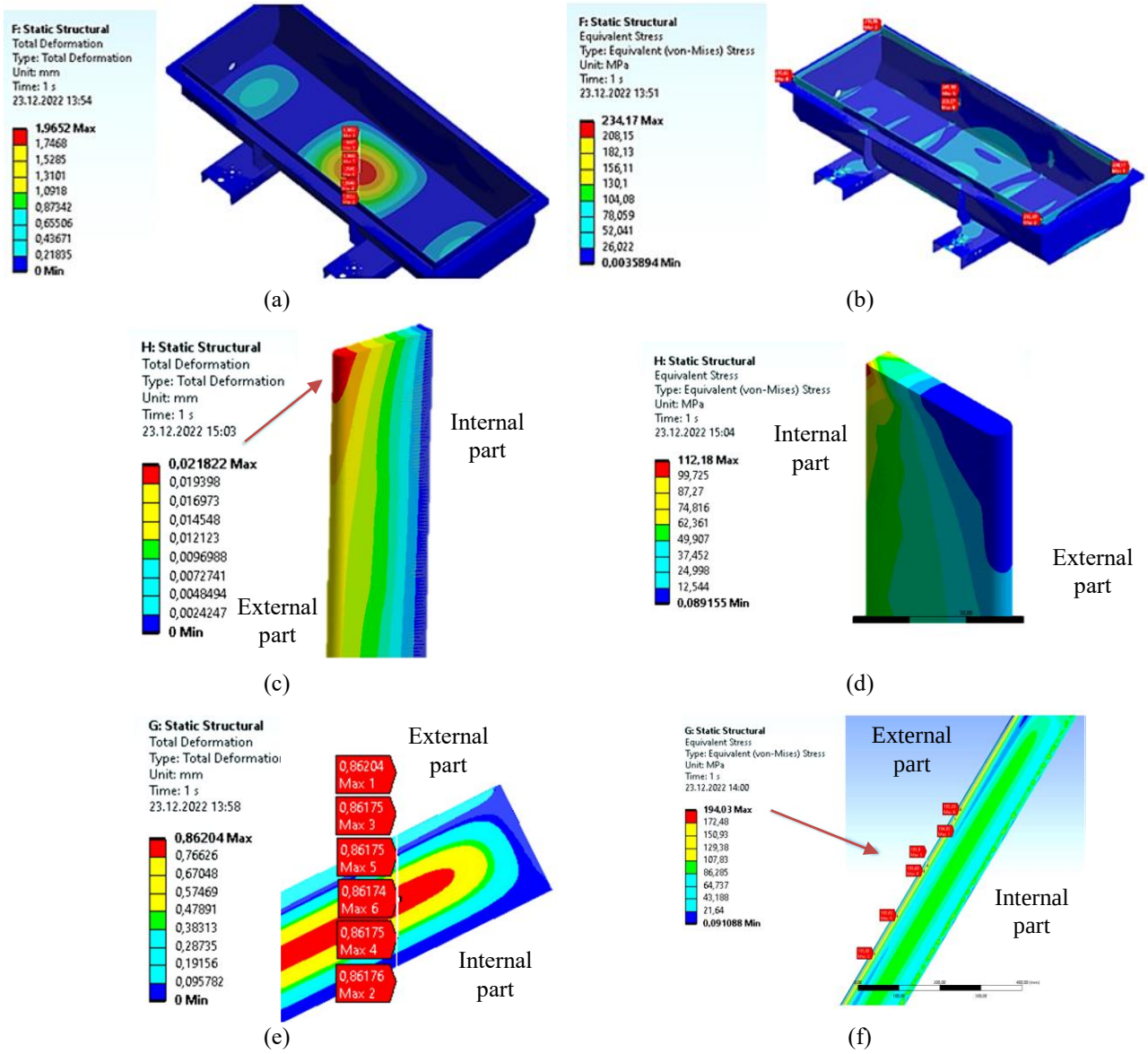


Figure 10. Mechanical results (a) Deformation on the tank bottom (b) von-Misses stress on the tank bottom (c) Deformation on the corrugated wall (short side) (d) von-Misses stress on the corrugated wall (short side) (e) Deformation on the corrugated wall (long side) (f) von-Misses stress on the corrugated wall (long side)

5 Conclusion

In this study, it was aimed to examine both the mechanical and thermal coupling effects on the stress,strain and temperature distribution of transformer when it is in operation.

Now, we can see the summary table of conclusion in Table 5. According to the results and evaluations, it has been determined that the worked tank design has enough stability and strength in case of compared to numerical, analysis and experimental results. The maximum temperature in the tank oil is 38.9ºC which is occurred on the under the transformer cover plate in the analysis but when checking the experimental result, that is 43.3ºC.

The maximum temperature on the windings is about 59.5ºC in analysis, the numerical calculations are applied according to the 60ºC (because of the capacity of insulation products to withstand temperature), and the numerical result is about 59ºC in experimental result. The reason of these differences can be related to the production processes. The bending, welding or connection details could not be same quality with numerical and analysis results. When we examine at the pressure arising from the fluid expansion due to this temperature increase and decrease, we can see that the maximum working pressure (0.131 bar) is almost equal to the max static pressure (0.129 bar) and is consistent with the numerical results.

In addition, the mechanical effect of the applied pressure due to thermal expansion of oil on the product is more important on the bottom of tank and wheelbase. According to the distribution of stress, the internal tank bottom surfaces might not be highly effected. There are some locations that

effected more with rest to other parts of the structure. As an example, if welding digs of fins will have radius (not sharp corners), then stresses at that edges could be decreased. On the other hand, the short side corrugated wall has small fin depth (50 mm), so the deformation and stress are occurred with small values in these edges as expected whereas, for the long side corrugated wall, the stress and deformation have greater value related to the fin extension geometry. The maximum deformation is obtained in the middle of the fin depth.

Table 5. Analysis result

Figure Number	Static Temperature (°C)		Pressure (Pa)		Stress (Mpa)	Deformation (mm)
	Min	Max	Min	Max	Max	Max
9/a	32.5	59.5	-	-		
9/b	31.2	38.9	-	-		
9/c	-	-	$1.29*10^4$	$5.54*10^2$		
9/d	31.2	59.5	-	-		
9/e	-	-	$1.31*10^4$	$5.39*10^2$		
10/a						1.9652
10/b					234.17	
10/c						0.021822
10/d					112.18	
10/e						0.86204
10/f					194,03	

As a conclusion, considering the unit price of the steel parts, the overall thickness of the parts can be reduced if the design of critical regions of the stress distribution can be improved.

There are some possible future works can include:

- The tank bottom thicknesses could be decreased according to the pressure level.
- The structure of the wheelbase could be modified so as to get minimum stress.
- The connection point between the wheelbase and the wheel could be improved.
- The support profiles could be reconsidered due to the critical points.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): %18

References

[1] D. Çelen, A New Plug-In Core Design for Three Phase Transformers. MSc Thesis, Yıldız Technical University Institute of Science, Istanbul, Türkiye, 2019.

[2] C. M. Fonte, J. C. B. Lopes, M. M. Dias, R. G. Sousa, H. M. Campelo and R. C. Lopes, CFD Analysis of Core Type Power Transformers. 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, Germany, 6-9 June 2011.

[3] O. Kaymaz, Investigation of Oil Flow and Heat Transfer in Transformer Radiator. MSc Thesis, Sciences of Izmir Institute of Technology, Izmir, Türkiye, 2015.

[4] S. Lee, J. Y. Lee, J. C. Yun, J. Y. Park and J. H. Woo, Development of Thermal and Structural Design Technology for a Hermetically Sealed Oil Transformer. WIT Transactions on the Built Environment, 126, 179-190, 2012. https://doi.org/10.2495/SU120161.

[5] A. M. Abd-Elhady, M. E. Ibrahim, T. A. Taha and M. Izzularab, Effect of temperature on AC breakdownvoltage of nanofilled transformer oil. IET Science, Measurement & Technology, 12, 138-144, 2017. https://doi.org/10.1049/iet-smt.2017.0217.

[6] D. Dalcalı, H. Demirel and E. Celik, Microcontroller-based cooling of a single-phase transformer with thermoelectric module. The International Journal of Energy & Engineering Sciences, 1(2), 4-14, 2016.

[7] V. M. Montsinger, Loading Transformers By Temperature. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 49 (2), 776-790, 1930. https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1930.5055572

[8] E. Yiğit and C. Uçak, Investigation of Oil and Winding Temperature Models of Power Transformers. National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO), New York, USA, 2016.

[9] Y. Ozupak and M. S. Mamis, Thermal Field Analysis of Power Transformer by Combined Electromechanical Finite Element Method. Erzincan University Journal of Science and Technology, 934-941, 2019. https://doi.org/10.18185/erzifbed.513969

[10] M. Toren, FEM and CFD Analysis of a Hybrid Cooling System Design in Oil-Type Transformers. Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences, 11 (3), 611-619, 2022. https://doi.org/10.28948/ngumuh.1122317

[11] W. C. Young and R. G. Budynas, Roark's Formulas for Stress and Strain Seventh Edition. McGraw-Hill, pp. 424-500, New York, USA, 2002.

[12] D. Herfati, B. A. Kamvar, A. Tavakkol and K. R. Milani, Calculation of mechanical stresses in hermetically sealed transformers. 19th International Conference on Electricity Distribution, Vienna, Austria, 21-24 May 2007.

[13] C. Canse, Investigating of Transformer Cooling Systems. MSc Thesis, Yildiz Technical University Institute of Science, Istanbul, Türkiye, 2016.

[14] G. Dombek, Z. Nadolny and P. Przybyłek, The role of the type of insulating liquid in the transformer temperature distribution. Computer Applications in Electrical Engineering, 14, 148-157, 2016. https://doi.org/10.21008/j.1508-4248.2016.0013.

[15] Z. Nadolny and G. Dombek, Thermal properties of mixtures of mineral oil and natural ester in terms of their application in the transformer. E3S Web of Conferences, 23 October 2017. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20171901040

[16] C. Sun, C. Xiao, J. Hou, L. Kong, J. Ye and W. Yu, Analysis of Factors Affecting Temperature Rise of Oil-immersed Power Transformer. ICETAC Journal of Physics: Conference Series, 2020. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1639/1/012087

[17] A. Ahmad and M. A. Shadid, Environmental effect on temperature rise of transformer. 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, Germany, 6-9 June 2011.
[18] O. Ozgonenel, D. Thomas and U. Kurt, SF6-Gas Insulated 50kVA Distribution Transformer Design. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences (TUBITAK), 26 (4), 2140-2150, 2018. https://doi.org/10.3906/elk-1708-28
[19] H. Howard, Fluid Mechanics Fifth Edition. Pijush K. Kundu, Ira M. Cohen, David R. Dowling, Elsevier, pp. 425-450, Waltham, USA, 2012.
[20] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, An Introduction to Computational Fluid Dynamics Second Edition, Pearson Education, pp. 427-437, New York, USA, 2007.
[21] H. Wang, F. Gao, P. Zhou and Z. Zhai, Literature review on pressure–velocity decoupling algorithms applied to build environment CFD simulation. Building and Environment, 143, 671-678, 2018. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.07.046
[22] Ansys Theory Guide, Choosing the Pressure-Velocity Coupling Method. https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/index.htm , Accessed 23.01.2009.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 094-098

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Al-13.6Cu-6Si alaşımının elektriksel ve ısıl özelliklerinin incelenmesi

Investigation of the electrical and thermal properties of Al-13.6Cu-6Si alloy

Erkan Üstün[1,*], Mehmet İzzettin Yılmazer[2], Emin Çadırlı[3]

[1] Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, 51240, Niğde Türkiye
[2] Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü, 38280, Kayseri Türkiye
[3] Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

Öz

Doğrusal olarak katılaştırılan Al-13.6Cu-6Si alaşımının elektriksel özelliklerinin hem katılaştırma hızına hem de sıcaklığa bağlı olarak nasıl değişim gösterdiği ve buna ek olarak yine aynı alaşımın termal özelliklerinin sıcaklığa göre nasıl bir davranış sergilediği araştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında öncelikle alaşımın elektriksel özdirenç (ρ) ölçümleri dört nokta prob yöntemi ile yapılmış ve özdirencin sıcaklık katsayısı (α) hesaplanmıştır. Wiedemann–Franz ve Smith-Palmer denklemleri kullanılarak elde edilen deneysel bulgularla ısıl iletkenlik (K)-sıcaklık (T) arasındaki ilişki belirlenmiştir. 320–953 K sıcaklık aralığında DSC analizi yapılarak çizilen ısı akışı-sıcaklık eğrisinden entalpi (ΔH) ve özısı (c_p) değerlerine ek olarak alaşımın erime sıcaklığı da (T_E) belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Elektriksel iletkenlik, Isıl iletkenlik, Erime entalpisi, Özısı

Abstract

It has been investigated how the electrical properties of the directionally solidified Al-13.6Cu-6Si alloy change depending on both the solidification rate and temperature, and how the thermal properties of the same alloy behave according to the temperature. Within the scope of this study, first of all, the electrical resistivity (ρ) measurements of the alloy were made with the four-point method and the temperature coefficient of the resistivity (α) was calculated. The relationship between thermal conductivity (K) and temperature (T) was determined with the experimental findings obtained using the Wiedemann–Franz and Smith-Palmer equations. In addition to enthalpy of fusion (ΔH) and specific heat (c_p) values, the melting temperature (T_E) of the alloy was determined from the heat flow-temperature curve drawn by performing DSC analysis in the temperature range of 320-953 K.

Keywords: Electrical conductivity, Thermal conductivity, Enthalpy of fusion, Specific heat

1 Giriş

Günümüz metal/alaşım üretme ve işleme teknolojisinde alüminyum ve alüminyum tabanlı alaşımlar; kolay şekillenmesi, mukavemet özelliği, korozyon direnci, akıcılık, elektriği ve ısıyı iyi iletmesi gibi birçok temel özelliğinin yanı sıra bu özelliklerinin geliştirilebilir ve iyileştirilebilir olması sebebiyle de birçok kullanım alanına (elektrik-elektronik mühendislik uygulamaları başta olmak üzere uzay, otomotiv vb.) sahiptir. Bu yüzden daha üstün özelliklere sahip yeni malzemelerin üretilmesi ve mevcut malzemelerin ise özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik olarak birçok çalışmalar yapılmaktadır. Özellikle yüksek elektrik akımı ve ısı taşıma kapasitesi gerektiren uygulamalarda verimlilik kapasitesi yüksek olması bağlamında Al-Cu-Si üçlü alaşımı bu çalışma için tercih edilmiştir. Seçilen Al-13.6Cu-6Si alaşımının elektriksel özelliklerinin hem katılaştırma hızına bağlı olarak hem de yüksek sıcaklıklara maruz kalması durumunda elektriksel ve termal özelliklerinin nasıl değiştiğinin geniş bir sıcaklık aralığın da (~300-800K) incelenmesi yapılan bu çalışmayı literatürde yer alan benzer çalışmalardan farklı kılmaktadır (aksi belirtilmedikçe tüm bileşimler ağırlıkça verilmiştir).

İlk olarak sabit sıcaklık gradyentinde (G=4.64 K/mm) ve farklı katılaştırma hızlarında (V=8.3-166 μm/s) Bridgman tipi fırında doğrusal olarak tek yönlü katılaştırılan Al-Cu-Si ötektik alaşım numunelerinin elektriksel özdirenç ölçümleri dört nokta prob yöntemi ile yapılarak elektriksel özdirenç değerlerinin katılaştırma hızı ile değişimi incelenmiştir. Daha sonra aynı alaşımın elektriksel özdirenç değerlerinin sıcaklığa göre nasıl bir değişim gösterdiği araştırılmıştır. Yine dört nokta prob yöntemi kullanılarak alaşımın özdirenç ölçümleri yapılmış ve özdirencin sıcaklık katsayısı (α) hesaplanmıştır. Daha sonra Wiedemann–Franz [1] ve Smith-Palmer [2] denklemleri yardımıyla elde edilen deneysel verilerle termal iletkenlik (K) - sıcaklık (T) arasındaki ilişki tespit edilmiştir. Son olarak DSC analiziyle de alaşımımızın katı-sıvı dönüşümü esnasındaki erime sıcaklığı (T_E), erime entalpisi (ΔH) ve özısı (c_p) değerleri belirlenmiştir.

2 Deneysel yöntem

2.1 Numune hazırlama ve katılaştırma

Al-13.6Cu-6Si üçlü alaşımı %99.99 saflıktaki metaller kullanılarak vakumlu eritme fırınında eritilmiş, tam bir homojen karışım elde etmek için karıştırılmış ve akıcılığı oldukça iyi olan sıvı alaşım elde edilmiştir. Daha sonra bu eriyik alaşım, alttan su soğutmalı döküm fırınında bulunan saflığı yüksek grafit potalarının içerisine dökülerek numune içinde hiçbir hava boşluğu kalmayacak şekilde serbest

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: erkanustun_07@hotmail.com (E. Üstün)
Geliş / Recieved: 06.07.2023 Kabul / Accepted: 26.10.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngmuh.1323640

formda doğrusal olarak tek yönlü katılaştırılarak üretim işlemi tamamlanmıştır. Üretilen bu numunelerin doğrusal katılaştırma işlemleri Bridgman tipi bir fırında (Şekil 1), sabit bir G'de (4.64 K/mm) farklı V (8.3-166 µm/s) değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Alaşım numunelerinin üretilmesi ve doğrusal katılaştırma işlemleri ile ilgili detaylı bilgiler başka bir çalışmada [3] verilmiştir.

2.2 Elektriksel özdirenç değerlerinin ölçülmesi

2.2.1 Katılaştırma hızına bağlı olarak özdirenç ölçümü

Şekil 1'de görülen deney sisteminde kontrollü olarak sabit sıcaklık gradyentinde (G) ve faklı katılaştırma hızlarında (V) tek yönlü doğrusal katılaştırma işlemleri tamamlanan 4 mm çapında 200 mm uzunluğundaki numunelerden, dendritik yapıyı içerecek şekilde yarım silindir kesitli 10 mm uzunluğunda yüzey kusuru ve döküm boşluğu içermeyecek şekilde özdirenç ölçümü için numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin elektriksel özdirenç değerleri (ρ) dört nokta prob (four–point probe) yöntemi kullanılarak oda sıcaklığında ölçülmüştür. Bu yöntem numune üzerine 4 adet platin telin (0.5 mm çapında) bağlanarak verilen akıma karşı ortaya çıkan voltaj değerinin ölçülerek elektriksel özdirenç değerinin belirlenmesi esasına dayanır. Elektriksel özdirenç değeri (ρ);

$$\rho = 2\pi s\left(\frac{U}{I}\right) \quad (1)$$

ifadesiyle verilir. Burada $2\pi s$, numunenin geometrisine bağlı olan bir düzeltme faktörünü, s, probların numune üzerindeki temas noktaları arasındaki mesafeyi (~2mm), U, iç problar arasındaki potansiyel farkını ve I, dış problardan geçen akımı ifade etmektedir. Bu yöntemin kullanım şekli ve ölçümü ile ilgili daha ayrıntılı bilgiler kaynak [4]'de verilmiştir.

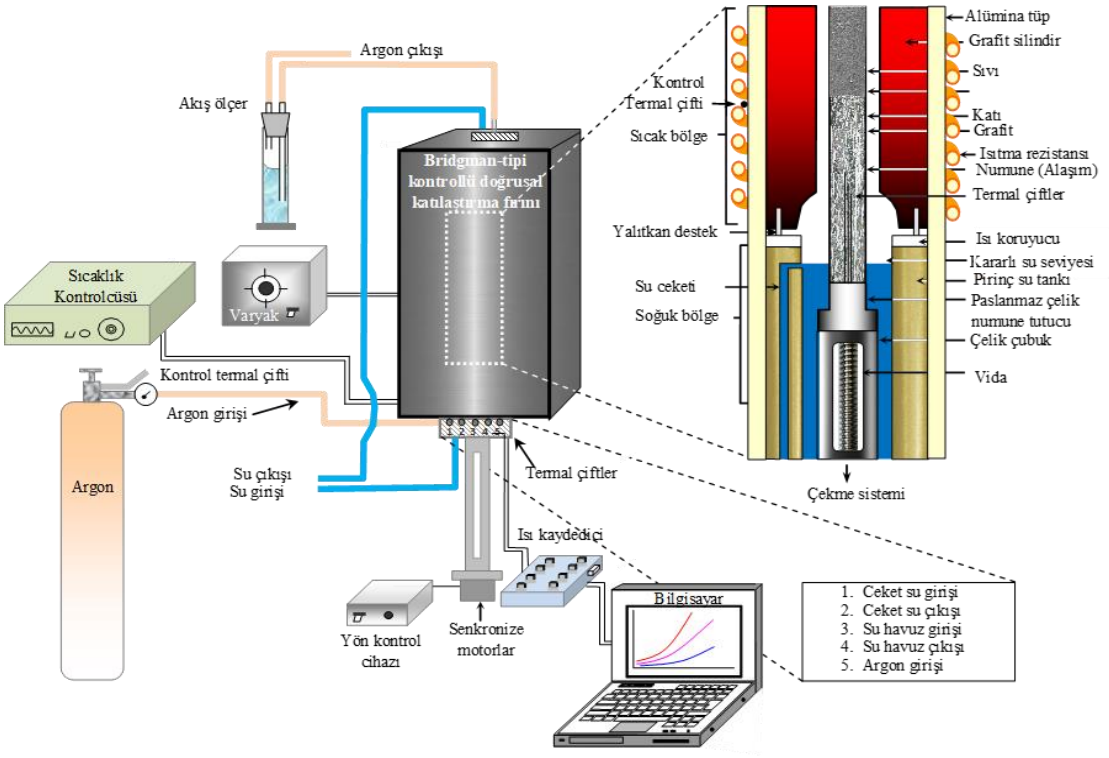
Her bir katılaştırma hızında katılaştırılan numunelerin elektriksel özdirenç değerinin hassas bir şekilde belirlenmesi için aynı numune üzerinden yaklaşık 50 ölçüm yapılarak ortalama değer alınmış ve bu sayede sonucun güvenilirliği artırılmıştır.

2.2.2 Sıcaklığa bağlı olarak özdirenç ölçümü

Seçilen bir döküm numunesinin elektriksel özdirencinin sıcaklıkla değişimi oda sıcaklığı ile 791 K aralığında ölçülmüştür. Numunenin oda sıcaklığından 791 K değerine kadar ısıtılması ve sıcaklık kontrolü Nabertherm P320 kül fırını kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm yapılacak numune yine katılaştırma hızına bağlı özdirenç ölçümündeki gibi yarım silindir kesitli 10 mm uzunluklu parlatılmış yüzey kusuru ve döküm boşluğu içermeyecek şekilde hazırlanmıştır. Numune boyutları, 10 µm'lik bir hassasiyete sahip bir dijital mikrometre kullanılarak ölçülmüştür. Elektriksel özdirenç sıcaklığa oldukça bağlıdır. Metallerde, elektrik özdirenç artan sıcaklıkla artar. Özdirencin sıcaklık katsayısı genellikle elektrik özdirencinin sıcaklık grafiğine karşı eğimi olarak ifade edilir ve şu şekilde verilebilir;

$$\alpha = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0(T - T_0)} = \frac{1}{\rho_0}\frac{\Delta\rho}{\Delta T} \quad (2)$$

burada ρ, T sıcaklığındaki özdirenci, ρ_0, oda sıcaklığındaki T_o (300 K) özdirenci ifade etmektedir.



Şekil 1. Bridgman-tipi doğrusal katılaştırma deney sistemi

2.3 *Isıl iletkenlik değerlerinin tespiti*

Bir malzemenin ısıl iletkenliği (K), malzemenin ısı iletme kabiliyetiyle ifade edilir. Malzemenin yapısına ve sıcaklığına bağlı olarak malzemenin K değeri belirlenir. Isıl iletkenlik ile elektriksel iletkenlik arasındaki ilişki, hem ısı hem de elektriksel iletimin metal içerisindeki serbest elektronlar tarafından sağlandığı gerçeğine dayanan Wiedemann-Franz denklemiyle [1] ve Smith-Palmer denklemiyle [2] açıklanmıştır. Smith-Palmer denklemi (Denklem 4) Wiedemann-Franz denkleminin (Denklem 3) modifiye edilmiş halidir.

$$\frac{K}{\sigma} = LT \tag{3}$$

$$K = 0.909L\sigma T + 10.5 \tag{4}$$

burada K, ısıl iletkenlik, σ, elektriksel iletkenlik ve L, Lorenz sayısıdır. Lorenz sayısının teorik değeri $2.45\text{x}10^{-8}$ WΩ/K^2'dir. Ancak Lorenz sayısının tüm malzemeler için aynı değerde olmadığı ve sıcaklığa bağlı değişim oranının çok az olduğu belirtilmiştir [5]. Isıl iletkenliğin sıcaklığa bağlı değişimi σ ve L değerleri kullanılarak belirlenmiştir.

2.4 *Erime noktası, erime entalpisi ve özısı niceliklerinin tayini*

Alaşım numunesine ait erime noktası (T_E), erime entalpisi (ΔH) ve özısı (c_p) değerleri diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) cihazı (Netzsch STA 449 C Jupiter balance) yardımıyla ölçülmüştür. DSC eğrileri kullanılarak aşağıdaki denklemin kullanılmasıyla numunelerin T_E, ΔH ve c_p değerleri tespit edilmiştir.

$$mc_p \frac{dT}{dt} = \frac{dQ}{dt} \tag{5}$$

Burada, dT/dt, ısıtma hızı (K/s), dQ/dt, ısı akış hızı, (J/s veya watt), m, kullanılan numunenin kütlesi ve Area=üçgenin alanı = 0.5 taban x yükseklik = 0.5 zaman x güç (numunenin erimesi için gerekli enerji) ile verilir. Bu ölçüm ve hesaplamalardaki hata payı yaklaşık olarak %5 olarak belirlenmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 *Katılaştırma hızının ve sıcaklığın elektriksel özdirenç üzerindeki etkisi*

Sabit G'de farklı V'de numunelerin elektriksel özdirenç değerleri dört nokta prob yöntemiyle Tablo 1'deki gibi katılaştırma parametrelerine bağlı olarak elektriksel özdirenç değerleri belirlenmiştir.

Şekil 2'de, elektriksel özdirenç değerlerinin artan katılaştırma hızlarına bağlı olarak değişimi gösterilmektedir. Elektriksel özdirencin (ρ) katılaştırma hızına (V) bağımlılığı;

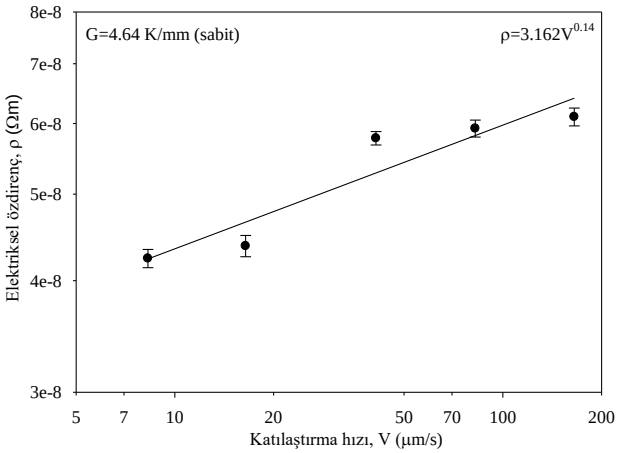
$$\rho = \text{kV}^{\text{a}} \tag{6}$$

denklemi ile ifade edilmektedir. Burada k, bir sabittir, a, katılaştırma hızına ilişkin üstel değerdir. Şekil 2 ve Tablo 1'de görüldüğü gibi, lineer regresyon analizi kullanılarak ρ ve V arasındaki ilişki $\rho = 3.162V^{0.14}$ olarak bulunmuştur. Sabit sıcaklık gradyentinde (G=4.64 K/mm) artan katılaştırma hızı (8.3-166 µm/s) ile elektriksel özdirenç değerlerinin $4.24\text{x}10^{-8}$'den $6.10\text{x}10^{-8}$ Ωm'ye arttığı görülmüştür. Standart sapma değerinin yaklaşık % 5 olduğu belirlenmiştir.

Tablo 1. Al-Cu-Si alaşımı için sabit G'de farklı V'de elektriksel özdirenç değerleri

Katılaştırma Parametreleri		Elektriksel Özdirenç Değerleri
G (K/mm)	V (µm/s)	ρ × 10^{-8} (Ωm)
4.64	8.3	4.24
	17.4	4.38
	41.5	5.78
	83.0	5.92
	166.0	6.10

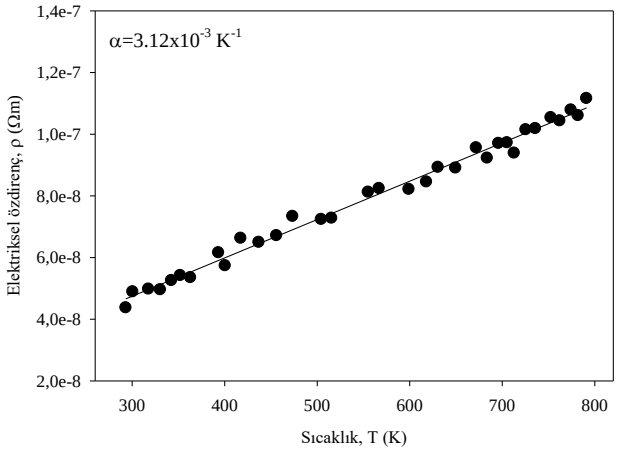
ρ için bu çalışmada bulunan V'nin üstel değeri (0.14), Kaya vd. [6] tarafından (Al-7Ni alaşımı için), Böyük [7] tarafından (Al-11.1Si-4.2Ni alaşımı için) ve Kaya vd. [8] tarafından (Al-1.94Mn-5Si alaşımı için) elde edilen sırasıyla 0.08, 0.09 ve 0.08 üstel değerlerinden biraz büyük çıkmıştır. Bu farklılıklar, alaşım elementlerindeki farklılıktan ve farklı koşullar altında numune hazırlamadan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 2. Al-Cu-Si alaşımı için elektriksel özdirenç değerlerinin katılaştırma hızı ile değişimi.

Şekil 3'de ise, elektriksel özdirenç değerlerinin sıcaklıkla değişimi verilmiştir. Artan sıcaklık değerleri (300–791 K) ile elektriksel özdirenç değerlerinin $4.37\text{x}10^{-8}$' den $1.12\text{x}10^{-7}$ Ωm'ye arttığı görülmüştür. Buradan da görüleceği üzere elektriksel özdirenç değeri üzerinde, sıcaklığın etkisi katılaştırma hızına göre çok daha fazladır. Ayrıca; 1 K'lık sıcaklık artışında 1 Ω'luk iletken direncinde oluşan artma miktarı olarak tanımlanan elektriksel özdirencin sıcaklık değişim katsayısı (α), elektriksel özdireç-sıcaklık (ρ-T)

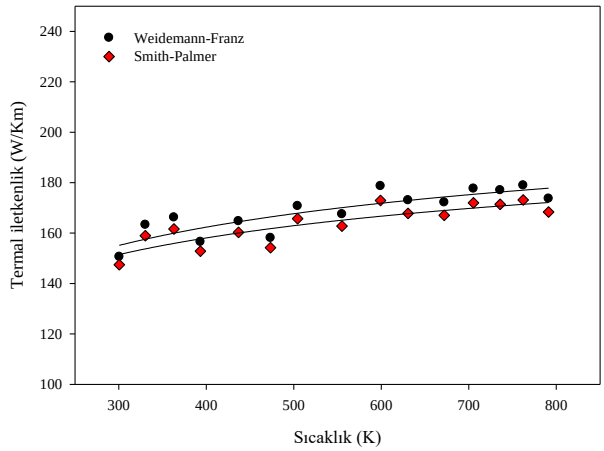
grafiğinden ve Denklem 2'den yararlanılarak $3.12x10^{-3}$ K^{-1} olarak hesaplanmıştır. Bizim bulduğumuz bu α değerini, benzer koşullar altında Böyük ve ark. [9] (Zn-1.5Cu alaşımı için) $4.95x10^{-3}$ K^{-1} olarak bulmuşlardır.



Şekil 3. Al-Cu-Si alaşımı için elektriksel özdirenç değerlerinin sıcaklık ile değişimi

3.2 Sıcaklığın termal iletkenlik üzerindeki etkisi)

Al-Cu-Si alaşımının ısıl iletkenliğinin (K) sıcaklıkla (T) değişimi, elektriksel iletkenlik (σ) ve Lorenz (L) değerleri kullanılarak Wiedemann–Franz [1] ve Smith–Palmer [2] denklemleriyle belirlenmiştir. 300–791 K sıcaklık aralığında belirlenen bu ısıl iletkenlik değerleri ayrı ayrı her iki denklem kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 2'de verilmiştir. Şekil 4'de ise ısıl iletkenliğin sıcaklığa bağlı değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4. Al-Cu-Si alaşımı için termal iletkenlik değerlerinin sıcaklık ile değişimi

Aynı sıcaklık aralığında Wiedemann–Franz denklemi kullanılarak elde edilen ısıl iletkenlik değerleri (150.63-173.67 W/Km), Smith-Palmer denklemi kullanılarak elde edilen ısıl iletkenlik değerlerinden (147.42–168.37 W/Km) az da olsa büyük çıkmıştır. Ayrıca Weidemann-Franz ve Smith-Palmer denklemleri kullanılarak belirlenen ısıl iletkenlik değerleri sıcaklık değişimlerine bağlı olarak az da olsa bir artış eğiliminde olduğu Şekil 4'de verilen değişim grafiğinde gösterilmektedir.

Bu farklılıklar, alaşım elementlerindeki farklılıktan ve farklı koşullar altında numune hazırlamadan olabileceği gibi elektron-elektron etkileşiminden de kaynaklanıyor olabilir.

Tablo 2. Al-13.6Cu-6Si alaşımı için elde edilen termal iletkenlik değerleri

Deneysel Değerler			Termal İletkenlikler	
T (K)	ρ × 10^{-8} (Ωm)	σ × 10^{+7} $(Ωm)^{-1}$	Weidemann -Franz (W/Km)	Smith-Palmer (W/Km)
300.62	4.89	2.05	150.63	147.42
330.42	4.96	2.02	163.30	158.94
363.10	5.35	1.87	166.25	161.62
393.37	6.16	1.62	156.55	152.80
436.91	6.50	1.54	164.75	160.26
473.43	7.34	1.36	158.09	154.21
504.42	7.24	1.38	170.76	165.72
555.15	8.12	1.23	167.49	162.75
599.12	8.21	1.22	178.69	172.93
630.62	8.93	1.12	173.03	167.79
671.93	9.56	1.05	172.19	167.02
705.29	9.72	1.03	177.68	172.01
735.83	10.18	0.98	177.02	171.41
762.11	10.44	0.96	178.93	173.15
791.17	11.16	0.90	173.67	168.37

3.3 Al-Cu-Si alaşımının DSC analizi

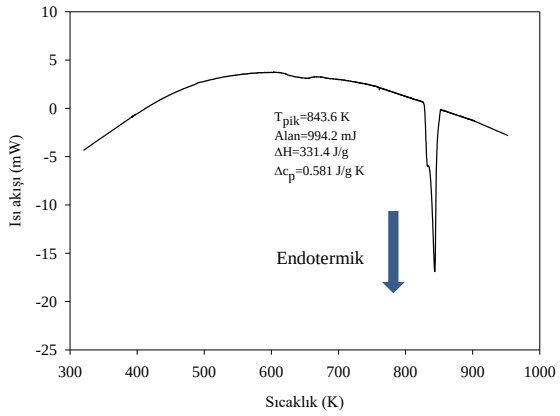
DSC deneylerinden elde edilen ve Şekil 5'te verilen sıcaklık-ısı akışı grafiği malzemeler hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Al–13.6Cu-6Si alaşımının termal özellikleri, DSC analizi ile 320–953 K sıcaklık aralığında 10 K/dak ısıtma hızı kullanılarak yapılmıştır. Birim kütlenin erimesi için gerekli olan enerji değeri, Entalpi (ΔH),

$$\Delta H = \text{Alan (mJ)}/\text{kütle (mg)} \qquad (7)$$

ifadesiyle hesaplanmıştır. Burada Alan (Area), oluşan pikin sınırladığı alandır ve kütle ise cihazın içine yerleştirilen numunenin mg cinsinden değeridir (~3 mg).

Şekil 5'deki DSC eğrisinin ilk bükümün oluşmasıyla erime süreci başlamış keskin pik noktasında ise tam erime gerçekleşmiştir. Al–13.6Cu-6Si alaşımının erime sıcaklığı (T_E) 843.6 K, erime entalpisi (ΔH) 331.4 J/g ve özısısı (c_p) 0.581 J/gK olarak tespit edilmiştir.

Benzer koşullarda Böyük [7] tarafından (Al-11.1Si-4.2Ni alaşımı için) T_E=837.73 K, ΔH=411.03 J/g ve Δc_p=0.716 J/(gK) değerleri, Kaya vd. [8] tarafından (Al-1.94Mn-0.5Si alaşımı için) T_E=944.7 K, ΔH=185.5 J/g ve Δc_p=0.276 J/(gK) değerleri, Böyük [9] tarafından (Zn-1.5Cu alaşımı için) T_E=699.47 K, ΔH=156.94 J/g ve Δc_p=0.368 J/(gK) değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. Al-Cu-Si alaşımına ait ısı akışı-sıcaklık eğrisi

4 Sonuçlar

Al-13.6Cu-6Si alaşımının elektriksel ve ısıl özellikleri incelenmiş ve sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Sabit G'de (4.64 K/μm) artan V'de (8.3-166 μm/s) ρ değerleri $4.24x10^{-8}$'den $6.10x10^{-8}$ Ωm değerine kadar artmıştır.
2. Sıcaklığın 300 K'den 791 K'e artmasıyla ρ değerleri $4.37x10^{-8}$'den $1.12x10^{-7}$ Ωm değerine kadar artmıştır.
3. α değeri, $3.12x10^{-3}$ K^{-1} olarak tespit edilmiştir.
4. Sıcaklığın 300 K değerinden 791 K değerine artırılmasıyla, Wiedemann–Franz denklemi yardımıyla ısıl iletkenlik değerleri 150.63–173.67 W/Km aralığında, Smith-Palmer denklemi yardımıyla ısıl iletkenlik değerleri 147.42–168.37 W/Km aralığında bir artış göstermiştir.
5. Al–13.6Cu-6Si alaşımına ait elde edilen DSC eğrisinden alaşımın erime sıcaklığı (T_E) 843.6 K, ΔH değeri 331.4 J/g ve c_p değeri 0.581 J/gK olarak hesaplanmıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %17

Kaynaklar

[1] C. Kittel, Introduction to Solid State Physics, 6th. Ed., Wiley, New York , 1965.

[2] D.R. Poirier and G. H. Geiger, Transport Phenomena in Materials Processing, The Minerals, Metals & Materials Society, Warrendale, PA, 1994.

[3] E. Üstün and E. Çadırlı, Investigation of the microstructure and physical properties of directionally solidified ternary Al-8.8La-1.2Ni alloy. Journal of Alloys and Compounds, 855, 157731, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157331.

[4] E. Çadırlı, M. Sahin, R. Kayalı, M. Arı, S. Durmuş, Dependence of electrical and thermal conductivity on temperature in directionally solidified Sn–3.5 wt% Ag eutectic alloy. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 22, 1709–1714, 2011. https://doi.org/10.1007/s10854-011-0350-9.

[5] G.S. Kumar, G. Prasad and R.O. Pohl, Experimental determinations of the Lorenz number, Journal of Materials Science, 28, 4261–4272, 1993. https://doi.org/10.1007/BF01154931.

[6] H. Kaya, U. Böyük, Çadırlı, E. and N. Maraşlı, Influence of growth rate on microstructure, microhardness, and electrical resistivity of directionally solidified Al-7 wt% Ni hypo-eutectic alloy. Metals and Materials International, 19(1), 39-44, 2013. https://doi.org/10.1007/s12540-013-1007-4.

[7] U. Böyük, Physical and mechanical properties of Al-Si-Ni eutectic alloy. Metals and Materials International, 18(6), 933–938, 2012. https://doi.org/10.1007/s12540-012-6004-5.

[8] H. Kaya, E. Çadırlı and U. Büyük, Microstructure, microhardness, tensile, electrical, and thermal properties of the Al-Mn-xSi ternary alloys, Kavove Materialy Metallic Materials, 58(4), 275-285, 2020 https://doi.org/10.4149/km_2020_4_275.

[9] U. Böyük, H. Kaya, E. Çadırlı, N. Maraşlı, A. Ülgen, Investigation of the effect of solidification processing parameters on microhardness and determination of thermo–physical properties in the Zn–Cu peritectic alloy, Journal of Alloys and Compounds, 491(1-2), 143–148, 2010. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.10.184.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 099-106
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
Araştırma makalesi / Research article
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Turbofan motorlarının kestirimci bakımında makine öğrenimi algoritmaları performanslarının karşılaştırılması

Comparison of machine learning algorithms performance in predictive maintenance of turbofan engines

Osman Güler[1,*]

[1] *TUSAŞ Şehit Hakan Gülşen Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi,06890, Ankara Türkiye*

Öz

Endüstri 4.0 kapsamında atılan önemli adımlardan birisi kestirimci bakım çalışmalarıdır. Bu sayede makine ve ekipman ömrünü uzatılmakta, çalışma verimliliği artırılmaktadır. Özellikle havacılık sanayii alanında uçuş güvenliği hayati önem taşıdığından dolayı, uçakların ve uçak motorlarının kestirimci bakım çalışmaları önemlidir. Bu çalışmada, turbofan motorlarının kalan faydalı ömrünü tahmin etmek için 10 farklı makine öğrenmesi algoritmaları kullanılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Eğitimler için NASA tarafından sunulan turbofan motorların belirli koşullar altında çalışma durumlarını gösteren CMAPSS veriseti kullanılmıştır. Çalışma sonuçları makine öğrenmesi modellerinin genel olarak birbirlerine yakın performans elde ettiğini göstermektedir. Yapılan deneyler sonucunda LDA algoritmasının en başarılı algoritma olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Makine öğrenmesi, Kestirimci bakım, NASA Turbofan veri seti, Uçak motoru, Kalan faydalı ömür

Abstract

One of the important steps taken within the scope of Industry 4.0 is predictive maintenance studies. In this way, machine and equipment life is extended and working efficiency is increased. Predictive maintenance studies of aircraft and aircraft engines are important, especially since flight safety is of vital importance in the aviation industry. In this study, 10 different machine learning algorithms were used to predict the remaining useful life of turbofan engines and their results were compared. For the trainings, the CMAPSS dataset, which shows the working conditions of turbofan engines under certain conditions, presented by NASA was used. The results of the study show that machine learning models generally achieve similar performance to each other. As a result of the experiments, it was seen that the LDA algorithm was the most successful algorithm.

Keywords: Machine learning, Predictive maintenance, NASA Turbofan dataset, Aircraft engine, Remaining useful life

1 Giriş

Günümüzde endüstriyel alanlarda maliyeti azaltmak, verimliliği ve üretim kapasitesini artırmak, makine ve ekipman ömrünü uzatmak için kestirimci bakım yaygın olarak kullanılan bir bakım stratejisidir. Kestirimci bakımın etkin olarak kullanıldığı alanlardan biri de havacılık sektörü ve uçak motorları bakımıdır. Uçuşlarda meydana gelebilecek motor arızaları, ölümle sonuçlanabileceği için, uçak motorlarının arızaların önlenmesi ve bakımın doğru zamanda yapılması çok önemlidir.

Geleneksel uçak bakım yöntemlerinde, özel olarak eğitilmiş teknisyenler tarafından belirli zaman aralıklarında veya belirli bir motor çalışma saatine göre rutin bakım planlanmakta ve arıza durumunda bakım onarım faaliyetleri yapılmaktadır. Uçaklar gelişen teknoloji ile birlikte uçuş donanımlarının durumları, teşhisleri ve olası arızaları hakkında sürekli bilgi toplayan sensörlerle donatılmıştır [1]. Bu sensörlerden düzenli olarak gelen veriler sayesinde sorunları doğru bir şekilde tahmin etmek, bakım yöntemlerini kolaylaştırmıştır ve bakım faaliyetlerinin daha etkin bir şekilde planlanmasını sağlamıştır [2]. Kestirimci bakım, geleneksel periyodik bakım yönetimlerinin yerini alamaz belki ama bakım görevleri için bir zamanlama aracı sağlayarak daha güvenilir hale getirebilir [3]. Uçağın motor koşullarına ilişkin veriler sensör ile okunarak, motorun kalan faydalı ömrü (Remaining Useful Life-RUL) tahmin edilebilir, motorun ne zaman bozulacağını veya arızalanacağını kullanıcıya bildirilebilir [4].

Genel olarak kestirimci bakım çalışmaları planlı bakım ve plansız bakım olarak iki şekilde yapılmaktadır [5]. Aynı şekilde uçak motorları için kestirimci bakım çalışmaları çeşitli teknikler ve araçlar kullanılarak iki alanda gerçekleştirilebilir [6]. Birincisi, motorların çalışma verileri ve performansları izlenerek, bu veriler ile motorların bakıma alınma zamanları tahmin edilebilir. İkincisi, motor parçalarının durumu takip edilerek, önceden belirlenmiş bir zaman aralığında veya deforme olması durumunda değiştirilmesi sağlanabilir.

Uçak motoru RUL tahmini üzerine yapılmış olan birçok çalışma bulunmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiği zaman, kestirimci bakım ile uçak motoru üzerinde bulunan sensörlerden gelen verilerin, yapay zekâ teknikleri kullanılarak analiz edildiği görülmektedir. Çalışmalarda genel olarak Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hanciosman@hotmail.com (O. Güler)
Geliş / Recieved: 16.03.2023 Kabul / Accepted: 29.10.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1266541

(National Aeronautics and Space Administration-NASA) tarafından havacılık endüstrisinde motor bakımını geliştirmek ve uçak güvenliğini artırmak amacıyla sunulan Ticari Modüler Havacılık Tahrik Sistemi Simülasyonu (Commercial Modular Aero-Pulsion System Simulation – C-MAPSS) veri setinin kullanıldığı görülmüştür. C-MAPSS veriseti, uçak turbofan motorlarının performansını izleme ve kestirimci bakım tahmini için yaygın olarak kullanılan önemli bir kaynaktır. Makine öğrenmesi, derin öğrenme, nesne algılama, veri oluşturma ve bulanık mantık teknikleri araştırmacılar tarafından kullanılan çeşitli yöntemlerdir.

Kızrak vd. [6], C-MAPSS veri setini kullanarak uçak motorlarının RUL tahmini üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında yapay bir yinelemeli sinir ağı (RNN) mimarisi olan Uzun-Kısa Süreli Bellek (LSTM) yapısı kullanmışlar ve sonuçta en yüksek %98,876 sınıflandırma başarımı elde etmişlerdir.

Abbas vd. [7], C-MAPSS veri setini kullanarak, gizli Markov modeline dayalı derin pekiştirmeli öğrenme ile uçak motorlarının RUL tahmin eden yeni bir hiyerarşik yaklaşım önerdiler. Önerilen yaklaşımın performansı değerlendirmek için sonuçlar, temel modellerle ve Bayes filtrelemeye dayalı derin pekiştirmeli öğrenme ile yapılan çalışmalarla karşılaştırılmış ve sonuçların daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir.

Dangut vd. [8], heterojen yapıda olan uçak merkezi bakım sistemi veri setindeki dengesiz sınıflandırma probleminin üstesinden gelmek için Dengeli Kalibrasyonlu Hibrit Topluluk Tekniği adlı yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Önerilen yaklaşımın diğer benzer yöntemlerden daha iyi performans gösterdiğini belirtilmiştir.

Xu vd. [9], kılavuzlu dalga (GW) tabanlı evrişimsel sinir ağı (CNN) yöntemine dayalı bir yorulma çatlağı teşhis yöntemi önermişlerdir. GW özellikleri, çok kanallı GW sinyallerinden elde edilmiş, yorulma çatlamasını teşhis etmek için tasarlanmış bir CNN uygulanmıştır. Uçak bağlantı elemanı olan biyel kolu üzerinde yapılan yorulma testleri sonucunda %98,98 eğitim doğruluk oranı ve %94,92 test doğruluk oranı elde etmişlerdir.

Vollert vd. [10], C-MAPSS veri seti üzerine yapılan makine öğrenmesi tabanlı RUL tahmini üzerine yapılan araştırmaları incelemişlerdir. Sık kullanılan modelleri belirleyerek, model performansını karşılaştırmalı olarak değerlendirmişlerdir.

Bruneo vd. [11], turbofan motorların RUL tahmin etmek için LSTM ağı kullanan bir model önermişlerdir. Çalışma da LSTM ağında kullanılan hiperparametre değerleri değiştiği zaman, LSTM performansının da değiştiğini göstermişlerdir. Elde edilen sonuçları literatürde bulunan sonuçlarla karşılaştırmışlardır.

Düdükçü vd. [12], LSTM ve WaveNet ile C-MAPSS veri setini kullanarak turbofan motorlarının RUL tahmin eden bir model önermişlerdir. LSTM testlerinden elde edilen ortalama kare hatası (MSE) değerleri FD001 için 11.02 ve FD003 için 26.89'dur. WaveNet testlerinden elde edilen MSE değerleri FD001 ve FD003 için sırasıyla 10.85, 20.71'dir. Sonuçta, önerilen karar seviyesi füzyon sisteminin kestirimci bakım için umut verici olduğunu belirtmişlerdir.

Mathew vd. [13], NASA'nın Prognostik Veri Havuzundaki turbofan motoru verileri ile uçağın turbofan motorunun RUL tahmin etmek için mevcut makine öğrenimi algoritmalarını karşılaştırmıştır.

Khan vd. [14], kestirimci bakım üzerine hava taşıtlarının hidrolik sistemi ve motoru üzerine yapılan çalışmaları özetleyen bir derleme çalışması yapmışlar ve sonuçta kestirimci bakımın ve büyük veri kümeleri için veri ön işleme tekniklerinin önemini vurgulamışlardır.

Girgin vd. [15] uçak motorlarının RUL tahmin etmek için öznitelik odaklı çerçeve yaklaşım önermişlerdir. Çalışma kapsamında farklı makine öğrenmesi ile eğitimler yapmışlar ve radyal tabanlı fonksiyon ve Destek Vektör Regresyonu algoritmasının diğer algoritmalardan daha başarılı sonuç verdiğini belirtmişlerdir.

Pillai vd. [16] özellik oluşturma ve RUL tahminini ayıran iki aşamalı Evrişimli Bileşik Özelliklere (MLE + CCF) sahip Çok Kayıplı Kodlayıcı yaklaşım önermişlerdir. Çalışma sonucunda endüstrilerdeki kestirimci bakım uygulamaları için önerilen modelin uygunluğunu doğrulamışlardır.

Siddique vd. [17], RUL tahmin etmek için kullanılan akıllı sensörlerin ve sistemlerin siber saldırılara maruz kalabileceği için bu tarz saldırıların etkisini kapsamlı bir şekilde analiz etmişler ve derin öğrenme özellikli kestirimci bakım modelleri için yeni bir savunma tekniği önermişlerdir.

Bu çalışmada, uçak motorlarının arızasını önlemek amacıyla, turbofan motorlarının bakıma gitmeden önce kalan faydalı kullanım ömrünü tahmin etmek için 10 farklı makine öğrenmesi algoritması ile eğitimler yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında NASA tarafından sunulan C-MAPSS veriseti kullanılmıştır. C-MAPSS veriseti üzerinde farklı makine öğrenme algoritmalarının kullanılması, motor arızası tahmini konusundaki araştırmalar için çok sayıda avantaj sunar. Bu algoritmaların performansının karşılaştırılması ve analizi, endüstriyel sistemlerin güvenilirliği ve bakımını iyileştirmek için önemlidir. C-MAPSS veri seti, farklı motorlar, çalışma koşulları ve arıza senaryolarını içerdiği için, turbofan motorlarının çeşitli faktörlere nasıl tepki verdiğini ve bakım ihtiyaçlarını tahmin etmeye yardımcı olur. Ayrıca, sensör verileri ve motorların kullanım ömrü tahminleri gibi değerli bilgiler içerir, bu da makine öğrenimi ve veri analizi uygulamaları için büyük bir potansiyel sunar. Çalışmanın ikinci bölümünde kullanılan veriseti ve makine öğrenmesi algoritmaları hakkında bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde makine öğrenmesi algoritmaları ile yapılan deneysel sonuçlar sunulmuştur. Dördüncü bölümde araştırma sonuçları tartışılmış ve çalışma değerlendirilerek sonlandırılmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1. Veriseti

Çalışma kapsamında NASA tarafından C-MAPSS simülatörü ile oluşturulan veri seti kullanılmıştır. Sağlanan veriler, bir dizi uçuş boyunca nominal ve hatalı motor bozulmasını simüle etmek için tasarlanmış yüksek doğruluk oranlı sistem düzeyinde bir motor simülasyonundan alınmıştır [18,19]. C-MAPSS veriseti, farklı çalışma koşullarını temsil eden FD001, FD002, FD003 ve FD004

olmak üzere dört farklı alt veri setini içerir. Her alt veri seti, farklı sayıda motor ve farklı çalışma koşullarını içerir. FD001 veriseti 100 motora ait eğitim ve test verisini, FD002 veriseti 260 motora ait eğitim ve 259 motora ait test verisini, FD003 veriseti 100 motora ait eğitim ve test verisini, FD004 veriseti 249 motora ait eğitim ve 248 motora ait test verisini içerir. Toplamda, veri setinde 559 farklı turbofan motora ait veriler bulunmaktadır. C-MAPSS veriseti, motorların farklı deniz seviyesi irtifalarında, Mach sayılarında ve sıcaklık aralıklarında nasıl davrandığını simüle eder. Ayrıca farklı arıza senaryolarını içerir. Örneğin, yüksek basınç kompresörü (High-Pressure Compressor - HPC) bozulmaları gibi motorlardaki arızaların etkilerini simüle eder. C-MAPSS veriseti, motorlardan alınan çeşitli sensör ölçümlerini de içermektedir. Bu sensör verileri, motorların performansını ve sağlığını izlemek için kullanılır. Her motor için, motorun RUL bilgisi de bulunmaktadır. Bu, motorların ne zaman bakıma ihtiyaç duyabileceğini tahmin etmek için önemlidir.

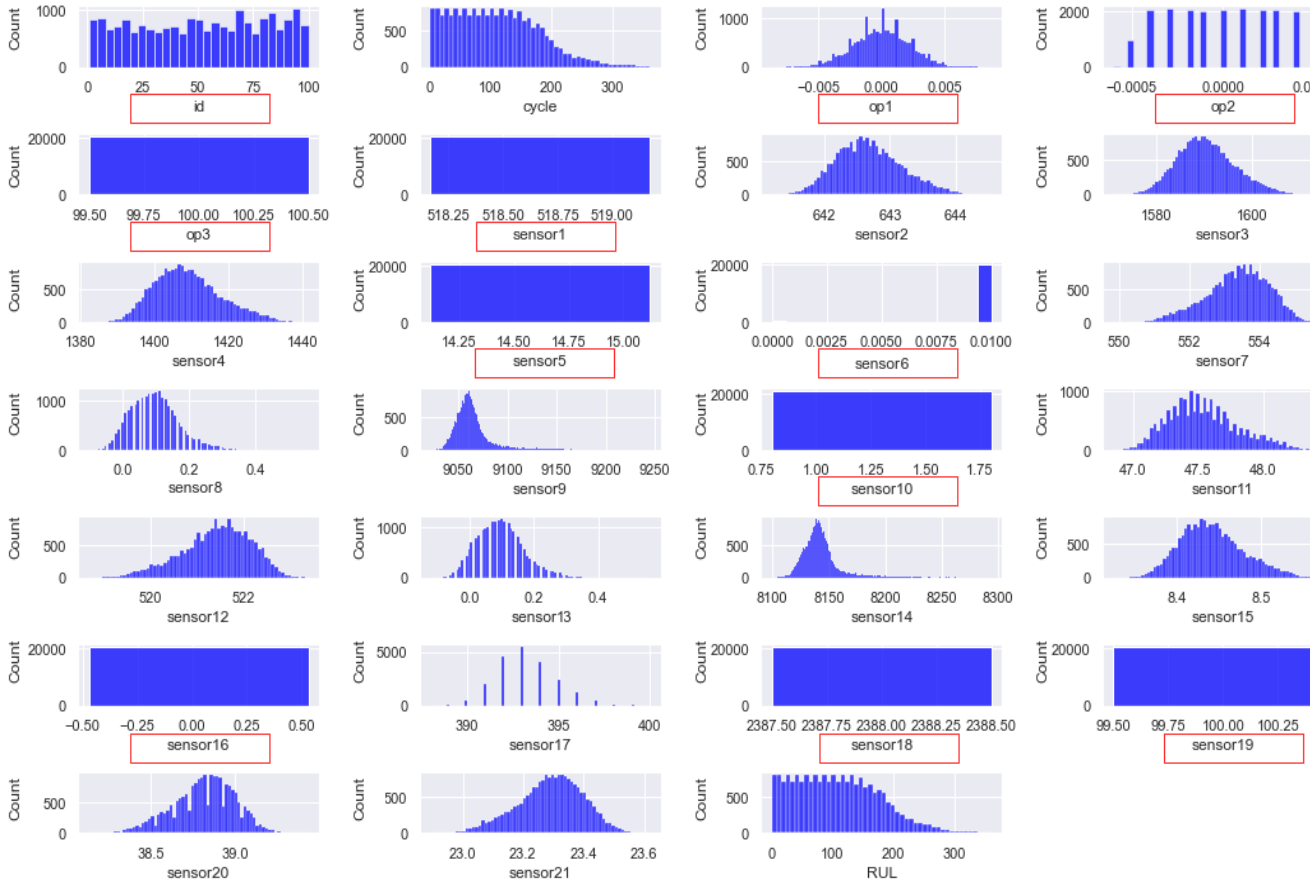
C-MAPSS veriseti, turbofan motorlarının tahmini bakımı ve motor sağlığının izlenmesi için değerli bir kaynaktır çünkü gerçekçi veriler sağlar, farklı arıza senaryoları içerir, geniş veri miktarına ve çeşitliliğine sahiptir. Bu veriseti, motorların daha güvenli, verimli ve maliyet etkin bir şekilde işletilmesine katkıda bulunur. Bu veriseti, motorların sağlığını izlemek, arızaları önceden tahmin etmek ve bakımı optimize etmek için kullanılan kestirimci bakım sistemlerinin geliştirilmesine imkân sağlar, araştırma, geliştirme ve endüstri uygulamaları için uygun yapıdadır.

Aşağıdaki Tablo 1'de C-MAPSS veri setine ait bilgiler verilmiştir. Hata Modunun 1 olması HPC arızasını ifade ederken, Hata Modunun 2 olması ise HPC Bozulması ve Fan Bozulması durumlarını ifade etmektedir. Simülasyon yazılımı, deniz seviyesinden 40.000 fite kadar irtifalarda, 0 ila 0.90 Mach sayısında ve -60 ila 103 F arasındaki ortam sıcaklıklarında motor çalışmasına izin veren bir atmosferik model içerir. Çalışma koşulları deniz seviyesini ifade etmektedir.

Tablo 1. C-MAPSS veriseti bilgileri

	FD001	FD002	FD003	FD004
Çalışma Koşulları	1	6	1	6
Hata Modu	1	1	2	2
Eğitim Seti Motor Sayısı	100	260	100	249
Test Seti Motor Sayısı	100	259	100	248

Bu çalışmada, turbofan motorlarının RUL tahmini için C-MAPSS veri setinin FD001 alt verisi kullanılmıştır. Bu veriseti, 100 motora ait verileri içermektedir. Veri setine ait sensörlerin ölçüm değerlerine ait grafikler Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Sensör ölçüm değerleri

Şekilde verisetine ait, birim numarası (identification number, id), zaman (cycle), operasyonel ayar1 (op1), operasyonel ayar2 (op2), operasyonel ayar3 (op3) verileri ile 1' den 21'e kadar numaralandırılmış sensörlere ait veriler ve RUL bilgisi görülmektedir. id, op1, op2 ve op3 parametreleri turbofan motorlara ait herhangi bir bakım, arıza, RUL verisi içermediği ve sonuçlara bir katkı sağlamadığı için çalışma sırasında verisetinden çıkarılmıştır. Sensör ölçüm değerleri incelendiği zaman sensör1, sensör5, sensör6, sensör10, sensör16, sensör18 ve sensör19 sensörlerinin simülasyon süresince sabit değer ürettiği, hiçbir değişiklik göstermediği görülmektedir. Bu sensörlere ait veriler, veri seti hakkında bilgi sağlamadığı ve eğitim sonuçlarına anlamlı katkı sunmadığı için eğitimler sırasında veri setinden çıkarılmıştır.

2.2. Makine öğrenmesi algoritmaları

C-MAPSS veriseti üzerinde turbofan motorların kestirimci bakım tahmini için Lojistik Regresyon, K-En Yakın Komşu, Destek Vektörü Makineleri, Karar Ağaçları, Rastgele Orman, Adaptive Boosting, Aşırı Gradyan Artırma, Naive Bayes, Stokastik Gradyan İniş ve Doğrusal Diskriminant Analizi algoritmaları kullanılmıştır. Bu algoritmalar farklı öğrenme yaklaşımlarını temsil eder. C-MAPSS veriseti oldukça karmaşıktır ve birçok değişken içerir. Bu tür karmaşık verileri işlemek ve analiz etmek, verisetinin içyapısını anlamak ve en iyi sonuçları alabilmek için farklı algoritmaların öğrenme yeteneklerini değerlendirmek önemlidir. Bazı algoritmalar daha iyi genelleme yapabilirken diğerleri daha karmaşık ilişkileri yakalama yeteneğine sahip olabilir. Bu nedenle bu çalışmada 10 farklı makine öğrenmesi algoritması ile çalışılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

2.2.1. Lojistik regresyon (Logistic regression - LR)

Lojistik regresyon analizi, özellikle (evet- hayır, var-yok vb.) ikili sınıflandırma problemlerinde ve bir olayı tahmin etmek için kullanılan istatiksel bir tekniktir. Maksimum olasılık tahmini ile olası sonuçları açıklayan olasılıkların bir lojistik işlevi aracılığıyla modellendiği doğrusal bir modeldir [20].

2.2.2. K-En yakın komşu (K-Nearest neighbor –KNN)

KNN algoritması, sınıflandırılması istenilen verinin bulunduğu noktanın daha önceden eğitilmiş ve sınıflandırılmış noktalara olan uzaklığı hesaplayarak, en yakın komşunun dâhil olduğu sınıfa göre tahmin oluşturur [21]. Giriş, en yakın komşuları paylaştığı sınıfa atanır.

2.2.3. Destek vektörü makineleri (Suport vector machine - SVM)

SVM makine öğrenmesi alanında ikili sınıflandırma için yaygın olarak kullanılan bir algoritmadır. SVM, iki farklı sınıf arasında doğrusal bir sınır belirler ve sınır her sınıftaki en yakın veri noktalarına olan mesafesi maksimum olacak şekilde yönlendirilir [22]. En yakın veri noktaları destek vektörleri olarak bilinir.

2.2.4. Karar ağaçları (Decision tree -DT)

Karar ağaçları, bir ağaç yapısı şeklinde, düğümlerin bir veri kümesi özelliklerini, dalların karar kurallarını ve yaprakların düğümün sonucunu temsil ettiği bir sınıflandırıcıdır [23]. Karar düğümü ve yaprak düğümü olmak üzere iki çeşit düğüm içerir. Karar düğümleri herhangi bir karar vermek için kullanılır ve birden fazla dala sahip olabilir, yaprak düğümler ise bu kararların çıktısıdır ve başka dal içermez [24].

2.2.5. Rastgele orman (Random forests - RF)

Rastgele orman algoritması, çıktının içerisindeki birkaç DT sınıflandırıcısı tarafından toplu olarak belirlendiği bir topluluk öğrenme algoritmasıdır [25]. Ormandaki ağaç sayısı arttığında, ormanlar için genelleme hatasındaki yanılgı yakınsamaktadır.

2.2.6. Adaptive boosting (AdaBoost)

AdaBoost algoritması bir topluluk öğrenme modelidir ve modelin başarısını artırmak için zayıf öğreniciler üzerine odaklanır [26]. Adaboost algoritmasında doğru sınıflandırılmayan zayıf öğrenicilerin ağırlıklarını artırılarak daha güçlü bir modeli elde edilir.

2.2.7. Aşırı gradyan artırma (Extreme gradient boosting – XGBoost)

Xgboost algoritması ölçeklenebilir bir uçtan uca ağaç öğrenme algoritması içeren gradyan artırma çerçevesinin verimli ve ölçeklenebilir bir uygulamasıdır [27]. Regresyon, sınıflandırma ve sıralama gibi çeşitli problemlerin çözümünde etkin olarak kullanılabilir.

2.2.8. Naive bayes (NB)

Naïve Bayes sınıflandırıcısı, özniteliklerin sınıfa göre koşullu olarak diğer özniteliklerin değerlerinden bağımsız olduğuna dair güçlü bir varsayımla birlikte Bayes kuralını kullanan basit bir öğrenme algoritmasıdır [28]. Sınıf koşullu bağımsızlık adını alan bu varsayım, hesaplamaları basitleştirmek için kullanılır [29].

2.2.9. Stokastik gradyan iniş (Stochastic gradient descent – SGD)

Stokastik gradyan iniş (SGD) algoritması, gradyanı tam olarak hesaplamak yerine, bu gradyanı rastgele seçilmiş bir örnek temelinde tahmin eden yinelemeli bir metot kullanır [30].

2.2.10. Doğrusal diskriminant analizi (Linear discriminant analysis - LDA)

Popüler bir veri madenciliği algoritması olan Doğrusal Diskriminant Analizi, sınıflar arası varyansı en aza indiren ve sınıfların öngörülen ortalamaları arasındaki mesafeyi en üst düzeye çıkaran iz düşüm hiperdüzleminin bulunmasından oluşur [31].

3 Bulgular

Bu çalışmada turbofan motorların RUL tahmini için özellikle sınıflandırma çalışmalarında yaygın olarak kullanılan 10 farklı makine öğrenme algoritması kullanılmıştır. NASA C-MAPSS veriseti üzerinde LR, KNN, SVM, DT, RF, AdaBoost, XGBoost, NB, SGD ve LDA algoritmaları ile eğitimler gerçekleştirilmiştir.

Eğitimler sırasında algoritmaların elde ettiği doğruluk ve çapraz doğrulama sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Doğruluk ve çapraz doğrulama sonuçları

Algoritma	Doğruluk	Çapraz Doğrulama
LR	95.0 %	94.82%
KNN	94.0 %	94.09%
SVM	95.0 %	94.86%
DT	92.0 %	93.73%
RF	95.0 %	94.68%
AdaBoost	95.0 %	94.74%
XGBoost	95.0 %	94.88%
NB	93.0 %	94.87%
SGD	95.0 %	93.87%
LDA	95.0 %	94.93%

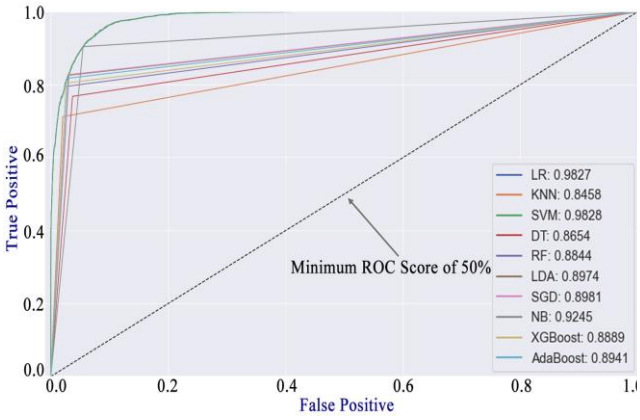
Tablo 2 incelendiği zaman, train_FD001 veriseti üzerinde makine öğrenmesi algoritmalarının 92% ile 95% arasında doğruluk, 93.73% ile 94.93% arasında çapraz doğrulama sonucu elde ettiği görülmektedir. Genel olarak makine öğrenmesi algoritmalarının train_FD001 veriseti üzerinde başarılı olduğunu söyleyebiliriz. En başarılı ilk üç algoritmanın sırasıyla LDA, XGBoost ve SVM olduğu görülmektedir. LDA algoritması 95% doğruluk ve 94.93% çapraz doğrulama, XGBoost algoritması 95% doğruluk ve 94.88% çapraz doğrulama, SVM algoritması 95% doğruluk ve 94.86% çapraz doğrulama değerleri elde etmiştir. Makine öğrenmesi algoritmalarının eğitimler sırasında train_FD001 veriseti üzerinde başarılı olduğunu görmekteyiz. Modellerin performansını test etmek ve en başarılı modelleri bulmak için çeşitli performans metrikleri ile test_FD001 veriseti değerlendirmeler yapılmıştır. Test verilerini değerlendirmek için Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık, F1-Skoru, Eğri Altındaki Alan - Alıcı Çalışma Karakteristikleri (AUC-ROC) performans metrikleri hesaplanmıştır. Tablo 3'te test_FD001 veriseti üzerinde yapılan performans değerlendirme sonuçları verilmiştir.

Tablo 3. Performans metrik sonuçları

Algoritma	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1 skor
LR	79.70 %	0.73	0.23	0.35
KNN	78.95 %	0.66	0.22	0.34
SVM	79.73 %	0.73	0.23	0.35
DT	78.93 %	0.67	0.22	0.33
RF	79.28 %	0.69	0.23	0.34
AdaBoost	78.41 %	0.59	0.30	0.39
XGBoost	79.35 %	0.67	0.26	0.37
NB	77.73 %	0.55	0.35	0.43
SGD	79.73 %	0.72	0.24	0.36
LDA	79.82 %	0.78	0.20	0.32

Test verileri üzerinde yapılan performans değerlendirmeleri incelendiği zaman, modellerin başarım oranlarının eğitim verisetine göre düştüğü görülmektedir. En yüksek doğruluk oranına sahip ilk üç algoritmanın sırasıyla LDA (79.82%),SVM (79.73%) ve SGD (79.73%), en yüksek kesinlik oranına sahip ilk üç algoritmanın sırasıyla LDA(0.78), SVM (0.73) ve LR (0.73), en yüksek duyarlılık oranına sahip ilk üç algoritmanın sırasıyla Naive Bayes(0.35), AdaBoost (0.30) ve XGBoost (0.26), en yüksek F1-skor oranına sahip ilk üç algoritmanın sırasıyla NB(0.43), AdaBoost (0.390) ve XGBoost (0.37) olduğu görülmektedir.

Makine öğrenmesi algoritmalarına ait sınıflandırma performansları göstermek için AUC-ROC eğrisi Şekil 2'de ve AUC-ROC skor değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Şekil 2 ve Tablo 4'de görüldüğü üzere en iyi sınıflandırma performansı gösteren ilk üç algoritma sırasıyla SVM, LR ve NB algoritmalarıdır.

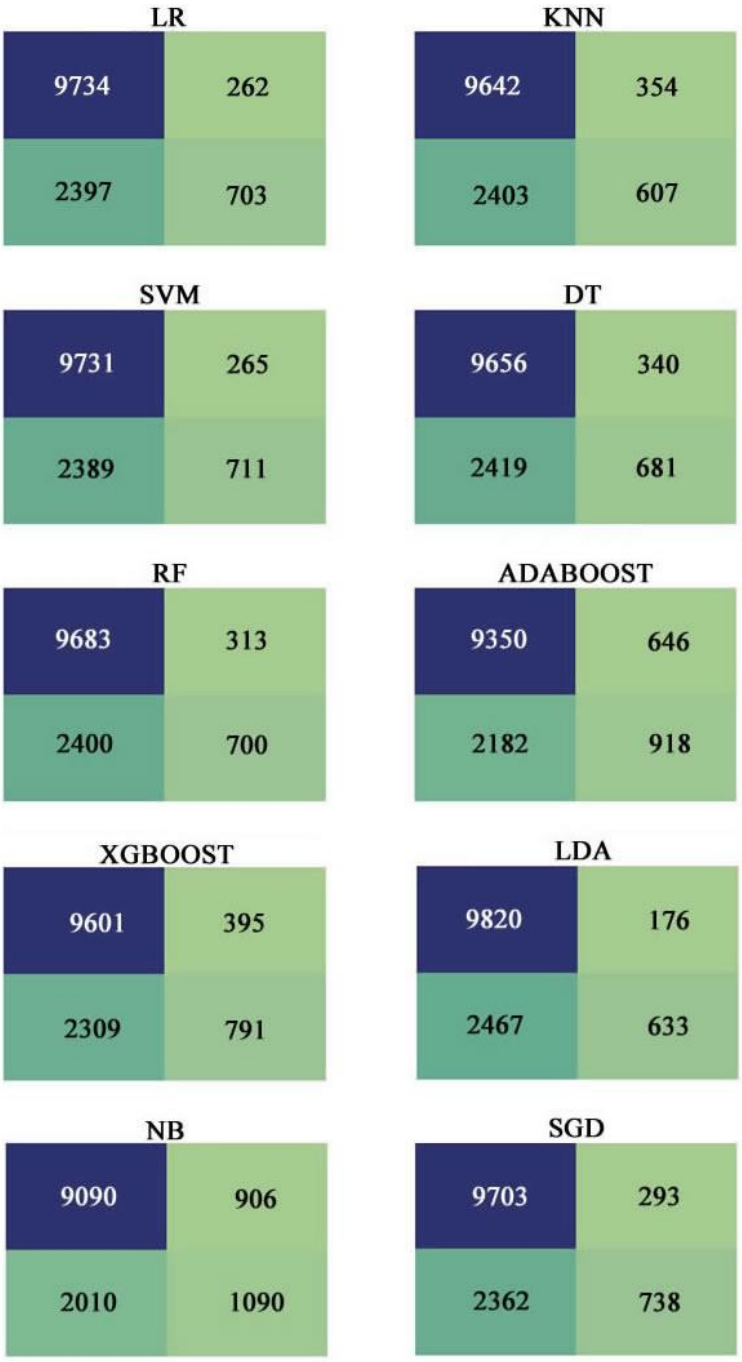


Şekil 2. Auc-Roc grafiği

Tablo 4. Auc-Roc sonuçları

Algoritma	Auc Roc Skor
LR	0.9827
KNN	0.8458
SVM	0.9828
DT	0.8654
RF	0.8844
AdaBoost	0.8941
XGBoost	0.8889
NB	0.9245
SGD	0.8981
LDA	0.8974

Makine öğrenmesi algoritmalarının NASA-CMAPSS veriseti üzerinde turbofan motorlarının RUL tahmini performansını ölçmek için karmaşıklık matrisleri hesaplanmıştır. Şekil 3'te verilen karmaşıklık matrisleri incelendiği zaman en iyi performans gösteren ilk üç algoritmanın sırasıyla LDA, LR ve SVM algoritmaları olduğu görülmektedir.



Şekil 3. Makine öğrenmesi algoritmaları karmaşıklık matrisleri

4 Tartışma ve sonuçlar

Turbofan motorlarının kestirimci bakım yöntemleri ile RUL tahmini, uçuş güvenliği açısından arızaların önüne geçilmesi için önemli bir çalışma konusudur. Bu çalışmada, NASA tarafından sunulan CMAPSS veriseti üzerinde turbofan motorların RUL tahmini için 10 farklı makine öğrenmesi algoritmaları kullanılmış ve bu algoritmaların performans değerlendirmesi sunulmuştur.

Çalışma kapsamında sınıflandırma çalışmalarında aygın olarak kullanılan LR, KNN, SVM, DT, RF, AdaBoost, XGBoost, NB, SGD ve LDA algoritmaları ile eğitimler yapılmıştır. Yapılan eğitimler sonucunda doğruluk oranı ve çapraz doğrulama sonuçlarına göre sırasıyla LDA, XGBoost ve SVM algoritmaları en iyi performansı göstermiştir. Modelin test verileri üzerindeki performansını ölçmek için çeşitli deneyler yapılmıştır. LDA, SVM ve SGD algoritmaları en yüksek doğruluk oranını, NB, AdaBoost ve XGBoost algoritmaları en yüksek duyarlılık oranını, NB, AdaBoost ve XGBoost algoritmaları en yüksek F1-Skor değerlerini elde eden algoritmalardır. AUC-ROC eğrileri incelendiği zaman en iyi sınıflandırma performansı gösteren ilk üç algoritma sırasıyla SVM, LR ve Naive Bayes algoritmaları olduğu görülmektedir. Karmaşıklık matrisleri

incelendiği zaman en iyi performans gösteren ilk üç algoritmanın ise sırasıyla LDA, LR ve SVM algoritmaları olduğu görülmektedir.

Makine öğrenmesi algoritmalarının turbofan motorlarının RUL tahmini için CMAPSS veri seti üzerindeki performansları karşılaştırıldığı zaman, genel olarak tüm modellerin birbirlerine çok yakın oranlarda performans gösterdiği görülmektedir. En başarılı ve kararlı iki algoritmaların LDA ve SVM algoritmaları olduğu söylenebilir.

Bu çalışma kapsamında sadece makine öğrenmesi algoritmaları kullanılmıştır. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiği zaman turbofan motorlarının RUL tahmini için özellikle LSTM algoritmalarının yoğun olarak kullanıldığı görülmektedir. Çalışmayı genişletmek için LSTM, derin öğrenme, transfer öğrenme vb. algoritmalar ile deneyler gerçekleştirilip, sonuçları karşılaştırılabilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %4

Kaynaklar

[1] D. Rengasamy, H.P. Morvan and G.P. Figueredo, Deep learning approaches to aircraft maintenance, repair and overhaul: A review. 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems, pp. 150-156, IEEE, 2018.

[2] K.T. 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.ress.2019.03.018

[3] I. Mallidis, V. Yakavenka, A. Konstantinidis and N. Sariannidis, A goal programming-based methodology for machine learning model selection decisions: a predictive maintenance application. Mathematics, 9(19), 2405, 2021. https://doi.org/10.3390/math9192405

[4] A.P. Hermawan, D.S. Kim and J.M. Lee, Predictive maintenance of aircraft engine using deep learning technique. International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), pp. 1296-1298, IEEE, 2020. http://dx.doi.org/10.1109/ICTC49870.2020.9289466

[5] S. Savaş, K. Duraklar, O.A. Çınar, M. Koç, A. Turan, U. Uslu, A.S. Doğanay, O.G. Özceyhan, M.Y. Destan and H. Duşbudak, Güneş enerjisi sistemlerinde yenilikçi ve akıllı bakım onarım. Journal of Information Systems and Management Research, 4(2), 35-49, 2022.

[6] M.A. Kızrak and B. Bolat, Uçak motoru sağlığı için uzun-kısa süreli bellek yöntemi ile öngörücü bakım. Bilişim Teknolojileri Dergisi, 12(2), 103-109, 2019. https://doi.org/10.17671/gazibtd.495730

[7] A.N. Abbas, G. Chasparis and J.D. Kelleher, Interpretable hidden markov model-based deep reinforcement learning hierarchical framework for predictive maintenance of turbofan engines. arXiv preprint arXiv:2206.13433, 2022. https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.13433

[8] M.D. Dangut, Z. Skaf and I.K. Jennions, Handling imbalanced data for aircraft predictive maintenance using the BACHE algorithm. Applied Soft Computing, 123, 108924, 2022. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108924

[9] L. Xu, S.F.,Yuan, J. Chen and Q. Bao, Deep learning based fatigue crack diagnosis of aircraft structures. In Proceedings of the 7th Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring, 2018.

[10] S. Vollert and A. Theissler, Challenges of machine learning-based RUL prognosis: A review on NASA's C-MAPSS data set. In 2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, pp. 1-8, IEEE, 2021, September. http://dx.doi.org/10.1109/ETFA45728.2021.9613682

[11] D. Bruneo and F. De Vita, On the use of LSTM networks for predictive maintenance in smart industries. In 2019 ieee international conference on smart computing (smartcomp), pp. 241-248, IEEE, 2019. https://doi.org/10.1109/SMARTCOMP.2019.00059

[12] H.V. Düdükçü, M. Taşkıran and N. Kahraman, LSTM and WaveNet implementation for predictive maintenance of turbofan engines. In 2020 IEEE 20th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics, pp. 000151-000156, IEEE, 2020.

[13] V. Mathew, T. Toby, V. Singh, B.M. Rao and M.G. Kumar, Prediction of remaining useful lifetime (RUL) of turbofan engine using machine learning. In 2017 IEEE international conference on circuits and systems (ICCS), pp. 306-311, IEEE, 2017.

[14] K. Khan, M. Sohaib, A. Rashid, S. Ali, H. Akbar, A. Basit and T. Ahmad, Recent trends and challenges in predictive maintenance of aircraft's engine and hydraulic system. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 43, 1-17, 2021. http://dx.doi.org/10.1007/s40430-021-03121-2

[15] K.Ç. Girgin and C. Zalluhoğlu, Öznitelik odaklı sensor verisi bazlı uçak motorları geriye kalan faydalı ömür tahminleme. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 37, 21-27, 2022. https://doi.org/10.31590/ejosat.1125433

[16] S. Pillai and P. Vadakkepat, Two stage deep learning for prognostics using multi-loss encoder and convolutional composite features. Expert Systems with Applications, 171, 114569, 2021. http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114569

[17] A. Siddique, R.K. Kundu, G.R. Mode and K.A. Hoque, RobustPdM: designing robust predictive maintenance against adversarial attacks. arXiv preprint arXiv: 2301.10822, 2023. https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.10822

[18] D.K. Frederick, J.A. Decastro and J.S. Litt. Users guide for the commercial modular aero-propulsion system simulation (c-mapss). Tech. Rep. NASA/TM2007-215026, 2007.

[19] A. Saxena, K. Goebel, D. Simon and N. Eklund, Damage propagation modeling for aircraft engine run-to-failure simulation. In 2008 international conference on prognostics and health management, pp. 1-9, IEEE, 2008. http://dx.doi.org/10.1109/PHM.2008.4711414

[20] H.A. Gohel, H. Upadhyay, L. Lagos, K. Cooper and A. Sanzetenea, Predictive maintenance architecture development for nuclear infrastructure using machine learning. Nuclear Engineering and Technology, 52(7), 1436-1442, 2020. https://doi.org/10.1016/j.net.2019.12.029

[21] Ö.Ç. Yavuz, E. Karaman and C. Yeşilyaprak, Makine öğrenmesi algoritmalarıyla astronomik gözlem kalitesi tahminine yönelik karar destek sistemi geliştirilmesi ve uygulanması. Trends in Business and Economics, 36(3), 289-303, 2022. http://doi.org/10.5152/TBE.2022.1049957

[22] A.B. Andre, E. Beltrame and J. Wainer, A combination of support vector machine and k-nearest neighbors for machine fault detection. Applied Artificial Intelligence, 27(1), 36-49, 2013. http://dx.doi.org/10.1080/08839514.2013.747370

[23] F. Arena, M. Collotta, L. Luca, M. Ruggieri and F.G. Termine, Predictive maintenance in the automotive sector: A literature review. Mathematical and Computational Applications, 27(1), 2, 2022. https://doi.org/10.3390/mca27010002

[24] S.R. Safavian and D. Landgrebe, A survey of decision tree classifier methodology. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, 21(3), 660-674, 1991.

[25] Z.M. Çınar, A. Abdussalam Nuhu, Q. Zeeshan, O. Korhan, M. Asmael and B. Safaei, Machine learning in predictive maintenance towards sustainable smart manufacturing in industry 4.0. Sustainability, 12(19), 8211, 2020.

[26] Y. Freund and R.E. Schapire, A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting. Journal of computer and system sciences, 55(1), 119-139, 1997. https://doi.org/10.1006/jcss.1997.1504

[27] T. Chen and C. Guestrin, Xgboost: A scalable tree boosting system. In Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery and data mining, pp. 785-794, 2016.

[28] G.I. Webb, E. Keogh and R. Miikkulainen, Naïve Bayes. Encyclopedia of machine learning, 15, 713-714, 2010.

[29] S. Savaş, Naive Bayes Sınıflandırıcısı. Teori ve Uygulamada Makine Öğrenmesi, (69-92), Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, 2022.

[30] L. Bottou, Large-scale machine learning with stochastic gradient descent. In Proceedings of COMPSTAT'2010: 19th International Conference on Computational Statistics Paris France, August 22-27, 2010 Keynote, Invited and Contributed Papers, pp. 177-186, Physica-Verlag HD, 2010. https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2604-3_16

[31] P. Xanthopoulos, P.M. Pardalos and T.B. Trafalis, Linear discriminant analysis. Robust data mining, 27-33, 2013. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-9878-1

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 107-115

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Aksaray ilinde küçükbaş ve kanatlı hayvan gübresi temelinde biyogaz potansiyelinin belirlenmesi

Determination of biogas potential based on ovine and poultry manure in Aksaray province

Hatice Et Yapılcan[1,*], Hülya Bakırtaş[2]

[1] *Ufuk Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, 06836, Ankara, Türkiye*
[2] *Aksaray Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri, 68100, Aksaray, Türkiye*

Öz

Günümüzde, hem çevreye verdikleri zararlar hem de kaynakların sınırlı olması nedeniyle fosil yakıtların alternatifi olabilecek yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılmasına yönelik çabalar gittikçe artmaktadır. Ülkemizde bulunan enerji kaynaklarının daha etkin kullanılması, Türkiye'nin fosil enerji kaynaklarına olan bağımlılığını azaltarak ve gelecek nesiller için sürdürülebilir ve çevre dostu enerjinin elde edilmesini sağlayacaktır. Sürdürülebilir ve çevre dostu enerji türlerinden biri biyogazdır. Biyogazın üretilmesinde kullanılacak organik atıklar arasında tarımsal ve hayvansal atıklar önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmada Aksaray ilinde yer alan küçükbaş hayvan gübresi ve kanatlı hayvan gübresi ile biyogaz üretim potansiyeli araştırılmıştır. Araştırma bulgularına göre; Aksaray ilinde küçükbaş ve kanatlı hayvan gübrelerinden elde edilecek biyogaz potansiyeli toplamda 39 670 717 m^3/yıl'dır. Bu miktar 186 452 372 kWh elektrik enerjisine eşdeğerdir. Elde edilebilecek elektrik enerjisi ile Aksaray ili nüfusunun %12'sinin enerji ihtiyacı karşılanabileceği belirlenmiştir. Araştırma bulgularının hem araştırmacıların hem de politika yapıcıların farkındalığını arttırması ve onlara rehberlik etmesi beklenmektedir.

Anahtar kelimeler: Biyogaz, Yenilenebilir enerji, Yeşil ekonomi

Abstract

Today, efforts to expand renewable energy sources, which can be an alternative to fossil fuels, are increasing due to both the damage they cause to the environment and the limited resources. More efficient use of energy resources in our country will reduce Turkey's dependence on fossil energy resources and provide sustainable and environmentally friendly energy for future generations. One of the sustainable and environmentally friendly energy types is biogas. Agricultural and animal wastes have an important place among the organic wastes to be used in the production of biogas. In this study, the biogas production potential with ovine manure and poultry manure in Aksaray province was investigated. According to the research findings, the biogas potential to be obtained from ovine and poultry manure in Aksaray province is 39 670 717 m^3/year in total. This amount is equivalent to 186 452 372 kWh electrical energy. It has been determined that the energy needs of 12% of the population of Aksaray can be met with the electrical energy that can be obtained. The research findings are expected to raise awareness and guide both researchers and policy makers.

Keywords: Biogas, Renewable energy, Green economy

1 Giriş

Dünya nüfusunun giderek artması, üretim kapasitesi artışına ek olarak tarım, hayvancılık ve enerji ihtiyaçlarını da artırmıştır [1]. Küreselleşme ve hızla değişen teknoloji, tükenen kaynakları olumsuz yönde etkilemektedir. Gelecek nesiller için sürdürülebilir enerji üretimi sağlamak amacıyla ülkeler temiz enerji arayışını benimseyerek yenilenebilir enerji üretimi çalışmalarını hızlandırmıştır. Her ne kadar bazı enerji üretim yöntemleri diğerlerine göre daha avantajlı olsa da, genel olarak her birinin olumlu ve olumsuz yönleri vardır. Bazı enerji üretim yöntemleri çevresel açıdan elverişli ancak ekonomik olarak pahalı, bazıları ise ekonomik olarak uygun ancak çevresel bağlamda kısıtlayıcıdır. Günümüzde daha az toplam maliyeti olan seçenekler genel olarak daha fazla tercih edilmektedir. Hangi enerji türünün çevreye kalıcı zarar vermeden gerekli enerji talebini en iyi şekilde karşılayabileceği henüz net değildir ancak mevcut eğilimler, yenilenebilir enerji ve karma kaynaklardan üretim payını artırmanın, çevresel ve ekonomik riskleri dengeleyeceği düşünülmektedir [2]. Gelecekteki iklim krizine göre; sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada yenilenebilir enerji kaynaklarının önemli bir rol oynayacağı öngörülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları; kullandıkça yenilenebilen enerji kaynaklarıdır. Örneğin; güneş, rüzgâr, jeotermal ve biyokütle kaynaklı enerji üretim teknolojileridir [3]. Yenilenebilir enerji kaynakları atmosferdeki karbondioksit miktarını azaltma politikasında önemli bir yere sahiptir. Özellikle atıkların geri dönüşüme kazandırılması, atmosfere salınan metan gazı miktarını düşürmektedir [4].

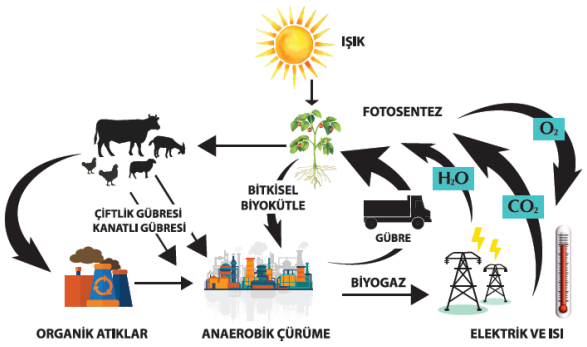
* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: haticeett@gmail.com (H. Et Yapılcan)
Geliş / Recieved: 19.04.2023 Kabul / Accepted: 31.10.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1285746

Yeşil enerji üretiminin ülkeler için küresel bir girişime dönüştüğü son yıllarda ekonomilerin Covid-19 karantinalarının altında ezilirken, yenilenebilir enerji pazarında hızlı bir büyüme gözlenmesi ile birlikte yeni yenilenebilir enerji ekonomisi daha verimli, birbirine bağlı ve doğa tabanında gerçekleştirilmiştir. 2021 yılında dünyadaki yenilenebilir enerji oranının %30'a yükseldiği gözlenmiştir. Yeşil enerji dönüşümü kapsamında en büyük orandaki artış; güneş enerjisi, hidro elektrik santralleri ve organik atıklardan elde edilen enerji çeşitlerinde elde edilmiştir [5]. Bu bağlamda oldukça zorlu ancak ulaşılabilir bir yol haritası çizilmiştir ve 2050'ye Kadar Net Sıfır Emisyonlar Senaryosu (NZE1) ile artan küresel sıcaklıklarda 1.5 °C'lik bir stabilizasyona ulaşılması hedeflenmiştir [6].

Ülkemizdeki yenilenebilir enerjinin ülkemizdeki payı, diğer ülkelere göre oldukça düşüktür. Ülkemizde, Yenilenebilir enerjinin birincil kullanımdaki oranı %6.5'tir. Elektrikteki üretim payı ise %24'tür. Ülkemizde 2023 yılına kadar elektrik üretiminde yenilenebilir enerjinin payının %30'a çıkarılması sağlanması hedeflenmektedir [7]. Yenilenebilir enerji açısından Türkiye güçlü bir potansiyele sahiptir. Ancak bu potansiyele rağmen, yeterli yatırımın ve uygulamanın sağlanamadığı bir gerçektir [8]. Türkiye, tarım ve hayvan yetiştiriciliği uygulamalarının hem ekonomik hem sosyal bağlamda ağırlıkta olduğu gelişmekte olan bir ülke olması sebebiyle biyogaz enerjisi, geleceğin en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir [9-10]. Biyogaz tesisleri aslında bir döngüdür. Diğer bir ifadeyle insanlar çevreye çok ağır tahribatlar vermiş ve vermeye devam ederken biyogaz tesisleri, verilen ağır tahribatı önemli ölçüde azaltabileceği varsayılmaktadır. Biyogaz, sadece çevresel zararın azaltılmasına değil, aynı zamanda organik maddelerin oksijensiz ortamda fermante edilmesi ile yaşam sürdüğü müddetçe sınırsız enerji üretebilmektedir [11]. Bu nedenle biyogaz ile enerji üretimi sürdürülebilir yaşam için oldukça büyük önem taşımaktadır ve günümüzde çok daha cazip hale gelmektedir. Bu çalışmada, biyogaz kavramı incelenerek, Aksaray İl'inin küçükbaş hayvan atıkları temelinde elde edilebilecek biyogaz potansiyeli belirlenmek amaçlanmıştır.

2 Literatür

Biyogaz terimi temel olarak organik atıklardan kullanılabilir gaz üretimini ifade etmektedir. Daha ayrıntılı açıklamak gerekirse, anaerobik (oksijensiz) ortamda mikrobiyal floranın etkisiyle organik maddelerin, karbondioksit ve metan gazına dönüştürülmesidir. Biyogazın elde edilmesi temel olarak organik maddelerin ayrışmasına dayanır [12]. Biyogaz, genel olarak yapısı yönüyle doğalgaza benzemektedir. Bu bağlamda doğal gazın kullanıldığı birçok alanda esnek bir şekilde kullanılabilmektedir. Ancak günümüzde öncelikli olarak, enerji üretiminde kullanıldığı görülmektedir [13]. Ayrıca diğer yakıtlara alternatif olarak kullanılması veya ısıtma olarak biyogazdan yararlanılması, kırsal alanlarda kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır [11]. Biyogaz üretim süreci Şekil 1'de gösterilmektedir [14].



Şekil 1. Biyogaz üretim tesisi

Biyogaz üretimi için kullanılabilecek farklı hammaddeler bulunmaktadır. Bunlar; gıda atıkları, bitkisel atıklar, hayvansal atıklar, evsel atıklar ve kanalizasyon atıklarıdır. Bu organik atıklar arasında en temel kullanılan hammadde çeşidi, hayvansal atıklardır. Ülkemizde tarım ve hayvancılık ürünlerinden elde edilebilecek biyogaz potansiyeli oldukça yüksektir [15]. Bu durum doğru bir şekilde yönetildiğinde ülke ekonomisine katkısı daha fazla olacaktır. Fakat aynı durum gıda atıkları için geçerli değildir. Evsel atıkların neredeyse %50'si organik atıklardan oluşmaktadır. Fakat bu atıkların hiçbiri, kaynağında ayrıştırılmaması nedeniyle biyogaz tesislerinde kullanılamamaktadır [1]. Organik atıkların yeşil ekonomi kapsamında değerlendirilerek sıfır atık yaklaşımının[1] benimsenmesi bu duruma katkı sağlayacaktır. Biyogaz üretimi atıkların değerlendirilmesine katkı sağlaması nedeniyle yeşil ekonomi ve sıfır atık politikasını desteklemektedir. Sıfır atık yönetimi ile kaynakları daha verimli kullanmak, atık oluşumunu azaltmak ve israfı önlemek hedeflenmektedir. Atık oluşumu durumunda ise, kaynağında atığın karakterize edilip ayrılması ile geri kazanımı sağlanmaktadır [16]. Yeşil ekonomi, Birleşmiş Milletler Çevre Programı (United Nations Environment Programme/UNEP)'te hem insan refahında artışa neden olan hem de çevresel tehditleri ve problemleri önlemeye çalışan büyüme stratejisi olarak tanımlanmıştır [17]. Biyogazda kullanılabilir bir diğer atık türü ise, kanalizasyon atıklarıdır. Ancak çoğu zaman kanalizasyon atıkları biyogaz üretiminde pek tercih edilmez. Bunun nedeni geleneksel tuvalet sistemlerinde yüksek miktarda deterjan kullanılmasıdır. Kullanılan temizlik malzemeleri biyogaz üretiminde yardımcı olan yararlı bakterilerin yok edilmesine sebep olmaktadır. Bu nedenle, bu sistemlerde biyogaz üretim verimi düşük olmakta ve daha yüksek hacimli reaktörlere gereksinim duyulmaktadır [18].

Biyogaz üretim verimliliğini etkileyen pek çok etken bulunmaktadır; sıcaklığın, basıncın ve pH'ın optimal seviyede olması, atığın kompozisyonu, C/N oranı, organik

[1]Türkiye'de 12 Temmuz 2019 tarihinde Resmi Gazete'de yayınlanan Sıfır Atık Yönetmeliği'nde "*Sıfır Atık Yaklaşımı, üretim, tüketim ve hizmet aşamalarının tamamında atığın ortaya çıkmasının önüne geçilmesi veya azaltılması, yeniden kullanıma odaklanılması, ortaya çıkan atıkların kaynağında biriktirilmesi, geri dönüşümü ya da yeniden kazanımı sağlayarak bertarafa gidecek atıkların en aza indirilmesi ile çevrenin, toplumun ve tükenen kaynakların korunmasını hedef edinen yaklaşım*" şeklinde tanımlanmıştır [16].

bekletme süresi, organik yükleme hızı, karıştırma hızı, kullanılan inhibitör maddeler, aşılama vb. pek çok değişken biyogaz verimliliğini direkt ve dolaylı yoldan etkilemektedir [15]. Biyogaz üretiminin gerçekleştirilmesi, yalnızca çevre sorunlarına çözüm olmakla kalmaz aynı zamanda insanların yaşam standartlarının önemli ölçüde iyileşmesine katkıda bulunur. Biyogaz üretiminde kullanılan hayvan gübresinin biyogaza dönüştürülmesi sürecinde fermente olmaları sonucu daha faydalı hale gelmekte ve tarımda kullanılmaktadır. Özellikle son zamanlarda gübre fiyatlarındaki artış, geçim kaynağı tarım olan insanları ekonomik açıdan zorlamaktadır. Biyogazın bir ürünü olan gübre, tarım alanında toprak verimliliğini olumlu yönde etkilemektedir [19]. Örneğin; tavuk gübresinden çok verimli biyogaz üretimi sağlanabilmektedir. Tavuk gübresi kullanımı tarım arazileri için de önemlidir ancak direkt olarak uygulandığında toprakta tuzluluğa neden olmaktadır. Fakat biyogaz üretiminde fermente olmuş tavuk gübresi çok daha verimli hale gelerek sürdürülebilir hayata katkı sağlamaktadır [12].

Biyogazın bilinen pek çok faydasından bahsetmek mümkündür. Örneğin 1MW'lık bir üretim santralinde en az 15-20 kişi çalıştığı göz önünde bulundurulursa, kırsal kesimde istihdamı artırmada biyogazın katkısı oldukça fazladır [11]. Bu bağlamda enerji sektöründe dışa bağımlılığı azaltmak, kırsal kalkınmayı desteklemek, hayvansal atıkların değerlendirilmesi ve daha birçok problemin çözümünü sağlamak için il temelinde mevcut potansiyelin belirlenmesi, belirlenen potansiyeller ışığında yatırım planlamaları oluşturularak biyogaz tesislerin kurulumu gerçekleştirilmelidir [20]. Biyogaz üzerine yapılmış birçok araştırma vardır. Kanatlı hayvan ve küçükbaş hayvan atıklarından biyogaz üretimi üzerine yapılan çalışmalar Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Biyogaz üzerine yapılan çalışmalar

Yazarlar / Yıl	Araştırma Amacı	Veri Toplama Tekniği	Örneklem	Analiz Teknikleri	Bulgu
Gül (2006) [21].	Tavuk gübresinden biyogaz üretim potansiyelinin araştırılması amaçlanmıştır.	Bu çalışmada veri toplama tekniği gözlem ve ikincil verilerdir.	Afyon ili Başmakçı ilçesinde bulunan tavukçuluk kooperatifi.	Reaktördeki gaz çıkışları 90 gün gözlenmiş ve sonuçlar betimleyici istatistikler üzerinden değerlendirme yapılmıştır.	Farklı katı madde oranlarının biyogaz üretimine etkisi üzerinde durulmuş olup katı madde oranın artışı ile birlikte biyogaz üretim miktarının da arttığı fakat birim katı madde başına düşen üretimin azaldığı belirtilmiştir
Şenol vd. (2017) [22].	Ankara'nın organik atık kaynaklarının, biyogaz üretimi için ortaya çıkarılmasıdır.	TÜİK verileri (ikincil veriler) kullanılmıştır.	Ankara ilinin organik atıkları	Biyogaz enerji eşdeğer hesaplama diyagramı kullanılmıştır.	Ankara'nın hayvansal atıkları temel alındığında; günlük 277 384 m^3 biyogaz potansiyeli bulunmaktadır. Atık su arıtma çamuru ile günlük 515 220 m^3 biyogaz potansiyeli bulunurken, tarımsal atıklar için ise, 38 493 m^3 biyogaz potansiyeli vardır. Mutfak atıkları açısından ise, 160 380 m^3 biyogaz üretim potansiyeline sahip olduğu belirlenmiştir. Bu değer, 1 397 930 TL'ye karşılık gelmektedir. Şehrin günlük enerjisi ihtiyacı 211 496 MWh'tir. Günlük elektrik miktarı ise 4 657 MWh'dir. Bu değer, şehrin günlük enerji tüketiminin %2.20'sine karşılık gelmektedir.
Aksu (2019) [20].	Amasya ilindeki hayvansal atıkların biyogaz potansiyelinin belirlenmesi amaçlanmıştır.	TÜİK verileri (ikincil veriler) kullanılmıştır.	Amasya ili ve ilçelerindeki toplam hayvansal atık miktarı	Biyogaz enerji eşdeğer hesaplama diyagramı kullanılmıştır.	Amasya'nın 2018 yılı verilerine göre hayvansal atık potansiyeli, 90 474 MWh/yıl toplam elektrik enerjisine karşılık gelmektedir.
Ergişi (2019) [23].	Çok kriterli karar verme yöntemleri ile Türkiye'deki hayvansal kaynaklı biyogaz potansiyelini hesaplamayı ve tesis yerini belirlemeyi amaçlamaktadır.	TÜİK'ten ikincil veriler alınmıştır.	Türkiye genelindeki 81 ile göre büyükbaş, küçükbaş ve tavuk gübreleri.	TOPSIS, AHS, PROMETHEE ve VIKOR yöntemleri kullanılmıştır.	Diyarbakır, Şanlıurfa, Erzurum, Kars, Ağrı ve Van illerinin hayvan gübresinden elde edilen biyogazın büyük enerji potansiyeline sahip olduğu belirlenmiştir.
Öztürk (2019) [24].	Aydın ili biyogaz potansiyelinin belirlenmesi amaçlanmıştır.	TÜİK verileri (ikincil veriler) kullanılmıştır.	Aydın ilinde bulunan bitkisel ve hayvansal atıklar	Biyogaz enerji eşdeğer hesaplama diyagramı kullanılmıştır.	Aydın'daki bitkisel ve hayvansal atıkların kullanımı ile biyogaz üretimi hesaplamalara göre yıllık olarak hayvansal ve bitkisel atıklardan 13.74 PJ (Petajoule)'lük enerji potansiyelinin olduğu gözlenmektedir.
Sorgulu (2020) [25].	Çalışmanın amacı metan gazı ve hidrojen gazının organik atıklardan elde edilmesi ve enerji yoğunluklarının teorik olarak hesaplanması, daha temiz bir enerji taşıyıcısı olan hidrojenin metan gazı ile karıştırıldığında enerji verimini nasıl etkilediğinin belirlenmesidir.	İkincil veriler kullanılmıştır.	Enerji üretiminde kullanılan organik atıkların kimyasal içerikleri örneklemi oluşturmaktadır.	Matematiksel hesaplama (denklem çözümleri)	Metan gazının saf halde kullanılması yerine, başta atıklar olmak üzere yenilenebilir kaynaklardan elde edilen hidrojen ile karıştırılıp hitan gazı olarak kullanıldığında enerjinin daha yüksek olduğu hesaplamalar ile ortaya konmuştur.

Tablo 1 (Devam). Biyogaz üzerine yapılan çalışmalar

Kaynarca vd. (2021) [26].	Eskişehir'deki organik atık kaynaklarının, biyogaz potansiyeli araştırılmıştır.	İkincil veriler kullanılmıştır	Eskişehir iline ait hayvansal atıklar	Biyogaz enerji eşdeğeri hesaplama diyagramı	Toplamda 553 794 524.82 m^3/yıl'dır
Yürük ve Erdoğmuş (2015) [27].	Düzce ilindeki hayvansal atıklardan biyogaz potansiyelini hesaplamak ve k-means algoritması ile bu tesisleri kümelere ayırmaktır	TÜİK verileri (ikincil veriler) kullanılmıştır.	Düzce ilinde bulunan hayvansal atıklar	K-means kümeleme algoritması ve biyogaz enerji eşdeğeri hesaplama diyagramı kullanılmıştır.	K-means kümeleme algoritması ile elde edilen sonuçlar ışığında dört farklı sınıflama yaklaşık olarak aynı konumu göstermesi sonucunda, Düzce'de biyogaz santrali kurulumu için bir bölge belirlenmiştir. Kanatlı hayvanlardan elde edilebilecek biyogaz potansiyeli 16 122 222 m^3/yıl'dır. Bu miktar toplam potansiyelin %66'sını oluşturmaktadır. Küçükbaş hayvanlardan elde edilebilir miktar ise %2'lik oranla 472 543 m^3/yıl'dır.
Yağlı ve Koç (2019) [28].	Adana ilindeki hayvansal atıkların biyogaz potansiyelinin belirlenmesi amaçlanmıştır.	TÜİK verileri (ikincil veriler) kullanılmıştır	Adana ilinde bulunan bitkisel ve hayvansal atıklar	Biyogaz enerji eşdeğer hesaplama diyagramı kullanılmıştır.	Toplamda yıllık ortalama biyogaz üretimi 88 367 417 metreküp olarak bulunmuştur. Bu miktarın 4 611.26 metreküpü küçükbaş hayvanlardan, 4 786.38 metreküpü kanatlı hayvanlardan üretilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, Aksaray ilinde yetiştirilen küçükbaş ve kanatlı hayvan atıklarından sağlanabilecek biyogaz potansiyelini araştırmak ve elde edilebilecek olan potansiyelin diğer enerji türleri açısından eşdeğerini belirlemektir. İlgili literatür incelendiğinde, Aksaray ilinin biyogaz potansiyelinin araştırılmamış olması, bölgede nüfusun %70'lik kısmının geçimini hayvancılıktan sağlıyor olması ve enerji fiyatlarındaki artış nedeniyle alternatif yenilebilir enerjiye yönelim bu çalışmanın yapılmasını etkileyen önemli unsurlardır.

3 Materyal ve metot

Bu çalışmada Aksaray'da küçükbaş ve kanatlı hayvan atıklarından üretilebilecek biyogaz potansiyelinin miktarı belirlenmek amaçlanmıştır. 2018 yılında TÜİK verilerine göre Aksaray ilinin sekiz ilçesi vardır. Bunlar; Eskil, Ağaçören, Sarıyahşi, Sultanhanı, Ortaköy, Gülağaç, Güzelyurt'tur [29]. Aksaray'a ait gerekli olan veriler, T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı ve Türkiye İstatistik Kurumundan (TÜİK) elde edilmiştir. Bu veriler doğrultusunda, Aksaray ili ve ilçelerinde küçükbaş ve kanatlı hayvan sayısı ilçelere göre farklılık göstermektedir. Kanatlı ve küçükbaş hayvan yetiştiriciliğinde en aktif ilçe Merkez ilçe olduğu belirlenmiştir [30].

Türkiye'de bulunan toplam küçükbaş hayvan sayısı 55 milyon 63 bin baştır [31]. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığından elde edilen veriler doğrultusunda Aksaray'daki küçükbaş hayvan sayısı 964 490 baş olduğuna göre, Türkiye'deki küçükbaş hayvanların %1.75'i Aksaray'da yetiştirilmektedir. Aksaray iline ait küçükbaş hayvan sayıları Tablo 2'de verilmiştir [30].

Tablo 2. İlçelere göre küçükbaş hayvan sayısı

İlçe Adı	Küçükbaş Hayvan Miktarı
Ağaçören	32 144
Eskil	185 745
Gülağaç	33 484
Güzelyurt	30 169
Merkez	525 974
Ortaköy	72 153
Sarıyahşi	10 637
Sultanhanı	74 184
Toplam	**964 490**

Aynı şekilde küçükbaş hayvan atıkları ile ilgili istatistikler;

- Küçükbaş hayvanlardan 0.7 ton/yıl gübre elde edilmektedir [32].
- 1 ton küçükbaş hayvan atığından 58 m^3 biyogaz elde edilmektedir [33].
- 1 m^3 biyogazdan 4.7 kWh elektrik enerjisi elde edilmektedir [34].
- 1 dakikada üretilen elektrik enerjisi için 17 L biyogaz gereklidir [35].

Yukarıdaki parametreler ile hesaplama yapıldığında, küçükbaş hayvan başına elde edilecek gübre miktarı Denklem (1);

Toplam küçükbaş sayısı x 1 küçükbaş hayvandan elde edilecek gübre ton/yıl (1)

Üretilecek biyogaz miktarı belirlenirken Denklem (2);

Küçükbaş hayvan başına elde edilen gübre (ton/yıl) x 1 ton küçükbaş hayvan atığından elde edilen biyogaz (2)

Biyogaz elektrik enerjisine dönüştürülürse Denklem (3);

Üretilen biyogaz miktarı x 1 m^3 biyogazdan elde edilen elektrik enerjisi (3)

T.C. Tarım ve Orman Bakanlığının verileri baz alındığında, 2020 yılında Türkiye'de bulunan toplam kanatlı hayvan 229 milyon 500 bin adet olarak belirtilmiştir [36]. Türkiye İstatistik Kurumu'ndan alınan veriler doğrultusunda Aksaray'daki kayıtlı kanatlı hayvan sayısı 298 615 adet olduğu belirtilmiştir. Kanatlı hayvan sayıları Tablo 3'te verilmiştir [31].

Tablo 3. İlçelere göre tavuk sayısı dağılımı.

İlçe Adı	Tavuk Miktarı
Ağaçören	n/a
Eskil	3 500
Gülağaç	18 125
Güzelyurt	6 930
Merkez	252 100
Ortaköy	15 960
Sarıyahşi	n/a
Sultanhanı	2 000
Toplam	**298 615**

Kanatlı hayvanların 280 000'i beş büyük işletmede bulunmaktadır. Geri kalan kısmının ise köylerde ve kasabalarda yetiştirildiği ve kayıtlı olmayan kanatlı hayvan sayısının büyük bir çoğunlukta olduğu bilinmektedir. Ayrıca kayıtlı olmayan kanatlı hayvan sayısının büyük bir çoğunlukta olduğu da bilinmektedir. Aksaray'daki kayıtlı kanatlı hayvan sayısı dikkate alınarak hesaplama yapıldığında, Türkiye'deki kanatlı hayvanların %0.13'ü Aksaray ilinde yetiştirilmektedir. Bu rakam diğer iller ile karşılaştırıldığında oldukça düşüktür.

Son olarak kanatlı hayvan yetiştiriciliğinin önemli kısmını tavuk yetiştiriciliği alması sebebi ile bu araştırmada yalnızca tavuklara ait istatistikler kullanılmıştır. İlgili istatistikler;

- Kanatlı hayvanlardan 0.022 ton/yıl gübre elde edilmektedir.
- 1 ton kanatlı hayvan atığından 78 m^3 biyogaz elde edilmektedir [37].
- 1 m^3 biyogazdan 4.7 kWh elektrik enerjisi elde edilmektedir [33].
- 1 dakikada üretilen elektrik enerjisi için 17 L biyogaz gereklidir [34].

Bu parametreler ile hesaplama yapıldığında, kanatlı hayvan başına elde edilecek gübre miktarı Denklem (4);

Toplam kanatlı hayvan sayısı x 1 kanatlı hayvandan elde edilecek gübre ton/yıl (4)

Üretilecek biyogaz miktarı belirlenirken Denklem (5);

Kanatlı hayvan başına elde edilen gübre (ton/yıl) x 1 ton kanatlı hayvan atığından elde edilen biyogaz (5)

Biyogaz elektrik enerjisine dönüştürülürse Denklem (6);

Üretilen biyogaz miktarı x 1 m^3 biyogazdan elde edilen elektrik enerjisi (6)

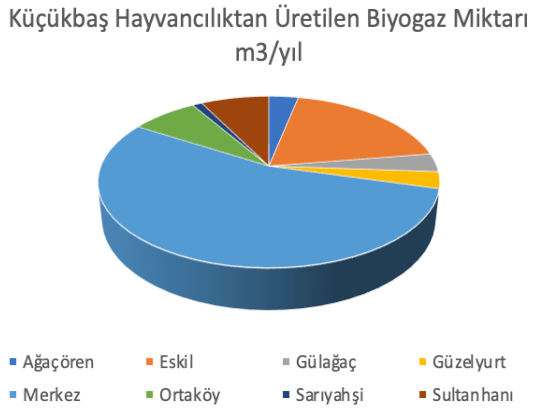
1 m^3 biyogaz, 5500-6000 kcal enerjiye sahiptir [38]. 1 m^3 Biyogaz; 4.70 kWh elektrik'e karşılık gelirken, 3.47 kg oduna karşılık gelmektedir. Ayrıca, 1.18 m^3 doğalgaza, 0.70 L benzine, 0.65 L motorine, 1.46 kg kömüre karşılık gelmektedir [39].

4 Bulgular

Aksaray ilindeki toplam küçükbaş hayvan sayısı 964 490'dır [30]. Küçükbaş hayvanlardan 0.7 ton/yıl gübre elde edildiği varsayımı yapılarak, Aksaray ili için yıllık toplam elde edilebilir gübre miktarı (964 490 x 0.7) = 675 143 ton/yıl olarak bulunmuştur. Yine, 1 ton küçükbaş hayvan gübresinden 58 m^3 biyogaz elde edildiği varsayımını kullanarak Aksaray İli'nde üretilebilecek olan biyogaz miktarının Denklem (7);

$$(675\ 143 \times 58) = 39\ 158\ 294\ m^3/yıl \quad (7)$$

olacağı hesaplanmıştır. Bu miktarın ilçelere göre dağılımı Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. İlçelere göre küçükbaş hayvan gübresinden üretilen biyogazın dağılımı.

Elde edilen biyogazın tamamı elektrik enerjisine dönüştürülecek olursa üretilecek elektrik enerjisi ise Denklem (8);

$$(39\ 158\ 294 \times 4.7) = 184\ 043\ 981.80 \cong 184\ 043\ 982\ kWh/yıl \quad (8)$$

olacaktır.

Kişi başı ortalama elektrik tüketimi 3 709 kWh/yıl'dır [40]. Toplam küçükbaş hayvan gübresi ile elde edilebilir elektrik enerjisi 184 043 982 kWh/yıl'dır. Dolayısıyla Aksaray'a ait küçükbaş hayvan atığı kaynaklı biyogaz potansiyeli ile (184 043 982 / 3 709) = 49 620.902) ≅ 49 621 kişinin elektrik tüketimi karşılanabilmektedir. Bu rakam nüfusun yaklaşık %12'sine karşılık gelmektedir.

Elde edilen enerji değerlerinin yenilenemez enerji türleri ile eşdeğer hesaplaması araştırılmıştır. Küçükbaş hayvan gübresi kullanılarak üretilecek biyogaz enerji değerinin diğer yakıtlara göre ısıl değerleri Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Küçükbaş hayvancılıktan elde edilecek biyogaz ısıl değerleri

İlçe Adı	Üretilen Biyogaz (m^3)	Elektrik Enerjisi Üretimi (kWh)	Gazyağı Üretimi (L)	Motorin Üretimi (L)	Benzin Üretimi (L)	Doğalgaz Üretimi (m^3)	Odun Üretimi (kg)	Kömür Üretimi (kg)
Ağaçören	1 305 046.40	6 133 718.08	809 128.77	861 330.62	978 784.80	1 539 954.75	4 528 511.01	1 905 367.74
Eskil	7 541 247	35 443 860.90	4 675 573.14	4 977 223.02	5 655 935.25	8 898 671.46	26 168 127.09	11 010 220.62
Gülağaç	1 359 450.40	6 389 416.88	842 859.25	897 237.26	1 019 587.80	1 604 151.47	4 717 292.89	1 984 797.58
Güzelyurt	1 224 861.40	5 756 848.58	759 414.07	808 408.52	918 646.05	1 445 336.45	4 250 269.06	1 788 297.64
Merkez	21 354 544	100 366 358.68	13 239 817.53	14 093 999.30	16 015 908.30	25 198 362.39	74 100 269.07	31 177 634.82
Ortaköy	2 929 411.80	13 768 235.46	1 816 235.32	1 933 411.79	2 197 058.85	3 456 705.92	10 165 058.95	4 276 941.29
Sarıyahşi	431 862.20	2 029 752.34	267 754.56	285 029.05	323 896.65	509 597.40	1 498 561.83	630 518.81
Sultanhanı	3 011 870.40	14 155 790.88	1 867 359.65	1 987 834.46	2 258 902.80	3 554 007.07	10 451 190.29	4 397 330.78
Toplam	**39 158 294**	**184 043 981.80**	**24 278 142.29**	**25 844 474.02**	**29 368 720.50**	**46 206 786.91**	**135 879 280.28**	**57 171 109.28**

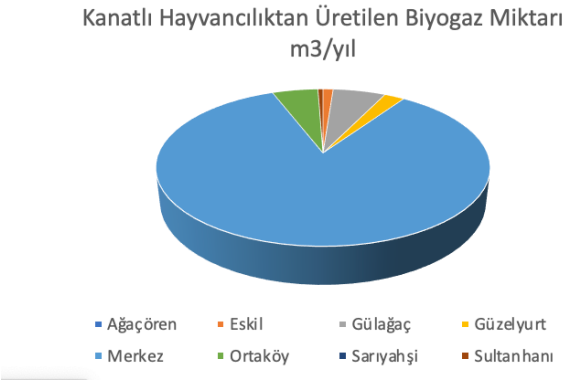
Aksaray ilindeki toplam kanatlı hayvan sayısı 298 615'tir [31]. Kanatlı hayvanlardan 0.022 ton/yıl gübre elde edildiği varsayımı yapılarak, Aksaray ili için yıllık toplam elde edilebilir gübre miktarı Denklem (9);

$$(298\ 615 \times 0.022) = 6\ 569.53 \cong 6\ 570 \text{ ton/yıl} \quad (9)$$

olarak bulunmuştur. Yine, 1 ton kanatlı hayvan gübresinden 78 m^3 biyogaz elde edildiği varsayımını kullanarak Aksaray İli'nde üretilebilecek olan biyogaz miktarının Denklem (10);

$$(6569 \times 78) = 512\ 423\ m^3/yıl \quad (10)$$

olacağı hesaplanmıştır. Bu miktarın ilçelere göre dağılımı Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. İlçelere göre küçükbaş hayvan gübresinden üretilen biyogazın dağılımı

Elde edilen biyogazın tamamı elektrik enerjisine dönüştürülecek olursa üretilecek elektrik enerjisi ise Denklem (11);

$$(512\ 423 \times 4.70) = 2\ 408\ 389.70 \cong 2\ 408\ 390 \text{ kWh/yıl} \quad (11)$$

olacaktır.

Kişi başı ortalama elektrik tüketimi 3 709 kWh/yıl'dır [40]. Toplam tavuk gübresi ile elde edilebilir elektrik enerjisi 2 408 390 kWh/yıl'dır. Aksaray'a ait tavuk gübresi kaynaklı biyogaz potansiyeli Denklem (12);

$$(2\ 408\ 390 / 3\ 709) = 649.33) \cong 649 \quad (12)$$

kişinin elektrik tüketimi karşılanabilmektedir. Bu rakam nüfusun %0.15'ine karşılık gelmektedir. Bu veriler ışığında yapılan hesaplamalar sonucunda kanatlı hayvan gübresi için ulaşılabilecek biyogazın ısıl değer hesaplanması Tablo 5'te gösterilmiştir.

Aksaray ilinde kanatlı hayvan ve küçükbaş hayvancılıktan elde edilecek **toplam potansiyel biyogaz miktarı** Denklem (13);

512 423.34 (kanatlı hayvan biyogaz miktarı) + 39 158 294 (küçükbaş hayvan biyogaz miktarı) ≅ 39 670 717 m^3'tür (13)

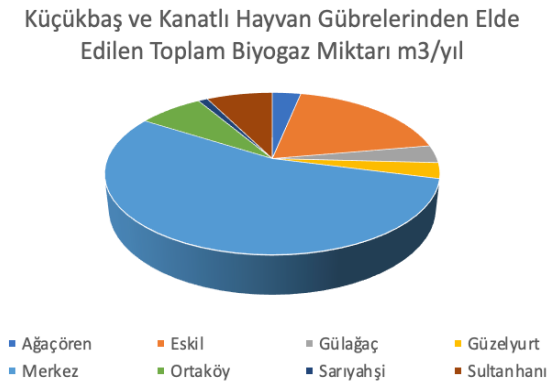
Aksaray ilinde kanatlı hayvan sayısı ve küçükbaş hayvancılıktan elde edilecek potansiyel biyogaz miktarının tamamının elektrik enerjisine dönüştürülecek olursa üretilecek toplam elektrik enerjisi ise Denklem (14);

2 408 389.70 (kanatlı hayvan elektrik enerji miktarı) + 184 043 981.80 (küçükbaş hayvan elektrik enerji miktarı) ≅ 186 452 372 kWh'tir. (14)

Tablo 5. Kanatlı hayvancılıktan elde edilecek biyogaz ısıl değerleri

İlçe Adı	Üretilen Biyogaz (m^3)	Elektrik Enerjisi (kWh)	Gazyağı (L)	Motorin (L)	Benzin (L)	Doğalgaz (m^3)	Odun (kg)	Kömür (kg)
Ağaçören	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Eskil	6 006	28 228.20	3 723.72	3 963.96	4 504.50	7 087.08	20 840.82	8 768.76
Gülağaç	31 102.50	146 181.75	19 283.55	20 527.65	23 326.88	36 700.95	107 925.68	45 409.65
Güzelyurt	11 891.88	55 891.84	7 372.97	7 848.64	8 918.91	14 032.42	41 264.82	17 362.15
Merkez	432 603.60	2 033 236.92	268 214.23	285 518.38	324 452.70	510 472.25	1 501 134.49	631 601.26
Ortaköy	27 387.36	128 720.59	16 980.16	18 075.66	20 540.52	32 317.09	95 034.14	39 985.55
Sarıyahşi	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Sultanhanı	3 432	16 130.40	2 127.84	2 265.12	2 574	4 049.76	11 909.04	5 010.72
Toplam	**512 423.34**	**2 408 389.70**	**317 702.47**	**338 199.41**	**384 317.51**	**604 659.55**	**1 778 108.99**	**748 138.09**

Aksaray ilinde bulunan küçükbaş ve kanatlı hayvan gübrelerinden elde edilecek toplam biyogaz miktarı 39 670 717.34 m^3/yıl olarak hesaplanmıştır. Bu miktarın ilçelere göre dağılımı Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Küçükbaş ve kanatlı hayvandan elde edilecek biyogaz miktarının ilçelere göre dağılımı

5 Sonuçlar

Dünyadaki atık miktarının teknolojik gelişmeler ile nüfusun hızla artışına bağlı olarak atmosfere salınan karbondioksit ve metan miktarının artmasına sebep olması, küresel ısınma ve iklim değişikliğini hızlandırmaktadır. Bu bağlamda, atıkların geri dönüşüme kazandırılması atmosfere salınan metan gazı miktarını düşürmektedir [4]. Ülkemizde bulunan enerji kaynaklarının daha etkin kullanılması, Türkiye'nin fosil enerji kaynaklarına olan bağımlılığını azaltarak ve gelecek nesiller için sürdürülebilir ve çevre dostu enerji sağlayacaktır [41]. Üretimi bu açıdan oldukça kritik bir rol oynamaktadır. Çünkü üretim esnasında metan gazı yararlı bir şekilde kullanılarak enerji üretimi gerçekleştirilir. Bu durum sadece çevresel açıdan değil ekonomik açıdan da oldukça büyük önem taşır. Kırsal bölgelerde istihdamı artırmasından enerji üretimi ile ülke ekonomisine fayda sağlaması biyogazın değerini artırmaktadır. Ayrıca *hemen* her yerde bulunabilmesi, sürdürülebilir modern tarımın gelişimine katkı sağlaması, sosyo-ekonomik gelişmelerde önemli olması, her ölçekte enerji verimi için uygun olması, depolanabilir olması, çevre kirliliği oluşturmaması ve asit yağmurlarının oluşumunu engellemesi bakımından biyogaz diğer enerji türlerinden farklılaşmaktadır.

Bu çalışmada Aksaray ilinin, küçükbaş ve kanatlı hayvan atıkları kaynaklı biyogaz üretimi potansiyeli belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile üretilecek biyogazın ısıl değerleri belirlenmiştir. Aksaray nüfusunun %70'i, geçimini tarım ve hayvancılıktan sağlamaktadır. Hayvan atıklarından elde edilecek biyogaz potansiyelinin belirlenmesini önemli kılmaktadır.

Araştırma bulgularına göre; Aksaray ilinde küçükbaş ve kanatlı hayvan gübrelerinden elde edilecek biyogaz potansiyeli toplamda 39 670 717 m^3/yıl'dır. Bu miktar 186 452 372 kWh elektrik enerjisine eşdeğerdir. Elde edilebilecek elektrik enerjisi ile Aksaray ili nüfusunun %12'sinin enerji ihtiyacı karşılanabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Araştırmanın bazı kısıtları bulunmaktadır. Bunlardan ilki, çalışmanın Aksaray ilinde gerçekleştirilmesidir. Gelecekteki araştırmalar, farklı illerin biyogaz potansiyelini inceleyebilir. Bu çalışmada, biyogaz potansiyeli incelenmiş olup, bu potansiyel küçükbaş ve kanatlı hayvanların atıkları üzerine gerçekleştirilmiştir. Gelecek çalışmalar biyogaz kavramını farklı açılardan (teknik sorunlar, personel, mekanik ekipman, biyogazın yan ürünlerin kullanımını, biyogaz kavramı ve hammadde verimliliklerini) inceleyebilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %11

Kaynaklar

[1] Environmental Impact Assessment, What is energy? 2020. www.eia.gov/energyexplained/what-is-energy/, Erişim tarihi: 08 Ocak 2022.
[2] R., Sharda, D. Delen, and E. Turban, Analytics, Data Science & Artifical Intelligence, Systems for Decision Support, Maleysia: Pearson Education, 2021.
[3] Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM), Enerji ve enerji kaynakları (t.y.). https://www.mgm.gov.tr/genel/sss.aspx?s=enerjikaynaklari, Erişim Tarihi: 16 Haziran 2021.
[4] İ.R. Uçar, Z. Özer ve O.Y. Sarıbıyık, Biyogaz üretiminde atıkaların verim üzerine araştırılması, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi 36(3), 581-589, 2021. https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1004337
[5] International Energy Agency (IEA), Global energy review. https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021/renewables/, Erişim Tarihi: 03 Ekim 2021.
[6] International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021/executive-summary, Erişim Tarihi: 04 Şubat 2022.
[7] World Wildlife Fund (WWF), Yenilenebilir enerji ve enerji verimliliği. (t.y.). https://www.wwf.org.tr/ne_yapiyoruz/iklim_degisikligi_ve_enerji/yenilenebilirnerji_ve_enerjiverimliligi/, Erişim Tarihi: 20 Haziran 2021.
[8] N. Bekar, Yenilenebilir enerji kaynakları açısından Türkiye'nin enerji jeopolitiği, Türkiye Siyaset Bilimi Dergisi, 3(1), 37-54, 2020. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1021680
[9] L. Appels, J. Lauwers, J. Degreve, L. Helsen, B. Lievens, K. Willems, JW. Impe, R. Dewil, Anaerobic digestion in global bioenergy production: Potential and research challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(9), 4295-4301, 2011. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.121, Erişim Tarihi: 01 Mayıs 2020.
[10] M. Polat, Hayvancılık sektörünün TRA2 Bölgesinin ekonomik kalkınması üzerinde etkileri, International Journal of Social Sciences and Education Research (IJSSER), 3(2), 631-643, 2017. 10.24289/ijsser.272720
[11] A., Namlı, M.O., Akça, Y. Çelik, Biyogaz santrallerinden çıkan sıvı fermente ürünlerin tarımsal kullanım potansiyellerinin araştırılması sonuç raporu, Ankara, Ostim Enerjik, 2020.
[12] BiyogazDer, Biyogaz enerjisi. https://biyogazder.org/biyogaz-enerjisi/, Erişim Tarihi: 17 Şubat 2022.
[13] A. Yılmaz, Türkiye'de biyogaz üretimi ve kurulu santrallerin ürettiği elektrik enerjisi, Ecological Life Sciences, 14(1), 1-28, 2019. 10.12739/NWSA.2019.14.1.5A0112
[14] BESYIAD, Yenilenebilir enerji'de çözüm: Biyogaz. 2019. http://www.besyiad.org.tr/index.php/tr/bültenler/19-biyogaz-tesisi, Erişim Tarihi: 18 Şubat 2022.
[15] S. Çakal, Türkiye'de bitkisel atıklardan elde edilen biyogaz enerji potansiyelinin belirlenmesi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Tekirdağ, 2019.
[16] T.C. Resmi Gazete, Sıfır Atık Yönetmeliği, https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2019/07/20190712-9.htm, Erişim Tarihi: 06 Temmuz 2021.
[17] L. Baştan Töke, Kompost ve biyogaz tesislerinde veri zarflama analizi ile etkinlik ölçümü, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Konya, 2020.
[18] D. Kaya ve H. Öztürk, Biyogaz teknolojisi, Kocaeli: Umuttepe Yayınları, 2012.
[19] The Chronicle, Turning an environmental problem into a solution, https://www.chronicle.co.zw/turning-an-environmental-problem-into-a-solution/, Erişim Tarihi: 03 Ekim 2021.
[20] Y. Aksu, Amasya ilindeki hayvansal atıkların biyogaz potansiyelinin belirlenmesi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat, 2019.
[21] N. Gül, Tavuk gübresinden biyogaz üretim potansiyelinin araştırılması, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 2016
[22] H. Şenol, E. Elibol, Ü. Açıkel ve M. Şenol, Biyogaz üretimi için Ankara'nın başlıca organik atık kaynakları, BEÜ Fen Bilimleri Dergisi, 6(2):15-28, 2017. https://doi.org/10.17798/bitlisfen.339261
[23] B. Ergişi, Türkiye'de hayvansal atıklardan biyogaz potansiyelinin hesaplanması ve çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak tesis yerinin belirlenmesi, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 2019.
[24] B. Öztürk, Aydın ili biyogaz potansiyelinin belirlenmesi, Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Aydın, 2019.
[25] K. Sorgulu, Anaerobik sistemlerde biyogaz içeriğinin enerji üretim sistemlerine etkisi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2020.
[26] H. Kaynarca, T. Kılıç, E. Açıkkalp ve S. Yerel Kandemir, Eskişehir biyogaz potansiyelinin değerlendirilmesi, Journal Of Geography 42:271-282, 2021. https://dergipark.org.tr/en/pub/iucografya/issue/63677/881905
[27] F. Yürük ve P. Erdoğmuş, Düzce ilinin hayvansal atıklarından üretilebilecek biyogaz potansiyeli ve K-means kümeleme ile optimum tesis konumunun belirlenmesi, İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi 4(1):47-56, 2015. https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/56477
[28] H. Yağlı, ve Y. Koç, Hayvan gübresinden biyogaz üretim potansiyelinin belirlenmesi: Adana ili örnek hesaplama, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 34(3):35-48, 2019. https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.637603
[29] Aksaray Belediyesi, Coğrafi özellikleri. (t.y.). http://aksaray.bel.tr/cografi-ozellikleri-121, Erişim Tarihi: 14 Temmuz 2021.

[30] T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Hayvan sayısı raporu. https://www.tarimorman.gov.tr, Erişim Tarihi: 28 Mayıs 2021.
[31] Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), Aksaray tavuk sayısı. https://cip.tuik.gov.tr/#, Erişim Tarihi: 23 Haziran 2021.
[32] M. Taşova, Yerel bir küçükbaş hayvancılık işletmesinin biyogaz potansiyelininin belirlenmesi, Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi 5(3):268-272, 2018. https://doi.org/10.30910/turkjans.448350
[33] N. K. Salihoğlu, A. Teksoy ve K. Altan, Büyükbaş ve küçükbaş hayvan atıklarından biyogaz üretim potansiyelinin belirlenmesi: Balıkesir ili örneği. ÖHÜ Müh. Bilim Dergisi 8(1), 31-47, 2018. doi: 10.28948/ngumuh.516798
[34] F. Öçal, Biyogaz enerjisi üretimi ve Eskişehir ili için Uygulama, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, 2013.
[35] A. A. Kadam, Generation of biogas and its utilization as a source of energy, International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science, 03(01), 2021. https://www.irjmets.com/uploadedfiles/paper/volume3/issue_1_january_2021/5988/1628083246.pdf.
[36] T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, 2020. https://arastirma.tarimorman.gov.tr/tepge/Belgeler/PDF%20Tarım%20Ürünleri%20Piyasaları/2020Ocak%20Tarım%20Ürünleri%20Raporu/Tavuk%20Eti%20Tarım%20Ürünleri%20Piyasa%20Raporu%202020%20ocak.pdf, Erişim Tarihi: 28 Mayıs 2021.
[37] Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) 2021a. Hayvansal üretim istatistikleri. https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Animal-Production-Statistics-December-2020-37207, Erişim Tarihi: 23 Haziran 2021.
[38] A. Yılmaz, S. Ünvar, T. Koca ve A. Koçer, Türkiye'de biyogaz üretimi ve biyogaz üretimi istatistik bilgileri. Enerji ve Çevre Dünyası Dergisi, 143(1), 28-44, 2018. 10.12739/NWSA.2017.12.4.2A0129
[39] M. Gümüşçü ve S. Uyanık, Güneydoğu Anadolu Bölgesi hayvansal atıklardan biyogaz ve biyogübre eldesi, Makine Mühendisleri Odası, 9(27), 59-65, 2010. doi: 10.332027/comuagri.435371
[40] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf, Erişim Tarihi: 12 Ağustos 2021.
[41] Breuer, T. 2012, Animal waste based biogas potential in Turkey, Turkish-German Biogas Project. www.biyogaz.web.tr, Erişim Tarihi: 03 Ocak 2021.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 116-122

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Euler Lagrange sistemlerinin uyarlamalı sinir ağları tabanlı çıkış geri beslemeli denetiminde konum sinyalinin sınırlandırılması

Limitation of position signal in output feedback control based on adaptive neural networks of Euler Lagrange systems

Bayram Melih Yılmaz[1,*]

[1]*Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 58010, Sivas, Türkiye*

Öz

Bu çalışmada, dinamik belirsizliklere sahip Euler Lagrange (EL) sistemlerinin konum takip problemine odaklanılmıştır. Özellikle, konum bilgisi elde edilirken hız bilgisinin kullanılamadığı ya da kullanılamadığı durum incelenmiştir. İkincil bir amaç olarak, her girişin takip hatasının önceden sınırlandırılması hedeflenmiştir. Konum takip hatasının önceden belirlenen bir bölgede olacak şekilde başlatılıp bu bölgede kalacağı kısıtları altında hedeflenen konumun takip edilmesi motivasyonu ile bir denetleyici tasarlanmıştır. EL sistemlerinin modelindeki belirsizliklerin bir kısmı gürbüz bileşenlerle bastırılarak telafi edilmiş, bir kısmı ise yenilikçi güncelleme kuralları kullanılarak yapay sinir ağları yaklaşımıyla kestirilip denetim yapısında kullanılmıştır. Hız ölçümlerinin mevcut olmaması durumunu telafi etmek için filtre temelli yöntemler kullanılmıştır. Konum sinyalinin sınırlı olması koşulu altında uyarlamalı sinir ağları tabanlı çıkış geri beslemeli yenilikçi bir denetleyici tasarlanmış, kapalı çevrim denetim sisteminin kararlılığı Lyapunov tabanlı metotlarla analiz edilmiştir. Tasarlanan denetleyicinin performansının değerlendirilmesi için iki serbestlik derecesine sahip düzlemsel robot modeli kullanılarak karşılaştırmalı benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Çıkış geri beslemeli kontrol, Yapay sinir ağları, Lyapunov yöntemleri

Abstract

In this study, the position tracking problem of Euler-Lagrange (EL) systems with dynamic uncertainties is addressed. Specifically, the case where velocity information is not utilized while obtaining position information is investigated. As a secondary objective, the aim is to pre-bound the tracking error of each input. A controller has been designed with the motivation of tracking the desired position within a predetermined region, initiated with the position tracking error being confined to this region. In the model of EL systems, some of the uncertainties have been suppressed and compensated using robust components, while the remaining uncertainties have been estimated using an artificial neural network approach with innovative update rules and incorporated into the control structure. An innovative controller with output feedback based on adaptive neural networks was designed under the condition of limited position signal, and the stability of the closed-loop control system was analyzed by Lyapunov-based methods. Comparative simulation studies have been conducted to evaluate the performance of the designed controller using a two-degree-of-freedom planar robot model.

Keywords: Output feedback control, Artificial neural network, Lyapunov methods

1 Giriş

Endüstride mekatronik sistemlere olan gereksinimin artması bilimsel yazında da bu tarz sistemlerin denetlenmesi odaklı çalışmalara olan ilgiyi arttırmıştır [1, 2]. EL sistemlerinin denetiminde önemli durumlardan biri konum seviyesindeki ölçümler yapılırken hız seviyesindeki ölçümlerin maliyetin azaltılması, sistemin karmaşıklığının azaltılması ya da sensörün konumlandırılacağı yerin uygun olmaması gibi durumlardan kaynaklı yapılmaması ya da yapılamamasıdır. Sistemin denetlenebilmesi için gereken hız bilgisinin mevcut olmadığı durumlarda hız bilgisi gözlemleyiciler tarafından konum bilgisi kullanılarak çeşitli hesaplama yöntemleri yardımıyla elde edilip, denetleyici tasarımında kullanılmaktadır. Gözlemleyicilerin bir kısmı hız bilgisinin kestirilebilmesi için model bilgisine ihtiyaç duyar. Model belirsizlikleri içeren sistemlerde bu tarz yöntemlerin kullanılması mümkün olmayabilmektedir. Bilimsel yazında var olan bu kapsamdaki çalışmalardan bazıları [3-5]'te sunulmuştur. Gözlemleyicilerin diğer kısmı ise modelin tamamına ihtiyaç duymamalarının yanında model ile ilgili bazı üst sınırlara ihtiyaç duyarlar. Bu tarz gözlemleyicilere [6, 7]'deki çalışmalar örnek olarak verilebilir. Model bilgisi gerektiren gözlemleyiciler kabaca iki grupta incelenebilir. İlk grup işaret fonksiyonu ya da işaret fonksiyonu yerine kullanılabilen fonksiyonlardan oluşan gözlemleyicilerdir. Bu gözlemleyicilere örnek olarak [8, 9]'daki çalışmalar verilebilir. Diğer grup ise kazançları yüksek olarak seçilerek tasarlanan gözlemleyicilerdir (örneğin yüksek kazançlı gözlemleyiciler). Bu tarz yöntemler için bilimsel yazında var olan çalışmalardan bazıları [10, 11]'de verilmiştir. Hız ölçümlerinin olmaması durumunda denetleyici tasarlanırken kullanılan diğer bir

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: melih@sivas.edu.tr (B.M. Yılmaz)
Geliş / Recieved: 12.07.2023 Kabul / Accepted: 01.11.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1326508

yöntem ise filtreleme tabanlı yöntemlerdir. Bu tarz yöntemlerde sistemin denetlenebilmesi için hız bilgisinin ölçülmesine ya da kestirilmesine gerek duyulmamaktadır. Bunun yerine hız bilgisinin eksikliği filtre tabanlı yöntemlerle telafi edilmektedir. Filtreleme yöntemiyle tasarlanan denetleyici için yapılan araştırmalardan bazıları [12, 13]'deki çalışmalarda verilmiştir. Sistemlerdeki model belirsizliklerinin bir kısmının kestirilerek, modeli tam ve eksiksiz olarak bilinen bir sisteme yaklaştırılması için kullanılan yöntemlerden biri uyarlamalı sinir ağları yöntemidir. Bu yöntemin avantajı her döngüde kapalı çevrim sistemin hata yapısı yardımıyla güncellenen kuralların kullanılmasıdır. Kararlılık analizine dahil edilen bu yapı sinir ağlarının mekanik sistemlerde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bu durumun bir sonucu olarak tasarlanan güncelleme kuralları hem kapalı çevrim sistemin kararlı olması açısından hem de başarımın arttırılması yönüyle önem taşımaktadır. Bu yönteme [14, 15]'te sunulan çalışmalar örnek olarak verilebilir. Yukarıda verilen çalışmalarda kararlılık Lyapunov tabanlı yöntemlerle sağlanmıştır. Lyapunov tabanlı yöntemlerin bir eksiği sistemin aşma sınırının olmamasıdır. Pozisyon işaretinin sınırlı kalması gereken sistemler düşünüldüğünde aşımın en aza indirilmesi önem taşımaktadır. Sistemin aşımı için teorik bir yöntem olmaması durumunda deneme yanılma yoluyla sistemin aşımının en aza indirildiği kazançları ayarlanarak sağlanmaktadır. Bu probleme çözüm olarak sunulan yöntemlerden biri Lyapunov bariyer fonksiyonu tabanlı denetleyicilerdir [16, 17]. Bu yöntemle her bir sistem durumu önsel olarak sınırlandırılabilir. Lyapunov bariyer fonksiyonu kullanılarak denetlenen sistemler için yapılmış çalışmaların bazıları [18, 19]'da verilmiştir. Çıkış geri beslemeli, Lyapunov bariyer fonksiyonu tabanlı olarak yapılmış olan az sayıdaki çalışmadan bir tanesi [20]'de verilen uyarlamalı denetim tabanlı çalışmadır. Uyarlamalı denetim regresör matrisine duyulan ihtiyaçtan dolayı modeli farklı sistemler için yeniden oluşturulmalıdır. Serbestlik derecesi yüksek olan sistemler için uyarlamalı denetimin uygulanması zorlaşmaktadır.

Bu çalışmada model bilgisinde belirsizlikler olan sistemlerin hız ölçümlerinin mevcut olmadığı kısıtları altında takip problemi ele alınmıştır. İkincil görev olarak her giriş için takip hatasının önsel olarak sınırlandırılması amaçlanmıştır. Regresör matrisinin bulunmasının zor olmasından dolayı elde edilmesi zor olan hız ölçümlerinin eksikliğini telafi etmek için filtre tabanlı yöntemlerden yararlanılmaktadır. Model belirsizlikleri için uyarlamalı sinir ağları yapısından yararlanılmıştır. Konum takip hatasını kısıtlamak için denetleyicinin bir parçası olarak takip hatasını çarpan, takip hatasına bağlı bir kazanç matrisinden yararlanılmıştır. En iyi bilgimiz dâhilinde EL sistemleri için yapay sinir ağları yardımıyla konum sınırlı, filtre tabanlı-çıkış geri beslemeli olarak tasarlanan ilk çalışmadır.

2 Denetleyici tasarımı ve hata sisteminin oluşturulması

Doğrudan tahrikli, n serbestlik dereceli bir Euler Lagrange sistemi matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [1].

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C_m(\theta,\dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) + F_d\dot{\theta} = \tau \tag{1}$$

$\theta(t), \dot{\theta}(t), \ddot{\theta}(t) \in \mathbb{R}^n$ sırasıyla, konum, hız ve ivme vektörlerini, $M(q) \in \mathbb{R}^{n\times n}$ pozitif tanımlı, simetrik eylemsizlik matrisini, $C_m(\theta,\dot{\theta}) \in \mathbb{R}^{n\times n}$ merkezcil koriyolis matrisini, $G(\theta) \in \mathbb{R}^n$ yerçekimi vektörünü, $F_d \in \mathbb{R}^{n\times n}$ sabit, köşegensel ve pozitif tanımlı viskoz sürtünme matrisini ve $\tau(t) \in \mathbb{R}^n$ tork giriş vektörünü göstermektedir. Çalışmanın devamındaki analizler için Denklem (1)'deki ifadenin sol tarafının birinci dereceden türevlenebilir olduğu varsayılmaktadır.

Tasarlanacak denetim sisteminin temel amacı, Denklem (1)'de dinamik modeli verilen EL sisteminin konum ölçümlerinin olup hız ölçümlerinin olmaması durumunda konum sinyalinin hedeflenen konum sinyalini takip etmesidir. Denetim hedefine ek olarak, konumların hedeflenen konumlara göre önsel olarak tanımlanan Δ_i bandında kalması gerekmektedir. Burada $\Delta_i > 0 \;\; i \in \{1,\cdots,n\}$ konumların içinde kalması gereken ve önsel olarak tanımlanan sınırlardır.

Denetim hedefinin ölçülebilmesi için konum takip hatası $e(t) \in \mathbb{R}^n$ aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır

$$e \triangleq \theta_d - \theta \tag{2}$$

burada $\theta_d(t) \in \mathbb{R}^n$ hedeflenen eklem konumlarını ifade etmektedir. Yukarıda tanımlanan hata işaretinden yararlanılarak ikincil denetim hedefi aşağıdaki şekilde verilebilir

$$|e_i(t)| < \Delta_i \;\; \forall t > 0, i \in \{1,\cdots,n\}. \tag{3}$$

Eklem hızlarının ölçül(e)memesi durumunu telafi etmek için filtreleme yönteminden yararlanılmaktadır. Hız ölçümleri yerine aşağıdaki şekilde tanımlanan $\eta_f(t) \in \mathbb{R}^n$ yardımcı işaretinden yararlanılacaktır

$$\eta_f \triangleq L - ke \tag{4}$$

burada $k \in \mathbb{R}$ sabit, pozitif denetim kazancıdır, $L(t) \in \mathbb{R}^n$ ifadesi ise yardımcı değişkendir ve zamana göre türevi aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır

$$\dot{L} \triangleq -(k+1)\eta_f - ke + K_e e \tag{5}$$

burada $L(0) = ke(0), K_e \in \mathbb{R}^{n\times n}$ hata işaretine bağlı kazanç matrisidir ve aşağıdaki şekilde tasarlanır [20, 21]

$$K_e = diag\{\frac{K_i}{\Delta_i^2 - e_i^2}\} \tag{6}$$

burada $K_i \;\; i \in \{1,\cdots,n\}$ pozitif kazançları ifade etmektedir. Denklem (4)'ün türevi alınıp Denklem (5) yerine yazıldığında aşağıdaki ifadeye ulaşılır

$$\dot{\eta}_f = -\eta_f - kz + K_e e. \tag{7}$$

Diğer bir filtre terimi olan $z(t) \in \mathbb{R}^n$ aşağıdaki şekilde tanımlanır

$$z \triangleq \dot{e} + e + \eta_f. \tag{8}$$

Denklem (8)'in türevi alınıp sol taraftan eylemsizlik matrisiyle çarpıldıktan sonra Denklem (1)'den yararlanılarak aşağıdaki ifadeye ulaşılır

$$M(\theta)\dot{z} = \mathrm{M}(\theta)\left(\ddot{\theta}_\mathrm{d} + \dot{e} + \dot{\eta}_\mathrm{f}\right) + \mathrm{C_m}\left(\theta, \dot{\theta}\right)\dot{\theta} + \mathrm{G}(\theta) + \mathrm{F_d}\dot{\theta} - \tau. \tag{9}$$

Denklem (9)' daki ifade aşağıdaki şekilde tekrar yazılabilir

$$M(\theta)\dot{z} = \mathrm{N} - \mathrm{C_m}\left(\theta, \dot{\theta}\right)\mathrm{z} - \mathrm{kM}(\theta)\mathrm{z} - \tau \tag{10}$$

burada $\mathrm{N}(\theta, \dot{\theta}, \theta_\mathrm{d}, \dot{\theta}_\mathrm{d}, \ddot{\theta}_\mathrm{d})$ aşağıdaki şekilde tanımlanır

$$N \triangleq M(\theta)\left(\ddot{\theta}_d + z - 2\eta_f + K_e e - e\right) + C_m(\theta, \dot{\theta})\left(\dot{\theta}_d + \eta_f + e\right) + G(\theta) + F_d\dot{\theta}. \tag{11}$$

N fonksiyonunun hedeflenen formda yazılmış hali olan $\mathrm{N_d}(\mathrm{x_d}) \in \mathbb{R}^\mathrm{n}$, $\theta \to \theta_\mathrm{d}$, $\dot{\theta} \to \dot{\theta}_\mathrm{d}$ olacak şekilde ayarlanarak aşağıdaki şekilde ifade edilir

$$N_d \triangleq M(\theta_d)(\ddot{\theta}_d) + C_m(\theta_d, \dot{\theta}_d)(\dot{\theta}_d) + G(\theta) + F_d\dot{\theta}_d \tag{12}$$

burada $\mathrm{x_d(t)} \triangleq [\theta_\mathrm{d}^\mathrm{T}, \dot{\theta}_\mathrm{d}^\mathrm{T}, \ddot{\theta}_\mathrm{d}^\mathrm{T}]^\mathrm{T} \in \mathbb{R}^{3\mathrm{n}}$ olarak tanımlanır. N ile hedeflenen formda yazılmış hali olan $\mathrm{N_d}$ ifadelerinin farkı aşağıdaki şekilde tanımlanır

$$\tilde{\mathrm{N}} \triangleq \mathrm{N} - \mathrm{N_d}. \tag{13}$$

Özellik 1: Eylemsizlik, merkezcil koriyolis matrislerinin ve yerçekimi vektörünün normları aşağıdaki gibi üstten sınırlandırılabilir [18]

$$\begin{aligned} \|M(\xi) - M(\nu)\|_{i\infty} &\le \mu_{m1}\|\xi - \nu\| \\ \|M^{-1}(\xi) - M^{-1}(\nu)\|_{i\infty} &\le \mu_{m2}\|\xi - \nu\| \\ \|C_m(\xi, \eta) - C_m(\nu, \eta)\|_{i\infty} &\le \mu_{c2}\|\eta\|\|\xi - \nu\| \\ \|G(\xi) - G(\nu)\| &\le \mu_g\|\xi - \nu\| \forall\, \xi, \nu, \eta \in \mathbb{R}^n \end{aligned} \tag{14}$$

burada μ_{m1}, μ_{m2}, μ_{c2} ve $\mu_\mathrm{g} \in \mathbb{R}$ bilinen artı sınırlandırıcı sabitleridir.

Özellik 2: Merkezcil koriyolis ve viskoz sürtünme matrislerinin normları aşağıdaki gibi üstten sınırlandırılabilir [1].

$$\begin{aligned} \|\mathrm{C_m}(\theta, \xi)\|_{\mathrm{i}\infty} &\le \mu_{\mathrm{v1}}\|\xi\|, \\ \|\mathrm{F_d}\|_{\mathrm{i}\infty} &\le \mu_\mathrm{f}\ \forall \xi \in \mathbb{R}^\mathrm{n} \end{aligned} \tag{15}$$

burada μ_{v1} ve μ_f artı sabitlerdir ve $\|\cdot\|_{\mathrm{i}\infty}$ matrisin indirgenmiş sonsuz normunu göstermektedir.

Denklem (13)'te verilen ifade için Özellik 1 ve Özellik 2'den yararlanılarak ortalama değer teoremine göre aşağıdaki ifade yazılabilir [22].

$$\left\|\tilde{\mathrm{N}}\right\| \le \rho(\|\mathrm{x}\|)\|\mathrm{x}\| \tag{16}$$

burada $x(t) \triangleq [e^T, \eta_f^T, z^T]^T \in \mathbb{R}^{3n}$ şeklinde tanımlanır ve $\rho(\|x\|) \in \mathbb{R}$ bilinen pozitif tanımlı bir fonksiyonu ifade eder.

Önerme 1: Yapay sinir ağları yönteminin evrensel yaklaşım özelliği kullanılarak Denklem (12)'de verilen hedeflenen yörünge formatındaki ifade aşağıdaki şekilde tanımlanabilir [23].

$$\mathrm{N_d} \triangleq \mathrm{w}^\mathrm{T}\sigma + \varepsilon \tag{17}$$

burada $w(t) \in \mathbb{R}^{3n\times n}$ ifadesi sabit ağırlık matrisini temsil ederken $\sigma(x_d) \in \mathbb{R}^{3n}$ ifadesi aktivasyon fonsiyonunu ve $\varepsilon(x_d) \in \mathbb{R}^n$ fonksiyonel yaklaşım hatasını ifade etmektedir. $\bar{\varepsilon}$ ise $\|\varepsilon(x_d)\| < \bar{\varepsilon}$ koşulunu sağlayan pozitif bir sabittir. Denklem (11), (13) ve (17) ifadelerinden yararlanılarak Denklem (10)'daki ifade aşağıdaki şekilde tekrar yazılabilir

$$\mathrm{M}\dot{\mathrm{z}} = \mathrm{w}^\mathrm{T}\sigma + \varepsilon + \tilde{\mathrm{N}} - \tau - \mathrm{kMz} - \mathrm{C_m z}. \tag{18}$$

Çalışmanın devamındaki analizlerden yararlanılarak denetim tork girişi aşağıdaki şekilde tasarlanmıştır

$$\tau = \hat{\mathrm{w}}^\mathrm{T}\sigma + \mathrm{K_e e} - \mathrm{k}\eta_\mathrm{f} \tag{19}$$

burada $\hat{w}(\mathrm{t}) \in \mathbb{R}^{3n\times n}$ ifadesi kestirilen ağırlık matrisini temsil etmekte ve aşağıdaki kurala göre güncellenmektedir

$$\dot{\hat{\mathrm{w}}} = \mathrm{Proj}\{\Gamma_{\mathrm{nn}}\sigma\mathrm{z}^\mathrm{T} - \mathrm{k_w}\|\mathrm{z}\|\Gamma_{\mathrm{nn}}\hat{\mathrm{w}}\} \tag{20}$$

burada $Proj\{\cdot\}$ projeksiyon operatörünü ifade etmektedir ve güncellenen ağırlık matrisinin sınırlı kalması için kullanılmaktadır [23]. $\Gamma_{nn} \in \mathbb{R}^{3n\times 3n}$ ifadesi pozitif tanımlı, simetrik adaptasyon kazancı, $\mathrm{k_w} \in \mathbb{R}$ pozitif adaptasyon kazancıdır. Denklem (19)'da verilen ifade Denklem (18)'de yerine yazıldığında aşağıdaki kapalı çevrim hata dinamiklerine ulaşılır

$$\mathrm{M}\dot{\mathrm{z}} = \mathrm{w}^\mathrm{T}\sigma - \hat{\mathrm{w}}^\mathrm{T}\sigma + \tilde{\mathrm{N}} - \mathrm{K_e e} + \mathrm{k}\eta_\mathrm{f} + \varepsilon - \mathrm{kMz} - \mathrm{C_m z}. \tag{21}$$

2.1 Kararlılık analizi

Bu bölümde model belirsizliklerine sahip EL sistemi için uyarlamalı sinir ağları tabanlı çıkış geri beslemeli denetimin kapalı çevrim sistem altındaki kararlılığı Lyapunov tabanlı yöntemler yardımıyla araştırılacaktır.

Teorem: Denklem (19)'da tasarlanan denetim tork girişi ve uyarlamalı sinir ağlarının ağırlık matrisinin güncellenmesini sağlayan Denklem (20)'de verilen güncelleme kuralı kullanılarak $\min\{K_i\} \ge \max\{\Delta_i^2\}$ koşulu altında kapalı çevrim sistemin sınırlılığı ve eklem konumlarının hedeflenen eklem konumlarını takip etmesi garanti edilir.

İspat: Teoremi doğrulamak için aşağıdaki Lyapunov aday fonksiyonu $V(t) \in \mathbb{R}$ tanımlanır

$$V \triangleq \frac{1}{2}\eta_f^T\eta_f + \frac{1}{2}z^TMz + \sum_{i=1}^{n}\frac{K_i}{2}\ln\left(\frac{\Delta_i^2}{\Delta_i^2 - e_i^2}\right) + \frac{1}{2}tr\{\tilde{w}^T\Gamma_w^{-1}\tilde{w}\} \quad (22)$$

burada $tr\{\cdot\}$ iz operatörünü ifade etmektedir. $\tilde{w} \in \mathbb{R}^{3n\times n}$ ifadesi ağırlık matrisi ile kestirilen ağırlık matrisi değerinin farkını göstermekte ve aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir

$$\tilde{w} \triangleq w - \hat{w}. \quad (23)$$

Projeksiyon yöntemi yardımıyla $\|\tilde{w}\|_{i\infty} \le \bar{\tilde{w}}$ ifadesinin sınırlı olduğu garanti edilir. Burada $\bar{\tilde{w}} \in \mathbb{R}$ pozitif sabiti ifade etmektedir.

Özellik 3: Eylemsizlik matrisi, alttan ve üstten aşağıdaki şekilde sınırlandırılabilir [1].

$$m_1\|\xi\|^2 \le \xi^T M\xi \le m_2\|\xi\|^2 \ \forall\xi \in \mathbb{R}^n \quad (24)$$

burada m_1 ve m_2 pozitif sabitlerdir.

Özellik 3 kullanılarak Denklem (22)'de tanımlanan Lyapunov aday fonksiyonu alttan ve üstten aşağıda verilen şekilde sınırlandırılabilir

$$\frac{1}{2}\min\left\{1, m_1, \frac{\min\{K_i\}}{\min\{\Delta_i^2\}}\right\}\|x\|^2 \le V \le \frac{1}{2}\max\{1, m_2, \max\{K_e\}\}\|x\|^2 + \frac{\bar{\tilde{w}}^2\lambda_{max}\{\Gamma_{nn}^{-1}\}}{2} \quad (25)$$

burada $\lambda_{max}\{\cdot\}$ ilgili matrisin en büyük özdeğerini ifade etmektedir.

Özellik 4: Eylemsizlik ve merkezcil koriyolis matrisleri aşağıdaki ters simetrik özelliğini sağlarlar [24]

$$\xi^T(\dot{M} - 2V_m)\xi = 0 \ \forall\ \xi \in \mathbb{R}^n \quad (26)$$

burada $\dot{M}(\theta)$ eylemsizlik matrisinin zamana göre türevini göstermektedir.

Başlangıçtaki konum hataları $|e_i(0)| < \Delta_i$ sağlandığında $V(t)$ fonksiyonu pozitif tanımlı ve radyal olarak sınırsızdır bu nedenle bariyer Lyapunov foksiyonunu ifade etmektedir. Denklem (22)'de tanımlanan ifadenin türevi alınıp, Özellik 4, Denklem (7) ve (21)'den yararlanılarak oluşturulan ifade sadeleştirildiğinde aşağıdaki ifadeye ulaşılır

$$\dot{V} = -e^TK_ee - \eta_f^T\eta_f + z^T(w^T\sigma - \hat{w}^T\sigma) + z^T\tilde{N} - kz^TMz - tr\{\tilde{w}^T\Gamma_{nn}^{-1}\dot{\hat{w}}\} + z^T\varepsilon \quad (27)$$

burada Denklem (6)'dan yararlanılarak oluşturulan $\sum_{i=1}^{n}\frac{e_iK_i\dot{e}_i}{\Delta_i^2 - e_i^2} = e^TK_e\dot{e}$ ifadesinden yararlanılmıştır. Gerekli sadeleştirmeler yapılarak Denklem (27) aşağıdaki şekilde tekrar yazılabilir

$$\dot{V} = -e^TK_ee - \eta_f^T\eta_f + z^T\tilde{N} - kz^TMz + z^T\varepsilon + k_w\|z\|tr\{\tilde{w}^T\hat{w}\} \quad (28)$$

burada $tr\{\tilde{w}^T\Gamma_{nn}^{-1}\dot{\hat{w}}\} = tr\{\tilde{w}^T\sigma z^T\} = z^T\tilde{w}^T\sigma$ eşitliğinden yararlanılmıştır. Özellik 3'ten yararlanılarak aşağıdaki ifade yazılabilir

$$-kz^TMz \le -km_1\|z\|^2. \quad (29)$$

Denklem (29)'dan yararlanılarak Denklem (27)'deki ifade için aşağıdaki şekilde bir üst sınır yazılabilir.

$$\dot{V} \le -\|e\|^2 - \|\eta_f\|^2 - m_1k\|z\|^2 + z^T\tilde{N} + z^T\varepsilon + k_w\|z\|tr\{\tilde{w}^T\hat{w}\} \quad (30)$$

burada $\min\{K_i\} \ge \max\{\Delta_i^2\}$ eşitsizliğini sağlayan $-e^TK_ee \le -\frac{\min\{K_i\}}{\max\{\Delta_i^2\}}\|e\|^2 \le -\|e\|^2$ üst sınırdan yararlanılmıştır. $k = \frac{1}{m_1}(1 + \bar{k} + \delta)$ olarak seçildikten sonra Denklem (30) aşağıdaki şeklide tekrar yazılabilir

$$\dot{V} \le -\|e\|^2 - \|\eta_f\|^2 - \|z\|^2 + \rho\|x\|\|z\| + z^T\varepsilon - \bar{k}\|z\|^2 - \delta\|z\|^2 + k_w\|z\|tr\{\tilde{w}^T\hat{w}\} \quad (31)$$

burada $\bar{k}, \delta \in \mathbb{R}$ pozitif kazançları ifade etmektedir. [22]'de verilen, doğrusal olmayan sönümleme bileşeninden yararlanılarak aşağıdaki ifadeye ulaşılır

$$\rho\|x\|\|z\| - \bar{k}\|z\|^2 \le \frac{\rho^2}{4\bar{k}}\|x\|^2 \quad (32)$$

Denklem (32) yardımıyla Denklem (31) için aşağıdaki şekilde yeni bir üst sınır yazılır

$$\dot{V} \le -\|x\|^2 + \frac{\rho^2}{4\bar{k}}\|x\|^2 + \varepsilon\|z\| - \delta\|z\|^2 + k_w\bar{w}\|z\|\|\tilde{w}\|_{i\infty} - k_w\|z\|\|\tilde{w}\|_{i\infty}^2 \quad (33)$$

$\|\tilde{w}\|_{i\infty} \le \bar{w}$ ifadesinden yararlanılarak Denklem (33) için aşağıdaki şekilde bir üst sınır yazılabilir

$$\dot{V} \le -\left(1 - \frac{\rho^2}{4\bar{k}}\right)\|x\|^2 - \|z\|\left[\delta\|z\| - \left(\varepsilon + \frac{\bar{w}^2}{4k_w}\right)\right] \quad (34)$$

burada $\bar{w} \in \mathbb{R}$ pozitif sabit üst sınırı ifade etmektedir. Kazançlar $1 \ge \frac{\rho^2}{4\bar{k}}$ ve $\|z\| \ge \frac{1}{\delta}\left(\varepsilon + \frac{\bar{w}^2}{4k_w}\right)$ eşitsizliklerini sağlayacak şekilde seçildiğinde $\dot{V} \le 0$ eşitsizliği sağlanır. Denklem (25) ve (34) yapılarından yararlanılarak, $V(t) \in \mathcal{L}_\infty$ gösterilebilir ve böylece $e(t)$ ve z(t)'nin sınırlı olduğu kanıtlanabilir. Standart sinyal takip argümanları kullanılarak kapalı döngü kontrol sistemi altında tüm işaretlerin sınırlı olduğu gösterilebilir. $e(t)$ ve z(t) işaretleri kontrol kazançları ile büyüklüğü ayarlanabilen bir bant ile sınırlı olduğu

gösterilebilir. Denklem (25) ve (34) ifadelerinin sağ tarafındaki sabit sınırlara bağlı olarak tek biçimli yarı küresel nihai bir bandın içinde kalacağı garanti edilir.

3 Benzetim sonuçları

Sunulan pozisyon sınırlı, çıkış geri beslemeli denetleyicinin performansının gösterilebilmesi için [1]'de verilen iki serbestlik dereceli düzlemsel robot modeli aşağıda verilen şekilde kullanılarak benzetim çalışmaları oluşturulmuştur.

$$M = \begin{bmatrix} p_1 + 2p_3c_2 & p_2 + p_3c_2 \\ p_2 + p_3c_2 & p_2 \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$V_m = \begin{bmatrix} -p_3s_2\dot{q}_2 & -p_3s_2(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ -p_3s_2\dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$F_d = \begin{bmatrix} p_4 & 0 \\ 0 & p_5 \end{bmatrix} \quad (37)$$

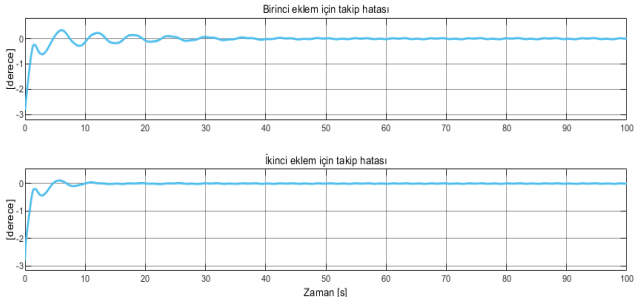
burada $s_2 = sin(q_2)$, $c_2 = cos(q_2)$, $c_{12} = cos(q_1 + q_2)$, $p_1 = 3.473$, $p_2 = 0.193$, $p_3 = 0.242$, $p_4 = 5.3$, $p_5 = 1.1$ olarak alınmıştır. Sayısal benzetim çalışmaları gerçekleştirilirken önceki analizlerle orantılı olarak, model parametrelerinin belirsiz olduğu kabul edilir ve bu nedenle kontrol tasarımında kullanılmamışlardır. Hedeflenen eklem pozisyon vektörü aşağıdaki şekilde seçilmiştir

$$\theta_d = \begin{bmatrix} 0.7\,sin(t)(1-\exp(-0.3t^3)) \\ 1.2\,sin(t)(1-\exp(-0.3t^3)) \end{bmatrix} [rad]. \quad (38)$$

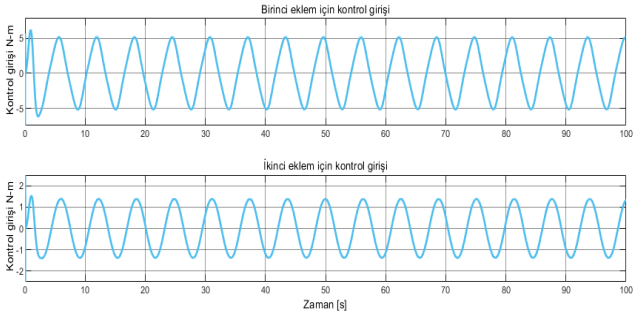
Deneme yanılma yoluyla belirlenen kontrol kazançları $k = diag\{480,300\}, K_i = diag\{2,2\}$ olarak ayarlanmıştır. Aktivasyon fonksiyonu olarak tanh(·) fonksiyonu kullanılmış, $\Gamma_{nn} = diag\{35,250,310,80,420,210\}$ *ve* $k_w = 1$ olarak seçilmiştir. Robot manipülatörünün başlangıçta hareketsiz durumdaki konumu iki eklem için de 2.8 derece olarak ayarlanmıştır. Δ_i i ∈ {1,2} sırasıyla 3, 5 ve 10 olarak ayarlanıp benzetim çalışmaları yapılmış ve sonuçları kıyaslanmıştır. $\Delta_i = 3$ için benzetim sonuçları Şekil 1, 2'de sunulmuştur. Şekil 1'de eklem pozisyonlarının takip hataları verilirken Şekil 2'de kontrol giriş torkları sunulmuştur. $\Delta_i = 5$ için benzetim sonuçları Şekil 3, 4'te sunulmuştur. Şekil 3'te eklem pozisyonlarının takip hataları verilirken Şekil 4'te kontrol giriş torkları verilmiştir. $\Delta_i = 10$ için benzetim sonuçları Şekil 5, 6'da sunulmuştur. Şekil 5'te eklem pozisyonlarının takip hataları verilirken Şekil 6'da kontrol giriş torkları verilmiştir. Şekil 1, 3 ve 5'teki eklem takip hatalarına bakıldığında hedeflenen yörüngenin pratik takibinin sağlandığı görülmektedir. Eklem pozisyonu takip hataları ve eklemlerin tork girişleri şekillerde birbirine yakın olduğundan dolayı karşılaştırmanın kolaylaştırılması için toplam hata ve toplam tork miktarları şeklinde Tablo 1'de verilmiştir. Üç farklı Δ_i değeri için hata değerlerinin ve tork değerlerinin normlarının karelerinin integralleri Tablo 1'de verilmiştir. $\Delta_i = 3,5,10$ değerleri için başlangıç koşulları 0.5, 1 ve 2 olacak şekilde benzetim sonuçları oluşturulmuş sırasıyla Tablo 2, 3,ve 4'te sunulmuştur. Radyan olarak oluşan eklem pozisyonu takip hataları ve başlangıç koşulları sonuçların kıyaslanmasını kolaylaştırmak için derece birimine dönüştürülerek sunulmuştur.

Tablo 1. Farklı Δ_i değerleri için sonuçlar

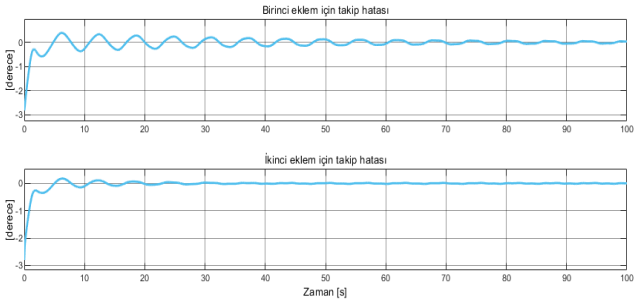
Δ_i değerleri	$\int \|\|e(\vartheta)\|\|^2 d\vartheta$	$\int \|\|\tau(\vartheta)\|\|^2 d\vartheta$
3	0.1295	3.468×10^5
5	0.1528	3.464×10^5
10	0.1878	3.463×10^5



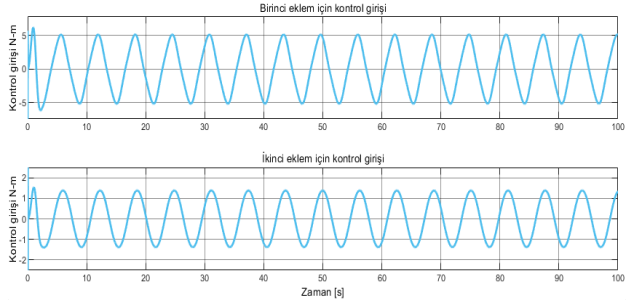
Şekil 1. Eklem pozisyonu takip hatası. ($\Delta_i = 3$)



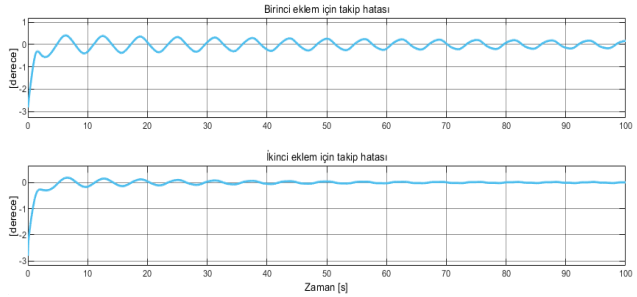
Şekil 2. Eklemlerin tork giriş değerleri. ($\Delta_i = 3$)



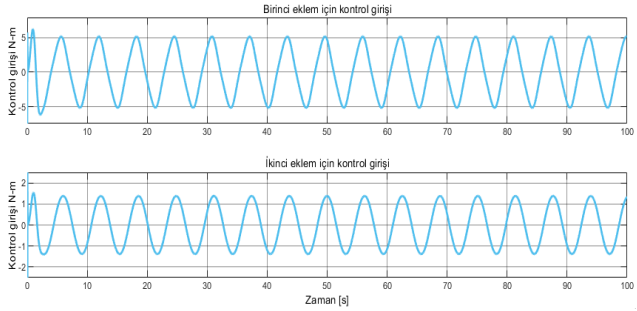
Şekil 3. Eklem pozisyonu takip hatası. ($\Delta_i = 5$)



Şekil 4. Eklemlerin tork giriş değerleri. ($\Delta_i = 5$)



Şekil 5. Eklem pozisyonu takip hatası. ($\Delta_i = 10$)



Şekil 6. Eklemlerin tork giriş değerleri. ($\Delta_i = 10$)

Tablo 2. Farklı başlangıç koşulu değerleri için sonuçlar ($\Delta_i = 3$)

Başlangıç koşulu Değerleri (derece)	$\int \|\|\boldsymbol{e}(\boldsymbol{\vartheta})\|\|^2 \, d\boldsymbol{\vartheta}$	$\int \|\|\boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{\vartheta})\|\|^2 \, d\boldsymbol{\vartheta}$
0.5	0.0147	6.726×10^4
1	0.0251	1.090×10^5
2	0.0705	2.246×10^5

Tablo 3. Farklı başlangıç koşulu değerleri için sonuçlar ($\Delta_i = 5$)

Başlangıç koşulu Değerleri (derece)	$\int \|\|\boldsymbol{e}(\boldsymbol{\vartheta})\|\|^2 \, d\boldsymbol{\vartheta}$	$\int \|\|\boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{\vartheta})\|\|^2 \, d\boldsymbol{\vartheta}$
0.5	0.0347	6.724×10^4
1	0.0451	1.089×10^5
2	0.0917	2.244×10^5

Tablo 4. Farklı başlangıç koşulu değerleri için sonuçlar ($\Delta_i = 10$)

Başlangıç koşulu Değerleri (derece)	$\int \|\|\boldsymbol{e}(\boldsymbol{\vartheta})\|\|^2 \, d\boldsymbol{\vartheta}$	$\int \|\|\boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{\vartheta})\|\|^2 \, d\boldsymbol{\vartheta}$
0.5	0.0690	6.723×10^4
1	0.0800	1.088×10^5
2	0.1262	2.243×10^5

Tablo 5'te ise sinir ağları yapısının kullanılmadığı durum için çıkış geri beslemeli, pozisyon sinyali sınırlı olarak tasarlanan kontrolör ($\tau = K_e e - k\eta_f$) ile (19)'da tasarlanan kontrolörün toplam hata miktarları eşitlenerek toplam tork miktarları kıyaslanmıştır. ($\Delta_i = 3$)

Tablo 5. Farklı Δ_i değerleri için sonuçlar

Kontrolör	$\int \|\|\boldsymbol{e}(\boldsymbol{\vartheta})\|\|^2 \, d\boldsymbol{\vartheta}$	$\int \|\|\boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{\vartheta})\|\|^2 \, d\boldsymbol{\vartheta}$
$\tau = K_e e - k\eta_f$	0.1295	1.167×10^7
$\tau = \hat{w}^T\sigma + K_e e - k\eta_f$	0.1295	6.723×10^4

Bilimsel yazında uyarlamalı kontrol tabanlı olarak oluşturulan, çıkış geri beslemeli olarak tasarlanmış [20, 21]'deki çalışmaların sonuçları tasarlanan kontrolör ile benzer sonuçlar üretmiş olmasına rağmen uyarlamalı kontrolörde regresör matrisine ihtiyaç duyulmasından dolayı özellikle de yüksek serbestlik dereceli sistemler düşünüldüğünde uygulanmasının zorlaşmasından dolayı bu tarz pozisyon sınırlı görevler için (19)'da tasarlanan kontrolörün seçilmesi uygun olabilir. Tablo 2, 3 ve 4'e bakıldığında başlangıç koşulunun büyütülmesi durumunda hem toplam hata miktarının hem de toplam tork miktarının arttığı görülmektedir. Tablo 5'te ise sinir ağı yapısının kullanılmadığı durumda toplam tork miktarında artış olduğu görülmektedir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, modeli tam ve eksiksiz olarak bilinmeyen robot manipülatörlerinin pozisyon ölçümlerinin olup hız ölçümlerinin olmadığı kısıt altında hedeflenen pozisyonun takip edilmesi problemine odaklanılmıştır. Sunulan kontrolör hız ölçümleri olmamasına rağmen pozisyon hatalarının önceden tanımlanan sınırlar içinde kalmasını garanti edecek şekilde tasarlanmıştır. Model belirsizlikleri için ise uyarlamalı sinir ağları yapısından yararlanılmıştır. Uyarlamalı sinir ağları yöntemi kullanılarak, pozisyon sınırlı ve filtreleme yöntemi tabanlı-çıkış geri beslemeli olarak yapılan ilk tasarımdır. Sunulan kapalı çevrim kontrol sistemi için kararlılık analizi Bariyer Lyapunov fonksiyonu tabanlı yöntemlerle yapılmıştır. İki serbestlik dereceli düzlemsel robot modeli kullanılarak, önceden tanımlanan farklı Δ_i sınırları için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Tablo 1'de sunulan karşılaştırmalı sonuçlara bakıldığında Δ_i sınırı arttırıldığında kontrol giriş torklarının normlarının karelerinin integralleri azalırken hataların normlarının karelerinin integrallerinin arttığı görülmektedir. Gelecek çalışmalarda performansı önceden belirlenmiş derin öğrenme tabanlı sistemlere odaklanılması planlanmaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 6

Kaynaklar

[1] F.L. Lewis, D.M. Dawson and C.T. Abdallah, Robot Manipulator Control: Theory and Practice. CRC Press, Basel, 2003.

[2] G. Yüksel, T. Yiğit ve H Çelik, DA motor tahrikli dört serbestlik dereceli bir robot kolun 2-DOF PID ile

kontrolü. 19. Otomatik Kontrol Türk Millî Komitesi Ulusal Toplantısı, sayfa 410-415, İstanbul, Türkiye, 2018.

[3] H. Berghuis and H. Nijmeijer, A passivity approach to controller-observer design for robots, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 9 (6), 740-754, 1993. https://doi.org/10.1109/70.265918.

[4] R.O. Astolfi, and A. Venkatraman, A globally exponentially convergent immersion and invariance speed observer for mechanical systems with non-holonomic constraints. Automatica, 46 (5), 182–189, 2010. https://doi.org/10.1016/j.automatica.2009.10.027.

[5] M. Namvar, A class of globally convergent velocity observers for robotic manipulators. IEEE Transactions Automatic Control. 54 (8), 1956–1961, 2009. https://doi.org/10.1109/tac.2009.2023960.

[6] C. D. Wit and J. Slotine, Sliding observers for robot manipulators. Automatica, 27 (5), 859–864, 1991. https://doi.org/10.1016/b978-0-08-037022-4.50071-5.

[7] A. Abdessameud and M. F. Khelfi, A variable structure observer for the control of robot manipulators. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 16 (2), 189–196, 2006. https://rb.gy/iyfqtb.

[8] Y. Xiong and M. Saif, Sliding mode observer for nonlinear uncertain systems. IEEE Transactions on Automatic Control, 46 (12), 2012–2017, 2001. https://doi.org/10.1109/9.975511.

[9] M. Dawson, Z. Qu, and J. C. Carroll, On the state observation and output feedback problems for nonlinear uncertain dynamic systems. Systems and Control Letters. 18, 2, 217–222, 1992. https://doi.org/10.1109/secon.1992.202244.

[10] A. Teel and L. Praly, Global stabilizability and observability imply semi global stabilizability by output feedback. Systems and Control Letters, 22 (2), 313–325, 1994. https://doi.org/10.1016/0167-6911(94)90029-9.

[11] N. Atassi and H. K. Khalil, A separation principle for the stabilization of a class of nonlinear systems. IEEE Transactions on Automatic Control, 44 (9), 1672–1687, 1999. https://doi.org/10.23919/ecc.1997.7082714.

[12] Y. Yuan and Y. Stepanenko, Robust control of robotic manipulators without velocity feedback. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 1 (3), 203-213, 1991. https://doi.org/10.1002/rnc.4590010306.

[13] E. Zergeroglu, W. Dixon, D. Haste ve Dawson D, A composite adaptive output feedback tracking controller for robotic manipulators. Robotica, 17 (6), 591-600, 1999. https://doi.org/10.1109/acc.1999.782314.

[14] Y. H. Kim, F. Lewis and D.M. Dawson, Intelligent optimal control of robotic manipulators using neural networks. Automatica, 36 (9), 1355-1364, 2000. https://doi.org/10.1016/s0005-1098(00)00045-5.

[15] N. Cobanoglu, B.M. Yilmaz, E. Tatlicioglu ve E. Zergeroglu, Repetitive control of robotic manipulators in operational space: A neural network-based approach. International Journal of Robotics and Automation, 37 (3), 2022. https://doi.org/10.2316/j.2021.206-0654.

[16] K. B. Ngo, R. Mahony, and Z. P. Jiang, Integrator backstepping using barrier functions for systems with multiple state constraints, Proceedings of the 44th Conferance Decision and Control, pp. 8306–8312, Seville, Spain, 2005.

[17] K. P. Tee, S.S. Ge, ve E. H. Tay, Barrier Lyapunov functions for the control of output-constrained nonlinear systems, Automatica, 45 (4), 918–927, 2009. https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2013.07.003.

[18] Y. Karayiannidis and Z. Doulgeri, Model-free robot joint position regulation and tracking with prescribed performance guarantees. Robotics and Autonomous Systems, 60 (2), 214–226, 2012. https://doi.org/10.1016/j.robot.2011.10.007.

[19] Y. Karayiannidis, D. Papageorgiou, and Z. Doulgeri, A model–free controller for guaranteed prescribed performance tracking of both robot joint positions and velocities. IEEE Robotics and Automation Letters, 1 (1), 267–273, 2016. https://doi.org/10.1109/lra.2016.2516245.

[20] S. Gul, E. Zergeroglu, and E. Tatlicioglu, Position Constrained, Adaptive Control of Robotic Manipulators without Velocity Measurements. arXiv preprint arXiv:2107.03056, 2021.

[21] S. Gul, E. Zergeroglu, E. Tatlicioglu, and M.V. Kilinc, Desired model compensation-based position constrained control of robotic manipulators. Robotica, 40 (2), 279-293, 2022. https://doi.org/10.1017/s0263574721000527.

[22] H. K. Khalil, Nonlinear Systems, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002.

[23] F. Lewis, S. Jagannathan and A. Yesildirek, Neural Network Control of Robot Manipulators and Nonlinear Systems. Taylor-Francis, London, 2020.

[24] P. Tomei, Adaptive PD controller for robot manipulators, IEEE Trans. Robotic and Automation, 7, 4, 565–570, 1991. https://doi.org/10.1109/70.86088.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 123-130

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Response of trigger type to circular CFRP crash box energy absorption performance

Tetikleyici tipinin dairesel KFTP çarpışma kutusu enerji emilim performansına etkisi

Ertan Kösedağ[1,*]

[1] *Van Yüzüncü Yıl University, Department of Mechanical Engineering, 65080, Van, Türkiye*

Abstract

In this study, carbon fiber reinforced polymer matrix composites were produced to investigate the trigger effect on energy absorption performance. Production was carried out by vacuum infusion method. Three types of trigger geometry were opened on the composite crash boxes produced and also comparison sample without trigger was prepared. The quasi-static compression tests of these four different samples were carried out and the energy absorption performances of the samples were evaluated with the obtained data. In addition, the damages of the samples were examined, and it was revealed how they changed with the trigger. Accordingly, the sample described as S-2, (the triggered sample, which consists of four symmetrical slits downwards from its upper surface) exhibited the best performance in terms of absorbed energy. Additionally, the peak forces were reduced with the triggers opened and the maximum peak force decreases were seen in S-3(with hole type triggers) and S-4 (with horizontal slit type triggers) samples.

Keywords: Carbon fiber reinforced composites, Crash box, Trigger

Öz

Bu çalışmada enerji absorpsiyon performansı üzerine tetikleyici etkisinin incelenmesi için karbon fiber takviyeli polimer matrisli kompozitler üretilmiştir. Üretim vakum infüzyon metodu ile gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozit çarpışma kutularının üzerine üç çeşit tetikleme geometrisi açılmış ve bir de tetikleyici içermeyen karşılaştırma numunesi hazırlanmıştır. Bu dört farklı numunenin yarı-statik basma testleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen datalar ile numunelerin enerji emme performansları değerlendirilmiştir. Bunun yanında numunelerin hasarları incelenmiş ve tetikleyici ile nasıl değiştiği ortaya konmuştur. Buna göre S-2 olarak tanımlanan numune (üst yüzeyinden aşağıya doğru dört simetrik yarık ile tetiklenen numune), emilen enerji açısından en iyi performansı sergilemiştir. Ayrıca açılan tetikleyiciler ile tepe kuvveti düşürülmüş ve maksimum tepe kuvveti azalmaları S-3 (delik tipi tetikleyiciye sahip) ve S-4 (yatay yarık tipi tetikleyiciye sahip) numunelerinde görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Karbon fiber takviyeli kompozitler, Çarpışma kutusu, Tetikleyici

1 Introduction

Automobile manufacturers compete in the automotive sector to build better cars with essential performance and safety standards. In the event of an accident, a significant quantity of energy is produced due to the velocity and mass of the cars, and this energy needs to be adequately absorbed. Manufacturers strive to produce safer vehicles so that passengers and the vehicle are minimally affected in the event of a collision [1]. The production of forces that may hurt the driver and passengers because of the energy that cannot be effectively absorbed will put their lives in danger. There are parts called crash boxes specially designed for this damping in vehicles [2]. Studies on crash boxes have become more crucial as the relevance of concepts like sustainability, the environment, and fuel efficiency has increased along with the necessity of vehicle lightness and rising competition. Such structures in vehicles are categorized as collision energy absorbent element structures. Every crash endurance study focuses on energy-absorbing structures like bumpers and crash boxes. A vehicle-mounted crash box is a thin-walled structure fixed to the front of the vehicle. In the event of a collision-related crash, the structure functions as an element that absorbs energy in the car. This crash box structure is intended to act as a vehicle's passive safety system, absorbing kinetic energy in frontal collisions, limiting vehicle deceleration to a safe level, and reducing the risk of injury to the occupants [3]. The workspace of the crash-box structure includes a variety of components and methods, but mostly adds to the workspace for crash resistance. Due to these factors, proper decisions should be taken taking on the crash boxes' ability to absorb kinetic energy as well as its manufacturing potential, price, and weight. The layout of the crash box is one of the most frequently discussed subjects. To comprehend the plastic deformation behavior of various thin-walled constructions, including cylindrical, square/polygonal, conical/conical, and hat-section beams, as well as how well they can fit as an energy-absorbing component, these structures are investigated and compared [4–6]. Some studies have investigated the roles of thin-wall structure size and

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ekosedag@yyu.edu.tr (E. Kösedağ)
Geliş / Recieved: 28.08.2023 Kabul / Accepted: 06.11.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngmuh.1351499

thickness in collision behavior. In the design of the crash box, many designs were assessed under various conditions, including infills, hybrids, and multicellular structures. Studies on the configuration of defects are carried out to assess the energy absorbed by thin-walled structures with trigger defects [7].

The majority of investigations on the crash box have, according to the study of the literature, concentrated on how well the crash box construction absorbs energy [3, 5, 8]. Existing studies are reviewed and some of them are given below. When the results of previous studies are examined, it is seen that geometric shapes give different results in energy dissipation. The amount of energy dissipated varies depending on the strength of the material of the crash box, the thickness of the walls, the basic shape of the box and some design parameters such as whether infill material is used or not. Although the amount of energy dissipation depends on the strength of the material used, strain is required to dissipate energy. In other words, it is not desirable to bear the impact by using a very strong and rigid structure under impact. In such a case, the deceleration will remain at very high values, high forces will affect the passenger and cause the sensitive parts inside to be deformed by not being able to withstand the load [9]. To reduce the weight, cost, and increase energy absorption of crash boxes, numerous experiments have been conducted. These studies can be divided into classes such as changing the geometry, using infill, and changing the material used, creating triggers to manipulate the damage mechanisms of the crash box.

Zhonggang Wang et al. [10] carried out studies by keeping the weight constant on a classical empty column and columns divided into cells. In this study, it is aimed to examine the folding mechanics. Like the previous study of Nasir et al. [11], the results obtained in the experiments and simulations were compared and the simulations were confirmed, and then the studies were continued with emphasis on simulation. Columns with different cell numbers (n) were used in the studies. To determine the contribution of the column connection types to the energy absorption, the connection types are divided into three as corner, t and diagonal. As the number of cells increased in the columns, the thickness was decreased to keep the weight constant. It was determined that thick-walled low-cell structures were twisted and folded at longer lengths. The oscillation amplitudes in the forces decreased significantly due to the thinning of the walls as the number of cells increased. In this study, it was also determined that the cross-link type was the most effective connection type in energy absorption. Corner and junction points influence energy dissipation in multi-cell studies [12–14]. Heung-Soo Kim [15] draws on studies that report that as more material is added to the corner portion, more crash energy is absorbed. The issue of global instability, however, could materialize since the folding wavelength is substantially longer for columns with thicker corners. Considering this negativity, different profiles are envisaged to both increase the crash energy absorption and provide a more stable and gradual collapse under certain constraints. In this context, the idea of adding an additional folding element to the corner of a cross-section was proposed, and profiles with different cross-sectional areas, produced with aluminum extrusion and one more square column added to the corners, were put to the test. According to the results obtained in a study in which the effect of the number of sides of the polygon on the energy dissipation is discussed [11]; Although the energy absorption often increases with the increase of the number of edges, it may decrease in some number of sides and when approaching some number of sides, and considering that the cylinder is an infinite polygon, it can be said that there is an optimum point on the energy absorption depending on the number of sides. Three categories of materials can be utilized to make crash boxes: metal/alloy, composites, and hybrids of composite-metal/alloy. Studies mostly focused on steel and aluminum as the primary materials in the metal/alloy category. On the other hand, aluminum is a strong yet lightweight material, which has piqued the curiosity of researchers who want to assess how well it can withstand impacts. In the meantime, research on composite materials is constantly in demand because there is such a demand for a metal substitute [16–18]. To enhance energy absorption capacity, crash box designs that are distinctive or original have been made possible by the use of composite materials. Huusayin [19] assessed the energy absorption capabilities of axially crushed glass fiber reinforced plastic (GFRP) crash boxes with various geometries. According to a comparison of the collision outputs, the order of the geometries with respect to energy absorbed was square, cylindrical, hexagonal, and decagonal. The decagon shape had the highest peak force value, and the square shape had the lowest. Nia et al. [20] compared a big collection of aluminum alloy tubes with various cross-sectional forms. The authors found that cylindrical pipes absorbed the most energy per unit mass under the same loading (quasi-static loading). The gradual increase in the cross-sectional area of the samples affected the maximum and average forces as well as the energy absorption capacity [21].

In addition to the geometric shape of the crash box, which is the main factor contributing to the crash-proof performance; loading state can also affect collision behavior. Understanding collision behavior under different loads helps us determine where in a car the crash absorption structure should be placed. Axial loading, oblique loading, lateral loading, and bending loading are basically the four loading states connected to car impact. Crash boxes, can be tested for both axial and oblique impact loads in the quasi-static or dynamic condition. [3, 4, 22]. To comprehend how the breaking rate and energy affect the structure under examination, different test settings might be used. The best structure with the best crash performance should be examined under various load situations.

Another method for creating a crash box structure that is highly crashworthy is to employ triggers. Trigger, often referred to as "crush initiator," "stress concentrator," or "imperfection" in many different researches, is made with the goal of stabilizing the collapse process and lowering the peak force upon impact. Prior research has introduced many trigger kinds, including cutting, grooves/corrugation, holes, and uneven ends [19, 23, 24]. All research that used trigger

in the crash box design came to the same conclusion: trigger has a significant impact on the crushing reaction and the energy absorption performance [25].

Some studies in this area are drilling [11, 26, 27], irregular finishers [11] and partial cuts. Thin-walled square tubes with rectangular and slotted windows were added by Zhou et al. [27] to improve the impact resistance of tubular structures. The authors presented quasi-static axial fracture tests, numerical simulation analyzes, four single-window tubes, twelve three-window tubes, and two conventional tubes. The findings demonstrated that although the other collapse modes of conventional tubes belong to the irregular mode, those of conventional tubes belong to the symmetrical mode. Additionally, the installation of windows can significantly lower the first peak load and increase the effectiveness of the crush force compared to standard tube. Despite the significant mass reduction for windowed tubes, the specific absorbed energy did not always increase. Circular, square and hexagonal geometries were commonly studied in crash box studies. The studies carried out with the trigger were carried out by emphasizing the stress concentration. In this context, circular geometry was chosen to avoid corners.

The aim of this study is to produce crash boxes consisting of lightweight and durable carbon fiber reinforced polymer (CFRP) matrix composites by vacuum infusion method and observe the effect of trigger type. Three different irregularities (vertical slit, hole, and lateral slit) were created to induce a trigger effect on the crash boxes produced in this direction. In addition, a regular composite circular CFRP crash box with no slits or holes was produced and tested for comparison. The data obtained from quasi-static tests of four different crash boxes were evaluated.

2 Material and methods

In this study, cylindrical crash boxes were produced from carbon fiber reinforced epoxy matrix composite by vacuum infusion method. The steps of producing carbon fiber reinforced polymer matrix composite in cylindrical geometry by vacuum infusion method are listed below. In addition, a visual taken during production is given in Figure 1. 1) The surfaces of the molds consisting of rollers are cleaned. 2) Mold surfaces are waxed to prevent sticking. 3) Plain carbon fiber fabric is fixed to the mold with spray adhesive to hold one end. 4) The fiber fabric is wrapped in the amount determined according to the thickness planning. 5) Separator fabric is wrapped on glass fiber fabric. 6) Grit meshes are wrapped on the separator fabric for homogeneous progression of the epoxy. 7) Hoses that will provide vacuum and epoxy flow are placed at both ends of the mold pipe. 8) It is taped with heat resistant nylon and vacuum sealing tape. 9) With the hose extended from one end of the mold pipe, the vacuum system is activated and all the air inside is sucked. 10) With the help of the negative pressure created by the vacuum, the end of the other hose is dipped into the epoxy hardener mixture and the whole system is wetted with the resin set. 11) The hose ends are clamped, and the system is taken to the curing oven. 12) The composite system, cured at 100 ℃ for 1 hour, is then separated from the mold pipe and its burrs are removed.

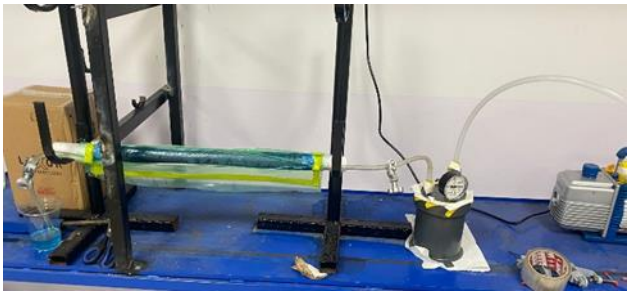


Figure 1. Production of a carbon fiber reinforced polymer matrix crash box

The composite crash boxes obtained by means of these stages were cut to 1/3-5 aspect ratio specified in the literature and taken to the test phase [3]. An image of the produced carbon fiber reinforced polymer matrix composites is given in Figure 2. The inner diameter of the composite crash box was 35 mm, the outer diameter was 40 mm, so the wall thickness was 2.5 mm. Its length was 90 mm. Three types of triggers were opened to carbon fiber composites produced in this geometry, and also a non-triggered sample was reserved for comparison. Composite materials are very sensitive to secondary processes. And in our tests, it has been seen that damage cannot be done only with the disk rotating at high speed. For this reason, the engraving set operating at high speed was used for unloading operations.

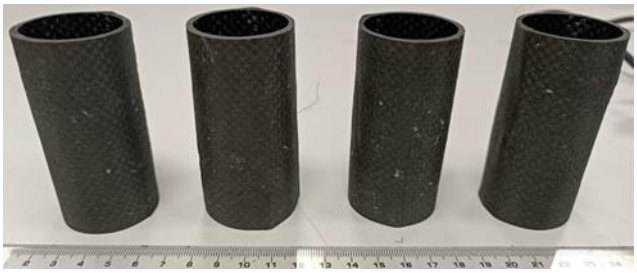


Figure 2. Composite samples that were produced and prepared for adding triggers

Triggers opened on the sample are seen in Figure 3. If these are disclosed: The S-1 sample was the non-triggered sample. The S-2 sample contained four ridges opened 10 mm vertically from the tip. The width of the slit was 3 mm. The S-2 sample consisted of four symmetrical holes drilled 10 mm down from the tip. The diameter of the hole was 3 mm. In the last sample, S-4, there were four symmetrical horizontal slits opened 10 mm below the tip. The width of the slits was 3 mm. The carbon fiber fabric used had a plain structure and an area density of 400 gr/m2. The plain fabric was wrapped in 10 layers. Hexon MGS lr-160 epoxy and lh 160 hardener were used. Quasi-static compression test was performed to determine the energy absorption of the crash box obtained from the produced composite material. The tests were carried out at 2 mm/min and continued for 35 mm. These test conditions were taken from the literature [3].

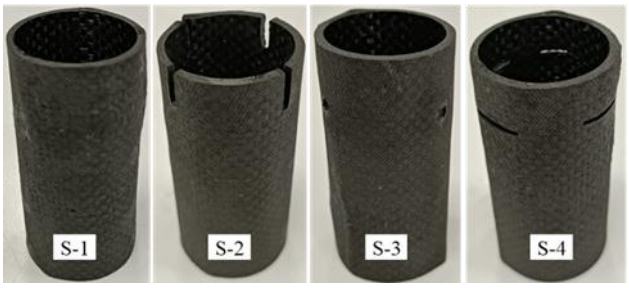


Figure 3. Sample types and the geometry of the triggers opened on them

The force-displacement curves obtained from these tests were drawn and the maximum force values were determined. In addition, the energy values absorbed were calculated by integrating the contact force displacement curves, that is, by calculating the area under them. Since the samples were about the same weight, the specific energy absorption used in such studies, which provides a mass-independent comparison, was not calculated, and the absorbed energies were compared to evaluate the trigger type effect. In addition, damage patterns were determined, and damage mechanisms were discussed depending on the trigger type. Three replicates were made for each sample and the results were added. The weights of composite tubes were almost equal to each other. As a result of the measurement, the weight of the carbon fiber reinforced composite crash box samples was determined as 36±2 grams.

3 Results and discussion

In this section, the samples were handled one by one, the maximum contact force, the energy they absorbed, and the damage images of the samples were discussed and then their comparisons with each other were made. The first sample was the S-1 sample. There was no trigger mechanism in this sample. The contact force-displacement curve containing the data of the S-1 sample is given in Figure 4. The maximum contact force of this sample was 9.48 kN, while the average contact force was 5.06 kN. The area found by integrating the contact force displacement curve, that is, the energy it absorbed, was 169 joules. When Figure 4 is examined, a sudden decrease after a severe peak force and then partially increasing and decreasing peaks are seen.

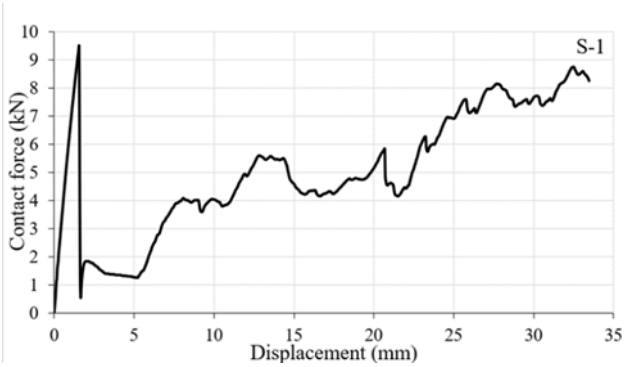


Figure 4. Contact force-displacement curve obtained from the quasi-static compression test of the S-1 sample

Peak force is usually the force that occurs when the sample is first damaged, and if this force is too high compared to the average force, it is a negative situation in terms of crash box efficiency. The small fluctuations seen after the peak force occurred because of the breaking of the horizontal fibers in the composite. The reason for the increase in the force is that some of the delaminated fibers bend inward and create resistance again.

In Figure 5, the images of the S-1 sample during the quasi-static test is given in four steps, respectively. In the first step, the sample was just placed and did not suffered any damage. The second step includes the image when the sample took the first damage, and the peak force occured. The first fracture was located almost in the middle of the sample and surrounded the sample. In the third and fourth steps, it is seen that the fiber broke in the sample and the overlapping parts forced each other to cut.



Figure 5. Damage of S-1 specimen during quasi-static compression

Another sample was the S-2 sample. In this sample, four vertically symmetrical slits were opened from top to bottom with a length of 10 mm. The contact force - displacement curve of the S-2 sample is presented in Figure 6. According to this data, the peak force, which is the maximum contact force of the S-2 sample, was 8.43 kN. In addition, the average force was determined as 6.18 kN. Compared to the S-1 sample, it is seen that there was a decrease in the maximum contact force and an increase in the average force. The energy absorbed by the S-2 sample was 210 joules. It can be calculated that it absorbed 24.2% more energy compared to the S-1 sample.

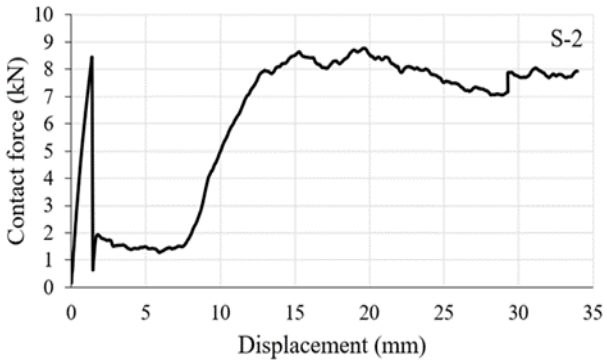


Figure 6. Contact force-displacement curve obtained from the quasi-static compression test of the S-2 sample

In addition, the requirements of decreasing the maximum contact force and increasing the average force, which are the parameters of increasing the performance of the crash boxes, were also realized. The maximum contact force decreased by 11% and the average force increased by 22% compared to S-1.

The damage steps of the S-2 sample during the quasi-static test are given in Figure 7. The first step is the original state of the sample, which was not yet been damaged. In the second step, the first fracture occurred, where the peak force was formed. The first fracture occurred at the lower border of the trigger and encircled the sample across the diameter. In the third and fourth steps, it is seen that the fibers were progressing by breaking after the sample was perforated regularly inward and outward. In particular, the final image of the sample is a type of fracture that is frequently encountered in the literature [28, 29] and is desired. Breaking in this way allows the sample to absorb the maximum amount of energy because of the absorption of the energy exposed by the occurrence of both delamination and fiber breaks.

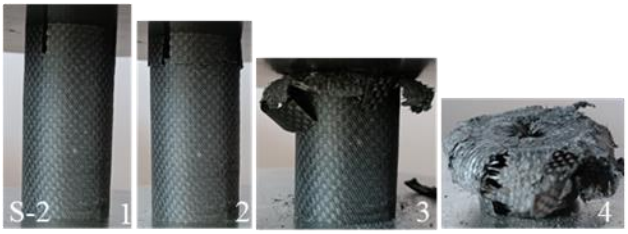


Figure 7. Damage of S-2 specimen during quasi-static compression

The third type of sample was the S-3 sample. The trigger type opened in the S-3 sample was a trigger in which holes with a diameter of 3 mm were drilled. Four symmetrical holes were drilled 10 mm below the upper limit of the sample in this sample. The contact force - displacement curve from the S-3 sample is presented in Figure 8. Accordingly, the maximum contact force that the S-3 sample responded to occurred after the first peak force. While the first peak force was 6.03 kN, the maximum contact force was 8.36 kN. Besides, the average force was determined as 5.70 kN. The amount of energy it absorbed was 198 joules. When compared with the first two samples, the S-3 sample showed a better performance than the S-1 sample without the trigger in terms of both maximum contact force and average force. However, it performed worse than the S-2 sample. As a matter of fact, while the S-3 sample absorbed 14.6% more energy than S-1, it absorbed 6% less energy than S-2. In composite systems, hole application is one of the most common mounting types during montage. According to the results we obtained, there was an improvement in performance compared to the reference sample, but a worse performance was observed compared to the S-2 type. For this reason, it will be more beneficial in terms of stress concentration to perform secondary operations like in S-2 during assembly.

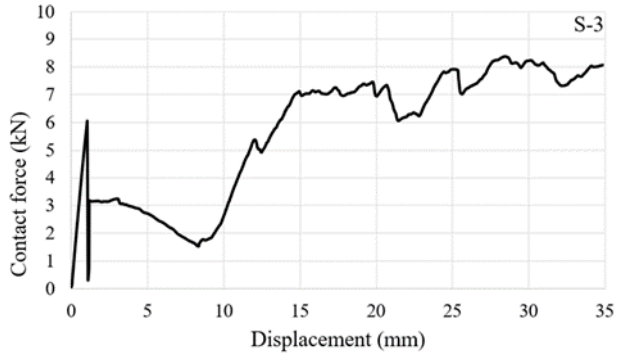


Figure 8. Contact force-displacement curve obtained from the quasi-static compression test of the S-3 sample

Damage images of the S-3 sample during the test phase are shown in Figure 9. Here, too, the first fracture started near the trigger, and then the shear force effectively advanced first on the upper side of the sample, and then the piles on the lower side were met. Thus, the contact force of this sample exceeded the first peak force after 15 mm. From this point on, the fibers progressed by being damaged by breakage and delamination like the previous samples.

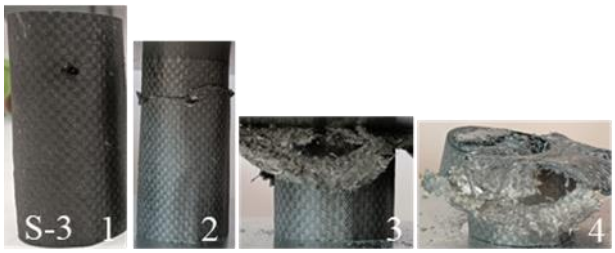


Figure 9. Damage of S-3 specimen during quasi-static compression

The final sample type was the S-4 sample. In this sample, the trigger was the horizontal cuts located 10 mm below the tip of the sample. The cuts were symmetrically positioned and there were four. The contact force - displacement curve consisting of the data of the S-4 sample is presented in Figure 10.

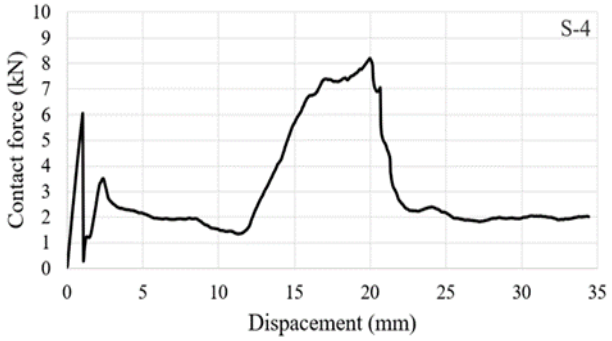


Figure 20. Contact force-displacement curve obtained from the quasi-static compression test of the S-4 sample

Accordingly, the first peak force of the S-4 sample was 6.03 kN, while the maximum contact force was 8.06 kN. The average contact force was 3.06 kN. The amount of energy absorbed by the S-4 sample was 107 joules. When these results were evaluated, it was determined that the absorbed energy decreased compared to the other three samples. The S-4 sample absorbed 96% less energy compared to the best performing S-2 sample. Based on this result, it can be concluded that the S-4 type trigger is in a geometry that negatively affects the crash box performance. In terms of energy absorption performance, ranking was S-2, S-3, S-1, S-4, from best to worst.

The fracture steps of the S-4 sample are given in Figure 11. Unlike the other samples, it is seen that the fiber breakage and delamination rate was low in S-4. Apart from this, after the first trigger point was broken, a second circular cut occurred, and these fractures progressed. Such a form of damage reduced the rate of fiber delamination. Therefore, the amount of energy absorbed also decreased.

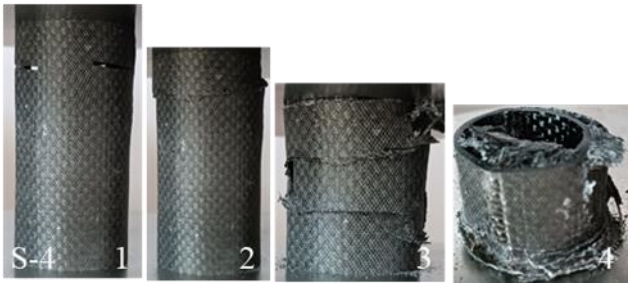


Figure 31. Damage of S-4 specimen during quasi-static compression

The amount of energy absorbed by all samples, the average contact forces and the first peak forces are presented in Table 1. In addition, the graphs obtained for these data are presented in Figure 12, Figure 13. When Figure 12 is examined, it is seen that the highest first peak force was in the S-1 sample. One purpose of triggering is to lower this peak force. Peak force decreased in all three triggered samples. In addition, it is desired to increase the average force in crash boxes. As seen in Figure 12, the average forces increased in the S-2 and S-3 samples.

Table 1. Some data from quasi-static tests for each crash box sample

Crash box samples	First peak force (kN)	Average force (kN)	Absorbed energy (joule)
S-1	9.48	5.06	169
S-2	8.43	6.18	210
S-3	6.03	5.70	198
S-4	6.04	3.06	107

The visual figure, where the amounts of absorbed energy are given together, is seen in Figure13. When Figure 13 is examined, it is seen that the energy absorbed in the triggered S-2 and S-3 samples increased and decreased in S-4. In summary, it can be determined that the triggered sample showing the best performance was S-2.

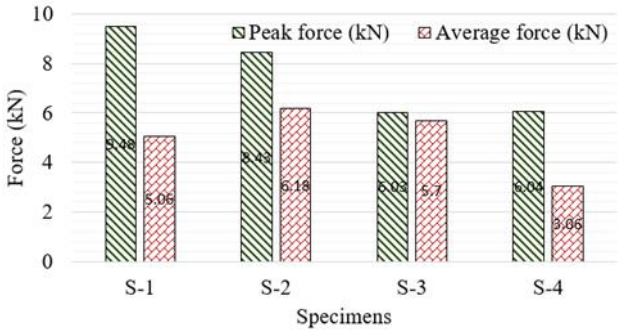


Figure 42. Comparison of first peak forces and average forces of composite crash boxes

According to the results obtained in a numerical study [19], when three types of triggers were opened on glass fiber reinforced polymer matrix composite and evaluated in terms of absorbed energy, it was revealed that the trigger had a positive effect on energy absorption. This result overlap with our results. In addition, one of the trigger types in the study was in the form of vertical slots, which we used in our study (S-2). It has been stated that this type of trigger increases energy absorption, similar to that in our study. Similarly, it is possible to come across many metal [30], polymer-based [31] numerical [32] or experimental [33] studies on the energy absorption performance of the trigger. In all of them, opening the trigger positively affected the energy absorption, similar to the results in our study.

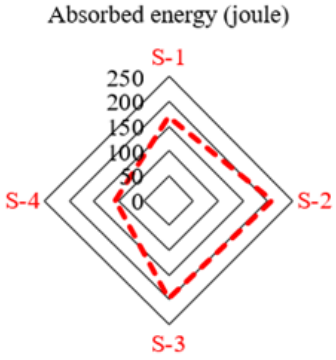


Figure 53. The relationship between composite crash boxes in terms of energy absorbed

4 Conclusion

This study is about increasing the performance of crash boxes. In this context, carbon fiber reinforced polymer matrix composites are good candidates when considering the need for lightness and high strength in vehicles. In this study, carbon fiber reinforced composites in the form of a cylindrical thin-walled structure as a crash box were produced by vacuum infusion method. It is known from the literature that the trigger effect improves performance in crash boxes. For this reason, three types of trigger geometries were created on the samples to reveal how they affect the absorption performance. In addition, one non-triggered reference sample was produced. Quasi-static compression tests were performed to determine the energy absorption and mechanical responses of all these samples, and the obtained

data was evaluated to compare the trigger profiles. According to the results, vertical slits type triggers (in S-2) and hole type triggers (in S-3) showed better performance in terms of energy absorption. The horizontal slits type triggers (in S-4) showed the worst performance. In addition, contact force - displacement curve behaviors and sample damage images were compared, and it was determined that they were compatible with each other. Additionally, the peak forces were reduced with the triggers opened and the maximum peak force decrease was seen in S-3 and S-4 samples.

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): %18

References

[1] W. Zhang and J. Xu, Advanced lightweight materials for Automobiles: A review. Materials and Design, 221, 110994, 2022. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110994

[2] A. Yunus Nasution, M. Rejab, Q. Ma, and M. Firmansyah, Design optimization of passenger SUV's crash box and bumper beam by using finite element method. Materials Science and Engineering, 1068, 2021. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1068/1/012023

[3] N. A. Z. Abdullah, M. S. M. Sani, M. S. Salwani, and N. A. Husain, A review on crashworthiness studies of crash box structure. Thin-Walled Structures, 153, 106795, 2020. https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106795

[4] F. Tarlochan, F. Samer, A. M. S. Hamouda, S. Ramesh, and K. Khalid, Design of thin wall structures for energy absorption applications: Enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces. Thin-Walled Structures, 71, 7–17, 2013. https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.04.003

[5] A. Reyes and T. Børvik, Quasi-static behaviour of crash components with steel skins and polymer foam cores. Materials Today Communications, 17, 541–553, 2018. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.09.015

[6] E. Kösedağ and D. İşler, Effect of section geometry and material type on energy absorption capabilities of crash boxes. Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 13(1), 1,2023. https://doi.org/10.7212/karaelmasfen.1150591

[7] Z. Tang, S. Liu, and Z. Zhang, Analysis of energy absorption characteristics of cylindrical multi-cell columns. Thin-Walled Structures, 62, 75–84, 2013. https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.05.019

[8] L. Peroni, M. Avalle, and G. Belingardi, Comparison of the energy absorption capability of crash boxes assembled by spot-weld and continuous joining techniques. International Journal of Impact Engineering, 36(3), 498–511, 2009. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.06.004

[9] A. B. Nellippallil, P. R. Berthelson, L. Peterson, and R. K. Prabhu, Chapter 10 - Robust concept exploration of driver's side vehicular impacts for human-centric crashworthiness. Multiscale Biomechanical Modeling of the Brain, R. Prabhu and M. Horstemeyer, Eds., Academic Press, 45, 153–176, 2022. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818144-7.00002-5

[10] Z. Wang, J. Liu, and S. Yao, On folding mechanics of multi-cell thin-walled square tubes. Composites Part B: Engineering, 132, 17–27, 2018. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.036

[11] N. Nasir Hussain, S. Prakash Regalla, and Y. V. Daseswara Rao, Low velocity impact characterization of glass fiber reinforced plastics for application of crash box. Materials Today: Proceedings, 4(2) 3252–3262, 2017. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.211

[12] H. Mohammadi et al., Lightweight glass fiber-reinforced polymer composite for automotive bumper applications: a review. Polymers, 15(1), 2023. https://doi.org/10.3390/polym15010193

[13] M. Zarei Mahmoudabadi and M. Sadighi, A study on the static and dynamic loading of the foam filled metal hexagonal honeycomb – Theoretical and experimental. Materials Science and Engineering: A, 530, 333–343, 2011. https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.09.093

[14] O. Mohammadiha and H. Ghariblu, Crush behavior optimization of multi-tubes filled by functionally graded foam. Thin-walled structures, 98, 627–639, 2016. https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.10.025

[15] H. S. Kim, New extruded multi-cell aluminum profile for maximum crash energy absorption and weight efficiency. Thin-walled structures, 40(4), 311–327, 2002. https://doi.org/10.1016/S0263-8231(01)00069-6

[16] E. Kösedağ and R. Ekici, Free vibration analysis of foam-core sandwich structures. Politeknik Dergisi, 24(1), 69-74, 2021. https://doi.org/10.2339/politeknik.571396

[17] E. Kosedag and R. Ekici, Low-velocity and ballistic impact resistances of particle reinforced metal–matrix composites: An experimental study. Journal of Composite Materials, 56(7), 991–1002, 2022. https://doi.org/10.1177/00219983211068101

[18] E. Kosedag, Effect of artificial aging on 3-point bending behavior of glass fiber/epoxy composites. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 42(21-22), 2022. https://doi.org/10.1177/07316844221146287

[19] N. N. Hussain, S. P. Regalla, and Y. V. D. Rao, Comparative study of trigger configuration for enhancement of crashworthiness of automobile crash box subjected to axial impact loading. Procedia Engineering, 173, 1390–1398, 2017. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.198

[20] A. Alavi Nia and J. Haddad Hamedani, Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries. Thin-Walled Structures, 48(12), 946–954, 2010. https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.07.003

[21] M. A. Khan and M. Phil, Energy absorption capacity-an overview ScienceDirect Topics. https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/energy-absorption-capacity (accessed Aug. 28, 2023).

[22] G. M. Nagel and D. P. Thambiratnam, Dynamic simulation and energy absorption of tapered thin-walled tubes under oblique impact loading. International Journal of Impact Engineering, 32(10), 1595–1620, 2006. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.01.002

[23] N. N. Hussain, S. P. Regalla, Y. V. D. Rao and A. M. Mohammed, An experimental and numerical analysis on influence of triggering for composite automotive crash boxes under compressive impact loads. International Journal of Crashworthiness, 27(4), 1152-1166, 2022. https://doi.org/10.1080/13588265.2021.1914953

[24] S. Palanivelu, W. V. Paepegem, J. Degrieck, D. Kakogiannis, J. V. Ackeren, D. V. Hemelrijck, J. Wastiels and J. Vantomme, Parametric study of crushing parameters and failure patterns of pultruded composite tubes using cohesive elements and seam, Part I: Central delamination and triggering modelling. Polymer Testing, 29(6), 729–741, 2010. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2010.05.010

[25] M. A. Jiménez, A. Miravete, E. Larrodé, and D. Revuelta, Effect of trigger geometry on energy absorption in composite profiles. Composite Structures, 48(1), 107–111, 2000. https://doi.org/10.1016/S0263-8223(99)00081-1

[26] M. S. Zahran, P. Xue, M. S. Esa, and M. M. Abdelwahab, A novel tailor-made technique for enhancing the crashworthiness by multi-stage tubular square tubes. Thin-Walled Structures, 122, 64–82, 2018. https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.09.031

[27] C. Zhou, S. Ming, C. Xia, B. Wang, X. Bi, P. Hao and M. Ren, The energy absorption of rectangular and slotted windowed tubes under axial crushing. International Journal of Mechanical Sciences, 141, 89–100, 2018. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.03.036

[28] H. Zarei, M. Kröger, and H. Albertsen, An experimental and numerical crashworthiness investigation of thermoplastic composite crash boxes. Composite Structures, 85(3), 245–257, 2008. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.10.028

[29] H. Böhm, J. Richter, J. Kim, G. Joo, H. Jang, M. Jeong, A. Hornig and M. Gude, Glass-fiber mat/PA6 composite tubes subjected to dynamic axial crush loading—Experimental evaluation and high fidelity modeling of failure phenomena. Composite Structures, 319, 117115, 2023. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117115

[30] M. Harhash, M. Kuhtz, J. Richter, A. Hornig, M. Gude and H. Palkowski, Trigger geometry influencing the failure modes in steel/polymer/steel sandwich crashboxes: Experimental and numerical evaluation. Composite Structures, 262, 113619, 2021. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113619

[31] S. Palanivelu, W. V. Paepegem, J. Degrieck, D. Kakogiannis, J. V. Ackeren, D. V. Hemelrijck, J. Wastiels and J. Vantomme, Comparative study of the quasi-static energy absorption of small-scale composite tubes with different geometrical shapes for use in sacrificial cladding structures. Polymer Testing, 29 (3), 381–396, 2010. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2010.01.003

[32] N. Bahramian and A. Khalkhali, Crashworthiness topology optimization of thin-walled square tubes, using modified bidirectional evolutionary structural optimization approach. Thin-Walled Structures, 147, 106524, 2020. https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106524

[33] S. Montazeri, M. Elyasi and A. Moradpour, Investigating the energy absorption, SEA and crushing performance of holed and grooved thin-walled tubes under axial loading with different materials. Thin-Walled Structures, 131, 646–653, 2018. https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.07.024

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 131-138

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Doğal yumurta kabuğu kullanılarak reaktif siyah 5 adsorpsiyonunun yapay sinir ağları ile modellenmesi

Modelling of reactive black 5 adsorption with artificial neural networks using natural eggshell

Özgül Çimen Mesutoğlu[1,*]

[1]*Aksaray Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray, Türkiye*

Öz

Bu çalışmada doğal bir materyal olan doğal yumurta kabuğu (DYK) kullanılarak adsorpsiyon prosesi ile Reaktif Siyah 5 (RS5) boyarmaddesinin sulu çözeltilerden giderimi ve modellenmesi amaçlanmıştır. Adsorpsiyon çalışması için pH, başlangıç boyarmadde konsantrasyonu, temas süresi, adsorban miktarı ve sıcaklık parametreleri araştırılmıştır. Adsorpsiyon deneyleri kesikli sistemle gerçekleştirilmiş olup, optimum şartlar altında (pH 6, 60 dk temas süresi, 1 g DYK, 25 °C, 150 rpm karıştırma hızı, 400 mg/L başlangıç RS5 konsantrasyonu) yapılan adsorpsiyon çalışmasında %99 giderim verimi elde edilmiştir. Ayrıca çalışmada izoterm ve kinetik modeller incelenmiştir. Langmuir adsorpsiyon izotermine ve yalancı ikinci dereceden kinetik modele uyumlu bir adsorpsiyon mekanizması olduğu görülmüştür. DYK'nın RB5'i maksimum adsorplama kapasitesi ise 56.2 mg/g olarak bulunmuştur. RS5 boyarmaddesinin gideriminde deneysel parametrelerin adsorpsiyona etkileri göz önüne alınarak Yapay Sinir Ağı (YSA) modeli geliştirilmiştir. YSA model analizinden %99'luk bir korelasyon ile çıktı parametresinin tahmin edilebildiği görülmüştür. Böylece DYK'nın sulardan RS5 uzaklaştırılmasında YSA'nın kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Adsorpsiyon, Modelleme, Reaktif siyah 5, YSA, Doğal yumurta kabuğu

Abstract

In this study, it was aimed to remove and model Reactive Black 5 (RB5) dyestuff from aqueous solutions by adsorption process using a natural material, natural eggshell (NES). For the adsorption study, pH, initial dyestuff concentration, contact time, adsorbent amount and temperature parameters were investigated. Adsorption experiments were carried out with batch system, and RB5 removal efficiency was obtained as 99 % in the adsorption study performed under optimum adsorption conditions (pH 6, 60 min contact time, 0.5 g DYK, 25 °C, 150 rpm stirring speed, 400 mg/g initial RB5 concentration). In addition, isotherm and kinetic investigations were also carried out in the study. It was found to have a mechanism compatible with the Langmuir adsorption isotherm and pseudo-second-order kinetic model. The maximum adsorption capacity of RB5 of NES was found to be 56.2 mg/g. Artificial Neural Network (ANN) model was developed considering the effects of experimental parameters on adsorption in the removal of RB5 dyestuff. It has been seen that the output parameter can be estimated with a 99% correlation from the ANN model analysis. Thus, it was concluded that ANN can be used to remove RB5 from NES from waters.

Keywords: Adsorption, ANN, Eggshell, Modelling, Reactive black 5

1 Giriş

Tekstil, boya, kozmetik, otomotiv ve kâğıt gibi endüstrilerde farklı türlerdeki azo boyalar (metilen mavisi, kongo kırmızısı, reaktif siyah, metil oranj, metil kırmızısı vb.) çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Azo boyalar, kromofor grubu olarak bir veya daha fazla N=N bağlı gruba sahiptir. Azo boyaların üretimi kolaydır, fakat bu boyaların parçalanması oldukça zordur. Sağlık üzerinde toksik etkileri mevcuttur [1]. Birçoğu kanserojen ve mutajenik olarak kabul edilir. Reaktif Siyah 5 (RB5), yapısında iki adet Ar-N=N-Ar bağı bulundurduğu için diazo boya kategorisine giren ve tekstil endüstrisinde en yaygın kullanılan boyalardan birisidir.

Kompleks kimyasal yapılarından dolayı biyolojik olarak ayrışması zor olan, sudaki çözünürlüğü yüksek, kanserojenik ve toksik olan azo boyalar, endüstriyel atıksuların arıtımında ciddi bir problem oluşturmaktadır [2]. Renkli sular alıcı ortama verildiğinde, canlı ortamı için renk veren maddelerin toksik olması sebebiyle tehlike oluşturmaktadır. Ayrıca renkli atıksular, alıcı ortamdaki suya ışığın girişini engelleyerek oksijen seviyesinin azalmasına ve ekolojik dengenin bozulmasına sebep olmaktadır.

Renkli atıksular genellikle, klasik arıtım sistemlerinden olan kimyasal koagülasyon, adsorpsiyon ve biyolojik oksidasyon ile arıtılmaktadır. Kimyasal koagülasyon, atıksularda renk giderimi sağlarken ek bir kimyasal yükü ve arıtım maliyeti oluşturmaktadır [3]. Biyolojik oksidasyon ise ucuz ve uygulaması kolay olmasına rağmen renk gideriminde yeterli verimi sağlayamamaktadır [4]. Adsorpsiyon yöntemi renk giderimi için kullanılan prosesler içerisinde işletme maliyeti en düşük ve işletilmesi en kolay olan proses olup, adsorpsiyon prosesi ile renk giderimi

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ozgulcimen@gmail.com (Ö. Çimen Mesutoğlu)
Geliş / Recieved: 21.05.2023 Kabul / Accepted: 07.11.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1300143

çalışmaları uzun yıllardır yoğun bir şekilde araştırılıp, geliştirilmektedir [5, 6]. Ancak, adsorpsiyon prosesinde adsorban maddenin maliyeti ve toksik olmaması önem teşkil etmektedir [7]. Son yıllarda adsorban maliyetini düşürmek için maliyeti düşük ve temini kolay olan doğal malzemeler ile yapılan çalışmalar dikkat çekmektedir. Adsorpsiyon yöntemi ile sulu çözeltilerden boyar madde giderimi ile ilgili pek çok çalışma bulunmaktadır. Yıllardır bu çalışmaların çoğu tarımsal, evsel ve endüstriyel kaynaklardan elde edilen malzemeler veya atıklar ile yapılmaktadır. Ucuz ve bulunabilir olması sebebiyle seçilen adsorbanlar arasında portakal kabuğu [8], pirina [9], pirinç kabuğu [10], uçucu kül [11], ceviz kabuğu [12], elma kabuğu [13] ve kestane kabuğu [14] kullanılabilmektedir.

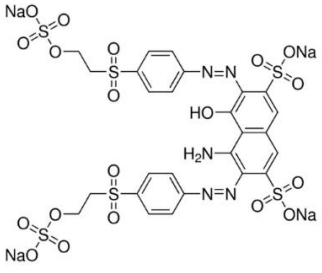
YSA, insan beynine özgü öğrenme ve keşfetme gibi becerilerle yeni bilgi üretme amacını otomatik olarak yerine getirmek için geliştirilmiş bilgisayar sistemleridir [15]. Geleneksel bilgisayar yöntemleriyle bu becerilere ulaşmak son derece zor veya imkansızdır. Bu nedenle YSA'nın, programlamanın imkânsız olduğu veya karmaşık olduğu durumlarda uyarlamalı veri işlemeye odaklanan bir bilgisayar bilimi dalı olduğu söylenebilir. YSA'nın kullanımı mühendislik, tıp, inşaat, ekonomi, sağlık, tekstil vb. gibi pek çok alanda başarı ile uygulanmaktadır [16]. YSA, hangi alanda olursa olsun tahmin ve teşhis etme, yorumlama, sınıflama ve tanıma konularında özellikle tercih edilmektedir.

Bu çalışma kapsamında, RS5 gideriminde adsorpsiyon kapasitesi yüksek, kolay ulaşılabilir ve maliyeti düşük olan DYK, kesikli adsorpsiyon deneylerinde kullanılmıştır. DYK, yüksek yüzey alanına, suda çözünmeyen liflere ve mekanik kararlılığa sahip olması nedeniyle birçok alanda adsorban olarak kullanılabilmektedir [17]. Çalışmada, temas süresi, adsorban miktarı, pH, sıcaklık ve başlangıç, boyar madde konsantrasyonunun etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, modelleme çalışması kapsamında tahmin modeli olarak bir YSA modeli geliştirilmiştir.

2 Materyal ve metot

2.1 Kimyasallar ve cihazlar

RS5, Aksaray'da bulunan bir tekstil firmasından temin edilmiştir. RS5 molekülünün kimyasal yapısı Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. RS5'in kimyasal yapısı [4]

RS5 stok çözeltisi (1000 mg/L), ultra saf su kullanılarak hazırlanmıştır. Boyar maddenin konsantrasyonu, 1 cm cam hücre ile 615 nm dalga boyundaki UV-Vis spektrofotometre (Shimadzu UV-1280) kullanılarak belirlenmiştir. Çözeltinin pH'ı, WTW pH330i marka bir pH metre kullanılarak ölçülmüştür. pH ayarı için kullanılan yüksek saflıktaki hidroklorik asit, sodyum hidroksit ve asetik asit, Sigma Aldrich (ABD) firmasından temin edilmiştir.

2.2 DYK'nın hazırlanması

DYK, doğal tavuk yumurtası kabuklarından elde edilmiştir. İlk olarak yumurta kabukları distile su ile birkaç kez yıkanmış ve ardından %5'lik asetik asit solüsyonunda bekletilmiştir. Distile su ile yıkandıktan sonra, etüvde 103-105ºC'de 24 saat kurutulmuştur. Ardından öğütücü kullanılarak 38-125 µm arasında parçalara ayrılmıştır.

2.3 Adsorpsiyon deneyleri

Adsorpsiyon çalışması, 250 mL hacmindeki erlen içerisinde, 100 mL çözelti hacminde ve 150 devir/dk çalkalama hızındaki bir ısıtıcılı çalkalayıcı (Nüve SL350) ile gerçekleştirilmiştir. RS5 giderimine temas süresinin etkisi çalışmasında, 1-240 dk aralığında farklı temas sürelerinde adsorpsiyon analizleri yapılmıştır. Adsorban miktarının RB5 giderimindeki etkisi incelendiğinde ise, 0.2-10 g/100 mL arasındaki DYK miktarında çalışılmıştır. pH'ın RB5 adsorpsiyonuna etkisi çalışmasında, 2-10 arasında pH değerleri ile deneyler yapılmıştır. RS5 boyar maddesinin konsantrasyonunun giderim verimine etkisini belirlemek amacıyla, 50-500 mg/L arasında 10 farklı başlangıç, boya konsantrasyonu ile adsorpsiyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Adsorpsiyon çalışmasında RS5 giderim verimine sıcaklığın etkisini araştırmak için de 20, 25, 30, 35 ve 40 ºC 'lerde analizler yapılmıştır. Adsorban miktarının, pH'ın, temas süresinin, sıcaklığın ve başlangıç boyar madde konsantrasyonunun etkisi çalışmalarında, çözeltilerden örnekler alındıktan sonra 4 dk boyunca 3000 devir/dk hızda santrifüj edildikten (Nüve CN180) sonra UV-Vis cihazında ölçümü yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen verilerden C_e (mg/L), q_e (mg/g) ve % giderim oranları Denklem (1) ve Denklem (2)'ye göre hesaplanmıştır.

$$\%\ Giderim = \frac{C_0 - C_e}{C_0} x100 \quad (1)$$

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e).V}{m} \quad (2)$$

% Giderim ve q_e formüllerinde; C_0 başlangıç RS5 konsantrasyonunu (mg/L), C_e denge anındaki RS5 konsantrasyonunu (mg/L), q_e adsorpsiyon kapasitesini (mg/g), m adsorban miktarını (g), V çözelti hacmini (L) göstermektedir.

2.4 Yapay sinir ağları ile modelleme çalışmaları

YSA modeli, MATLAB (R2022b) programı kullanılarak oluşturulmuştur. Sulu çözeltiden RS5 adsorpsiyonunda başlangıç RS5 konsantrasyonu, sıcaklık, pH, temas süresi ve adsorban miktarı gibi deneysel parametrelerin etkileri incelenerek YSA modeli geliştirilmiştir. Bu model ağının girdi ve çıktı parametreleri çalışmanın mevcut geometrisine uygun olarak oluşturulmuştur. RS5 adsorpsiyonu için geliştirilen YSA yapısının girdi katmanında 5 adet değişken

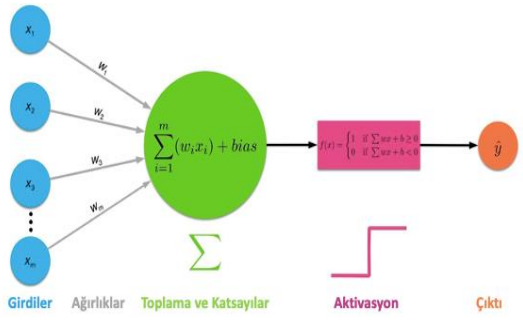
bulunmaktadır. Bunlar; adsorban miktarı, pH, sıcaklık, başlangıç RS5 konsantrasyonu ve temas süresidir. Çıktı katmanında ise tek bir hedef olan giderim verimi (%) bulunmaktadır.

Bu çalışmada, YSA modelinde 1 adet gizli katman kullanılmıştır. Bu gizli katmandaki nöron sayısı ise, 5-20 aralığında model çalıştırılarak hata performansları (MSE, Mean Square Error) karşılaştırılmıştır. Bu konu ile ilgili net bir kural olmadığından her model için kullanılacak olan nöron sayısı ağın mimarisine ve girdi-çıktı parametrelerinin yapısına bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle gizli katmandaki nöron sayısı deneme yanılma yöntemiyle seçilmiştir. Toplama fonksiyonu, ağdaki ilk adım olan tüm girdilerin ağırlıklı toplamını hesaplamak için kullanılmaktadır. YSA yapısındaki gizli katmanda aktivasyon fonksiyonu olarak sigmoid transfer fonksiyonu (tansig), tüm çıkış katmanı için ise lineer transfer fonksiyonu (purelin) kullanılmıştır. YSA yapısı, gerçek değer ve YSA çıktı değerinin arasındaki farkın minimize edilmesi ve R katsayısının maksimize edilmesi ile optimize edilir. Ağın eğitilmesinde yapılan ön çalışmalar ve literatür araştırması neticesinde Levenberg-Marquardt geri yayılım algoritması seçilmiştir. Mühendislik çalışmalarındaki ileri beslemeli ağlarda sıklıkla kullanılmakta olup, hızlı ve güvenilir sonuçlar vermektedir. Adsorpsiyondan elde edilen girdi ve çıktı verileri YSA yapısına normalizasyon uygulanarak tanıtılmıştır. Bunun sebebi, YSA ağ yapısında normalize değerler kullanılmasının YSA modelinin tahmin yeteneğini artırmasıdır. Normalizasyonda [18] kullanılan Denklem (3) şudur:

$$x_{norm} = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \tag{3}$$

Denklem (3)'teki x_{norm} normalleştirilmiş değer, x_i orijinal değer, x_{max} ve x_{min} sırasıyla maksimum ve minimum değerlerdir, normalleştirilmiş veriler 0 ile 1 aralığındadır.

YSA ağ yapısı Şekil 2'de gösterildiği gibidir. YSA hücresinde girdi, ara ve çıktı olmak üzere 3 ana katman bulunmaktadır. Girdi katmanı, bir YSA hücresine dışarıdan verilen bilgiyi, ağırlıklar; hücreye gelen bilginin hücre üzerine etkisini ve önemini, toplama fonksiyonu ve katsayılar; hücreye gelen girdi değerlerinin kendi ağırlıklarıyla çarpılarak toplandığı net girdi değerini vermektedir. Aktivasyon fonksiyonu; toplama fonksiyonundan gelen net bilgiyi kullanarak çıktı değerini hesaplayan fonksiyonu, çıktı ise; aktivasyon fonksiyonu ile belirlenen çıktı değerini ifade etmektedir.



Şekil 2. YSA ağ yapısı

2.5 *İzoterm ve kinetik çalışmalar*

Adsorpsiyon çalışmasında, adsorban ve kirleticinin etkileşimi hakkında bilgi elde etmek önemlidir, bu nedenle bir adsorbanın adsorpsiyon kapasitesi değerlendirilebilmektedir. Bu çalışmada deneysel veriler Langmuir, Freundlich, Temkin ve Dubinin-Raduskevich (D-R) izoterm modelleri ile değerlendirilmiştir. Langmuir adsorpsiyon izotermi, belirli sayıda özdeş bölge içeren bir yüzey üzerinde tek tabakalı adsorpsiyon olarak bir çözünenin çözeltiden adsorpsiyonu için geçerlidir. Model, birkaç temel varsayıma dayanmaktadır: (i) adsorpsiyon, adsorban içindeki belirli homojen bölgelerde gerçekleşir; (ii) bir boya molekülü tek bir yere bağlanır; (iii) adsorbanın kirletici için sınırlı bir kapasitesi vardır (dengede); (iv) tüm bölgeler aynı ve enerjisel olarak eşdeğerdedir. Langmuir izoterm modelinin doğrusal eşitliği Denklem (4)'teki gibi ifade edilebilir [19]:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{Q_m} + \frac{1}{K_L Q_m} \tag{4}$$

Burada C_e ve q_e sırasıyla RS5 boyasının dengede RS5 konsantrasyonu (mg/L) ve DYK üzerine adsorbe edilen RS5 miktarıdır (mg/g). Q_m tek bir tabakadaki (mg/g) maksimum adsorpsiyon kapasitesidir; K_L görünür soğurma enerjisi ile ilgili olan adsorpsiyon denge sabitidir (L/mg). Freundlich izoterm modeli [20] adsorpsiyonun çok tabakalı olarak gerçekleştiğini varsayar. Ayrıca, adsorplayıcı yüzeyinin, adsorpsiyon alanları ve enerjisi bakımından heterojen olduğunu kabul eder. Denklem (5) ile ifade edilir:

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \tag{5}$$

Bu eşitlikte q_e adsorbanın gram başına adsorpladığı boyar madde miktarını (mg/g) ve K_F ise Freundlich adsorpsiyon katsayısını temsil eder. Temkin izoterm modeli [21] ortamdaki moleküllerin adsorpsiyon ısısındaki azalıma, doğrusal bir düzende meydana gelir. Bu da bağlanma enerjisinin homojen olduğunu göstermektedir. Temkin izotermi aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir (Denklem 6):

$$q_e = \frac{RT}{b} \ln A_T + \frac{RT}{b} \ln C_e \tag{6}$$

Burada A_T maksimum bağlanma enerjisine karşılık denge bağlanma sabiti (L/mol) ve b Temkin sabitidir (kJ/mol). D-R izotermi [22] heterojen bir yüzey üzerindeki potansiyel değişim teorisine dayanır ve aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir (Denklem 7):

$$ln q_e = ln q_m - k_{ad} \varepsilon^2 \tag{7}$$

Burada, q_m (mg/g) ve k_{ad} (mol^2/kJ^2) D-R sabitleridir. ε ise Polanyi sabitidir.

RS5'in DYK üzerine adsorpsiyonunun mekanizmasının incelenmesi, adsorpsiyon hızının belirlenmesi ve adsorbanın maksimum adsorpsiyon kapasitelerinin hesaplanması amacıyla adsorpsiyon kinetikleri araştırılmıştır. Adsorpsiyon

kinetiğini incelemek için yaygın olarak kullanılan yalancı birinci dereceden (Denklem 8) [23] ve ikinci dereceden kinetik model (Denklem 9) [24] denklemleri çalışma verilerine uygulanmıştır.

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (8)$$

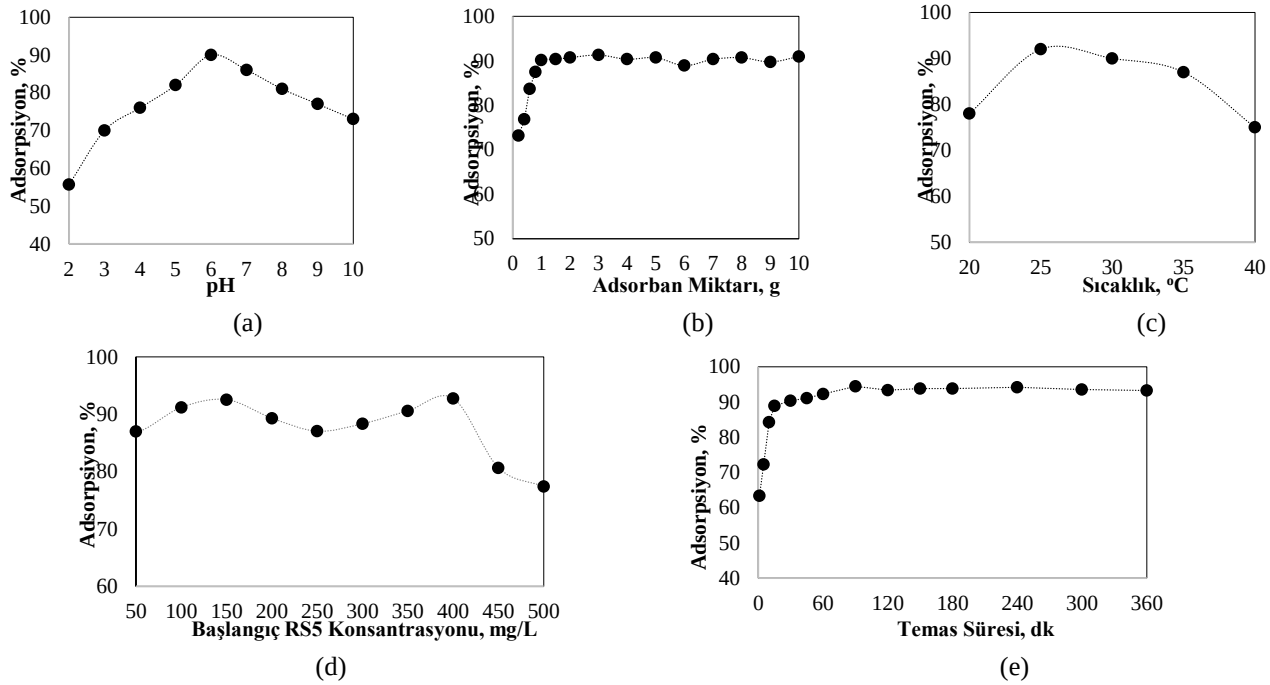
$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (9)$$

Denklemlerde t adsorpsiyon temas süresi (dk), q_t ise t anında adsorplanan madde miktarı (mg/g), k_1 birinci derece hız sabiti (g/mg.dk) ve k_2 ikinci derece hız sabitidir (g/mg.dk).

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Adsorpsiyon analizleri

Adsorpsiyon giderim mekanizması üzerinde pH kritik bir etkiye sahiptir. RS5 çözeltilerinin pH'ı 0.1 M NaOH ve 0.1 M HCl kullanılarak 2-10 arasında ayarlanmıştır. RS5 adsorpsiyonunun ortam pH'ına büyük ölçüde bağlı olduğu görülmüştür. DYK'nın adsorpsiyon kapasitesi, pH değerleri 2.0'den 10.0'a yükseldiğinde önce artmış, bazik koşullar içinde ise azalma göstermiştir (Şekil 3a). Asidik ve nötr koşullar altında, elektrostatik etkileşimler nedeniyle RS5'in DYK üzerine adsorpsiyonu uygun olmaktadır. Yüksek pH değerlerinde, DYK üzerindeki negatif yüklü grupların sayısı artmış olup, bu nedenle adsorban ve boya molekülleri arasında elektrostatik itme meydana gelmektedir. Ayrıca alkali bölgede RS5 iyonlarının adsorpsiyonu OH^- iyonları tarafından engellenebileceğinden, adsorpsiyonda azalma gözlenmiştir. RS5 adsorpsiyonuna DYK miktarının etkisi incelendiğinde elde edilen sonuçlar Şekil 3b'de verilmiştir. DYK miktarı 0.2-10 g arasında kullanıldığında, artan adsorban miktarı ile RS5 adsorpsiyonunun dengede kaldığı görülmektedir. DYK'nın artmasıyla adsorpsiyon veriminin sabit kalması, adsorban üzerinde bulunan RS5'i bağlamak için aktif olan gözenek yapısının azalması ile açıklanabilmektedir. Bu çalışmada, ortam sıcaklığı 20-40°C arasında ayarlanarak sıcaklığın RS5 adsorpsiyonuna etkisi araştırılmıştır. 60 dakika temas süresinde ve 150 rpm çalkalama hızında ortam sıcaklığının 25°C'de en iyi adsorpsiyon sonucunu verdiği görülmüştür. Sıcaklık arttıkça çözeltideki boya moleküllerinin Brownian hareketi arttığından, RS5 adsorpsiyonu azalmıştır. Deney sonuçları Şekil 3c'de verilmiştir. RS5 boyar maddesinin adsorpsiyon yüzdesi, sıcaklığın 25°C'den 40°C'ye çıkarılmasıyla azaldığından, bundan sonraki deneylerde sıcaklık 25°C olarak seçilmiştir. RS5'in başlangıç konsantrasyonu arttırıldığında adsorbe edilen boya miktarının arttığı görülmüştür. RS5 konsantrasyonu 400 mg/L'den sonra artırıldıkça sabit adsorban miktarındaki adsorpsiyonda düşüş görülmüştür (Şekil 3d). DYK'nın belli bir konsantrasyondan sonra dengeye ulaşması, gözenek yapısının kapasitesinin dolmasıyla ilişkilidir. Başlangıç RS5 konsantrasyonundaki artış, konsantrasyon gradyanının itici gücünde bir artışa neden olabileceği söylenebilir. RS5 ve adsorban olarak kullanılan DYK arasındaki temas süresi, adsorpsiyon yoluyla atık su arıtımında önemli bir role sahiptir. Şekil 3e'de görüldüğü gibi, deneyin ilk 15 dakikasında, adsorbanın çok sayıda erişilebilir gözenekli yapısından kaynaklanan adsorpsiyonda çok hızlı bir artış gözlenmiştir. Adsorpsiyonda 60. dakikadan sonra RS5 giderim veriminde önemli bir artış olmamış olup, adsorpsiyonun dengeye ulaştığı görülmüştür.



Şekil 3. RS5 adsorpsiyonuna; (a) pH'ın, (b) adsorban miktarının, (c) sıcaklığın, (d) başlangıç RS5 konsantrasyonunun ve (e) temas süresinin etkisi

Adsorpsiyon mekanizmasını tanımlamak için yapılan izoterm çalışması sonucunda elde edilmiş olan izoterm sabitleri, adsorpsiyon kapasiteleri ve korelasyon katsayıları Tablo 1'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 1. RS5 adsorpsiyonuna ait izoterm sabitleri

Langmuir İzotermi	Freundlich İzotermi	Temkin İzotermi	D-R İzotermi
Q_m = 54.95 mg/g	K_F = 7.323 mg/g	K_t = 17.05 L/g	q_m = 25.458 mg/g
K_L = 7.547 L/mg	n = 2.256	b = 3.751 J/mol	E = 0.201 kJ/mol
R^2 = 0.993	R^2 = 0.974	R^2 = 0.885	R^2 = 0.609

İzoterm çalışmasından elde edilen sonuçlara bakarsak, RS5 adsorpsiyonu 0.993'lük bir korelasyon katsayısı ile Langmuir izotermine daha çok uymaktadır. Langmuir izotermine daha iyi uyan bu adsorpsiyon mekanizmasının, DYK yüzeyinde RS5'in tek katmanlı yerleşimini oluşturan DYK adsorbanı içindeki homojen bölgelerde gerçekleştiğini göstermektedir. Yapılan literatür çalışmasında, Gemici ve Özden [14] kestane kabuğu ile kristal viyole boyar maddesinin adsorpsiyonunda, Şentürk ve Yılmaz [25] çam talaşı ile bazik sarı 28 gideriminde, Gürkan ve Çoruh [26] ise pirina, deniz kabuğu ve fıstık kabuğu ile boyar madde giderim çalışmasında adsorpsiyon prosesinin Langmuir izotermine uyum gösterdiğini belirtmişlerdir.

Yapılan kinetik çalışmalar sonucunda elde edilen kinetik sabitler, adsorplama kapasiteleri ve korelasyon katsayıları Tablo 2'de verilmiştir.

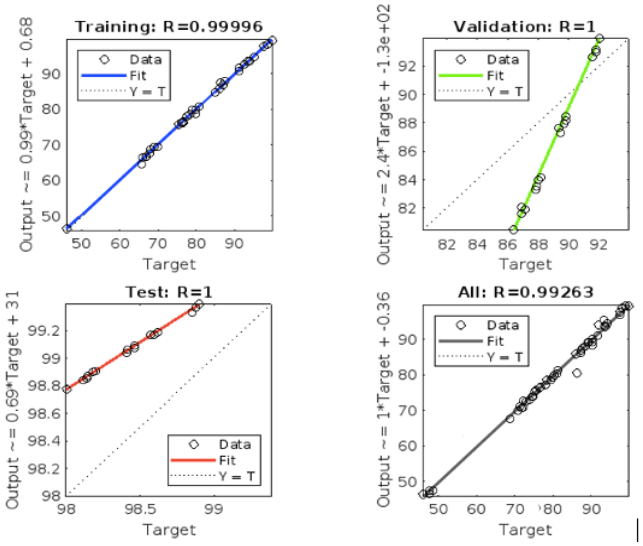
Tablo 2. RS5 adsorpsiyonuna ait izoterm sabitleri

Yalancı Birinci Dereceden Kinetik	Yalancı İkinci Dereceden Kinetik
q_e = 15.3 mg/g	q_e = 57.6 mg/g
k_1 = -0.03953 1/dk	k_2 = 0.00664 L/mg.dk
R^2 = 0.93	R^2 = 0.999

Yalancı ikinci dereceden adsorpsiyon modeli için korelasyon katsayısı (R^2) yüksek değere sahiptir (>0.99). DYK'nın hesaplanan denge adsorpsiyon kapasitesinin, 56.2 mg/g ile tutarlı olan 57.6 mg/g olduğu bulunmuştur. Yalancı ikinci dereceden kinetik model tarafından sağlanan sistem için en iyi korelasyona sahip olması, RS5'in DYK üzerine adsorpsiyonunun, dış yüzeyde soğurma ve adsorbanın içine difüzyonu içeren çok adımlı bir süreç olduğunu göstermektedir. Ayrıca, yalancı ikinci dereceden kinetik modelin mükemmel uyumu, DYK adsorbanı ile RS5 boya molekülleri arasında elektron alışverişi veya paylaşımı yoluyla valans kuvvetlerini içeren kimyasal sorpsiyonun hız kontrol adımı olduğunu ve önemli olabileceğini belirtmektedir [27-29]. Dinçer vd. [30] yumurta kabuğu ile azo boya giderimi yaptıkları çalışmalarında da adsorpsiyon prosesisin yalancı ikinci dereceden kinetik modele uyum sağladığını belirtmişlerdir. Ayrıca, Fil [31] Montmorillonit kili ile basic orange 2 gideriminde adsorpsiyon kinetiğinin yalancı ikinci dereceden kinetik model ile gerçekleştiğini rapor etmiştir.

3.2 DYK üzerinde RS5 adsorpsiyonunun ysa ile modellenmesi

DYK ile RS5 adsorpsiyonunda tek gizli katman kullanılmıştır. Gizli katmandaki nöron sayısı 5-20 aralığında uygulanmış olup, en iyi YSA ağının 15 nöronlu olduğu belirlenmiştir. Laboratuvar verilerinin %15'i test, %15'i validasyon ve %70'i eğitim için kullanılmıştır. Ağ öğrenmesi yapıldıktan sonra YSA modelinde ortalama karesel hata (OKH) 0.000035 olarak elde edilmekle birlikte, eğitim verisi için R değeri 0.999, validasyon verisi için 1 ve test verisi için 1 olduğu görülmektedir (Şekil 4). Oluşturulan YSA yapısında elde edilmiş olan bu yüksek korelasyon değerleri, adsorpsiyon mekanizmasının verilerinden oluşan girdi ve çıktı parametreleri arasındaki ilişkiyi en iyi şekilde tanımladığını göstermektedir.

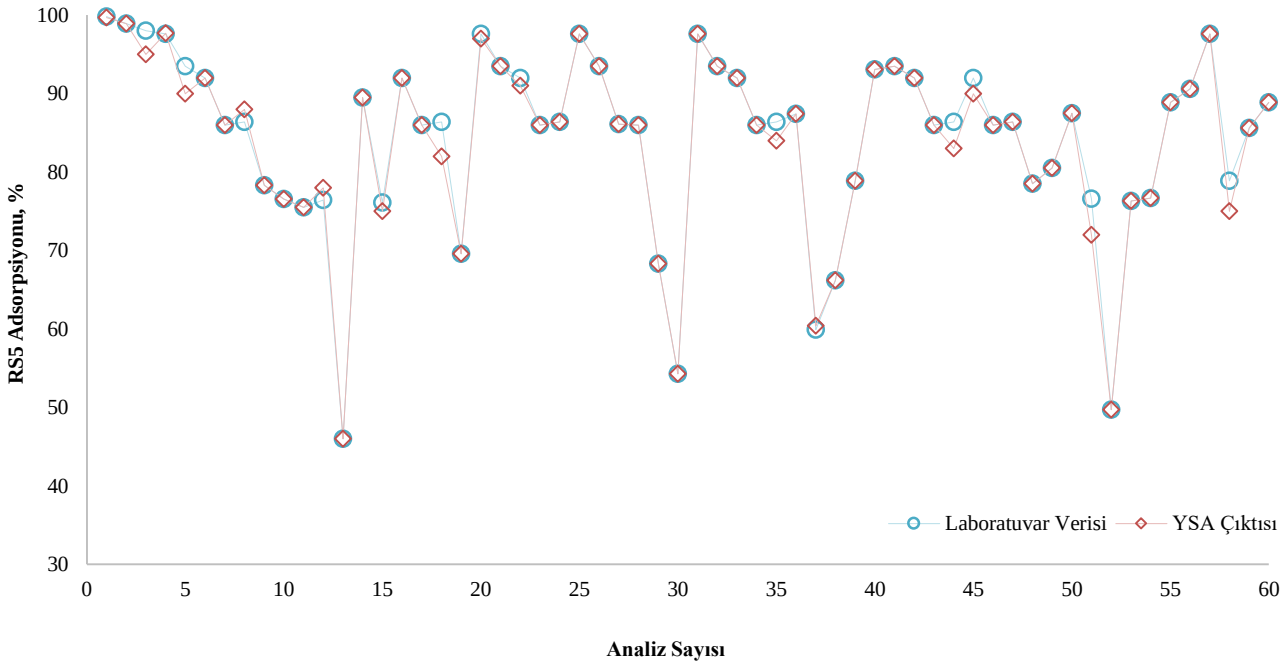


Şekil 4. DYK ile RS5 adsorpsiyonu için geliştirilen YSA modelinin eğitim, validasyon ve test verileri için regresyon analizi

YSA ağının RS5 adsorpsiyonun deneysel verilerine uygulanmasıyla elde dilen çıktı değerleri ile laboratuvar sonuçlarının arasındaki uyum Şekil 5'te verilmiştir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, Aksaray'da bulunan bir tekstil firmasından temin edilmiş olan RS5 boyar maddesinin DYK kullanılarak adsorpsiyon yöntemi ile arıtılması ve deneysel çalışmanın YSA ile modellenerek giderim veriminin tahmin edilmesi araştırılmıştır. Adsorpsiyon prosesinde pH (2-10), sıcaklık (20-40°C), RS5 başlangıç konsantrasyonu (50-500 mg/L), DYK miktarı (0.2-10 g) ve temas süresi (1-240 dk) üzerinde çalışılmıştır.



Şekil 5. DYK ile RS5 adsorpsiyonu için geliştirilen YSA modeli çıkış verileriyle laboratuvar verilerin karşılaştırılması

Adsorpsiyonun giderim verimi için optimum koşullar pH 6, sıcaklık 25ºC, DYK miktarı 1 g, RS5 başlangıç konsantrasyonu 400 mg/L ve temas süresi 60 dk'da gerçekleşmiştir. DYK'nın maksimum adsorplama kapasitesi q_e: 56.2 mg/g olarak hesaplanmıştır. İzoterm çalışmasında elde edilen sonuçlara göre uygulanan izoterm eşitlikleri arasında, adsorpsiyon mekanizmasının en iyi Langmuir izotermine uyum gösterdiği tespit edilmiştir. Langmuir izotermine göre tek tabakada ve homojen yapıda adsorpsiyon kapasitesi 54.95 mg/g olarak hesaplanmıştır. Adsorpsiyon kinetiğinin ise yalancı ikinci dereceden kinetik model ile temsil edildiği görülmüştür. DYK'nın RS5 adsorpsiyonunda kullanılabilir olduğu belirlenmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında modelleme çalışması yapılmıştır. YSA ile model oluşturularak deneysel çalışma sayısını azaltmak, RS5 için renk giderme verimliliğini etkileyen işlem koşulları gibi girdi parametrelerini optimize etmek ve çeşitli çalışma koşulları altında giderim verimliliğini tahmin etmek için kullanılmıştır. DYK ile RS5 adsorpsiyonunda oluşturulan YSA mimarisinde tek gizli katmandaki nöron sayısı 15 olarak bulunmuştur. Levenberg-Marquardt geri yayılım algoritması kullanılan ağ mimarisinde adsorpsiyon verilerinin % 15'i test, % 15'i validasyon ve %70'i eğitim için kullanılarak YSA oluşturulmuştur. Ortalama karesel hata 0.000035 ile çalışan ağda R değeri 0.999 ve 1 olarak bulunmuştur. YSA'ya verilen girdi ve çıktı parametreleri arasındaki karmaşık ilişkiyi açıklayan bir ağ yapısı oluşturulduğu, ağın çıktı verisi olan adsorpsiyonun giderim verimi için tutarlı tahminlerde bulunduğu görülmüştür. Bu sonuçlar ışığında adsorpsiyon mekanizmasında bulunabilirliği yüksek ve ucuz olan DYK'nın RS5 gideriminde oldukça etkili olduğu, YSA tahmin modelinin de bu çalışmayı daha kısa sürede ve daha az maddi kaynak ile yapılabileceğini ortaya koymaktadır.

Literatür incelendiğinde, adsorpsiyon prosesine uygulanan YSA tahmin modellerinde yüksek korelasyon katsayıları mevcuttur. Öztürk vd. [18] metilen mavisi adsorpsiyonunda deneysel parametrelerin etkileri için YSA modeli geliştirmiş olup, modelin atıksuda kullanılabileceği sonucuna varmışlardır. Erdem [32] S. cerevisiae ile remazol sarı giderim çalışmasında YSA ile sistemin %98'lik korelasyon katsayısı ile modellendiği ve modelin iyi bir tahmin yeteneğine sahip olduğunu görmüştür. Bingöl vd. [33] çörek otu ile Bakır biyosorpsiyonunda YSA tahmin modelinin başarılı bir şekilde kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Nasrullah vd. [34] ise mangosten kabuğu ile metilen mavisi adsorpsiyonunda tahmin modeli için YSA ağı oluşturmuşlardır. Ağ yapısında düşük karesel hata ve yüksek korelasyon katsayısı (0.997) kaydetmişlerdir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %14

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Kaynaklar

[1] O. Sözüdoğru, Ti/IrO2/RuO2 anot ve paslanmaz çelik katot kullanılarak elektrooksidasyon prosesi ile metilen mavisi boyası giderimi: işletme parametrelerin rolü. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12 (4), 2054-2063, 2022. https://doi.org/10.21597/jist.1167022.

[2] Y. Önal and T. Tantekin, Kinetic, equilibrium, thermodynamic studies and spectroscopic analysis of alizarin red s removal by mustard husk. DÜMF Mühendislik Dergisi, 9 (2), 837-847, 2018.

[3] E. Güneş Gürdal, Atık madeni yağlar ve yağlı atıksu arıtma yöntemlerine dair bir araştırma. Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, 10 (2), 73-84, 2021. https://doi.org/10.17100/nevbiltek.1005367.

[4] S. Eren, C. I. Reactive black 5 boyarmaddesinin fotokalitik renk giderimi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 23 (1), 139-152, 2018. https://doi.org/10.17482/uumfd.366155.

[5] R. K. Gautam, A. Mudhoo and M. C. Chattopadhyaya, Kinetic, equilibrium, thermodynamic studies and spectroscopic analysis of alizarin red s removal by mustard husk. Journal of Environmental Chemical Engineering, 1, 1283–1291, 2013. https://doi.org/10.28948/ngumuh.384840.

[6] T. Kopaç and E. Sulu, Comparison of the adsorption behavior of basic red 46 textile dye on various activated carbons obtained from zonguldak coal. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (3), 1227-1240, 2019. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.460518.

[7] D. İ. Çifçi, Alizarin kırmızı boyasının hidroksiapatit kullanılarak adsorpsiyon prosesi ile giderimi. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7 (1), 58-66, 2018. https://doi.org/10.28948/ngumuh.384840.

[8] A. Khaled, A. El Nemr, A. El Sikaily and O. Abdelwahab, Treatment of artificial textile dye effluent containing direct yellow 12 by orange peel carbon. Desalination, 238, 210–232, 2009. https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.02.014.

[9] O. Gök ve Ö. Çimen Mesutoğlu, Ağır metallerin giderimi için düşük maliyetli adsorban olarak pirina kullanımı. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (2), 507-516, 2017. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.322176.

[10] A. K. Priya, V. Yogeshwaran, Saravanan Rajendran, T. K. A. Hoang, M. Soto-Moscoso, A. A. Ghfar and C. Bathula, Investigation of mechanism of heavy metals (Cr6+, Pb2+, Zn2+) adsorption from aqueous medium using rice husk ash: Kinetic and thermodynamic approach. Chemosphere, 286, 131796, 2022. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.13 1796.

[11] Z. Eren ve F.N. Acar, Uçucu kül adsorpsiyonu ile reaktif boya giderimi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10 (2), 253-258, 2004.

[12] X. Pang, L. Sellaoui, D. Franco, G.L. Dotto, J. Georgin, A. Bajahzar, H. Belmabrouk, A. Ben Lamine, A. Bonilla-Petriciolet and Z. Li, Adsorption of crystal violet on biomasses from pecan nutshell, para chestnut husk, araucaria bark and palm cactus: Experimental study and theoretical modeling via monolayer and double layer statistical physics models. Chemical Engineering Journal, 378, 122101, 2019. https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122.101.

[13] C. Demir, H. Yıldız, A. R. Kul ve S. Keskin, Basic blue 41 boyar maddesinin elma kabuğundan elde edilen aktif karbon ile adsorplanabilirliğinin matematiksel olarak modellenmesi. Journal of Scientific Reports-C, 1, 55-69, 2020.

[14] B. T. Gemici ve A. Özden, Kestane kabuğu kullanılarak sulu çözeltilerden boyar madde gideriminin izoterm, kinetik ve termodinamik analizi. GUFBD/GUJS, 12 (4), 1158-1167, 2022. https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.983162.

[15] E. Baştürk and A. Alver, Modeling azo dye removal by sono-fenton processes using response surface methodology and artificial neural network approaches. Journal of Environmental Management, 248, 109300, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109300.

[16] M. Çörekçioğlu, E. Ercan ve S. Aras Elibüyük, Yapay sinir ağı yöntemlerinin tekstil sektöründe kullanım uygulamaları. Teknik Bilimleri Dergisi, 11 (2), 14-20, 2021. https://doi.org/10.35354/tbed.884531.

[17] A. Dinçer, M. Sevildik and T. Aydemir, Optimization, isotherm and kinetics studies of the adsorption of azo dyes on eggshell membrane. International Journal of Chemistry and Technology, 3 (1), 52-60, 2019. https://doi.org/10.32571/ijct.538736.

[18] N. Öztürk, H. B. Şentürk, A. Gündoğdu ve C. Duran, İçme suyu arıtma tesisi atık çamuru üzerine metilen mavisi adsorpsiyonu ve yapay sinir ağları ile modellenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 25 (2), 1083-1113, 2020. https://doi.org/10.17482/uumfd.674224.

[19] I. Langmuir, The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. Journal of the American Chemical Society, 40 (9), 1361–403, 1918. http://dx.doi.org/10.1021/ja02242a004.

[20] H. Freundlich, Over the adsorption in solution. The Journal of Physical Chemistry A, 57, 385–470, 1906. https://doi.org/10.12691/env-9-1-2.

[21] H. Silah ve Ü. D. Gül, Amberlyst a21 ile everzol black boyasının adsorpsiyonu: izoterm ve kinetik çalışmalar. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22 (3), 1063-1070, 2018. https://doi.org/10.16984/saufenbilder.357430.

[22] M. D. G. De Luna, E. D. Flores, D. A. D. Genuino, C. M. Futalan and M. W. Wan, Adsorption of eriochrome black t (ebt) dye using activated carbon prepared from waste rice hulls-optimization, isotherm and kinetic studies. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 44 (4), 646-653, 2013. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2013.01.010.

[23] B. Nandi, A. Goswami and M. Purkait, Removal of cationic dyes from aqueous solutions by kaolin: kinetic and equilibrium studies. Applied Clay Science, 42 (3–4), 583–90, 2009. https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.03.015.

[24] Y. S. Ho and G. McKay, Pseudo-second order model for sorption processes. Process Biochemistry, 34 (5), 451–65, 1999.

[25] İ. Şentürk ve M. R. Yıldız, Doğal ve aktive edilen çam talaşı ile sucul çözeltiden adsorpsiyonla bazik sarı 28 giderimi. NÖHÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9 (2), 746-759, 2020. https://doi.org/10.28948/ngumuh.662944.

[26] E. H. Gürkan ve S. Çoruh, Yeni Potansiyel Biosorbentlerle Kongo Kırmızısının Biosorpsiyon

Çalışmaları. Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10 (2), 203-212, 2017. https://doi.org/10.18185/erzifbed.265984.

[27] M. Al-Ghouti, M. A. M. Khraisheh, M. N. M. Ahmad and S. Allen, Thermodynamic behaviour and the effect of temperature on the removal of dyes from aqueous solution using modified diatomite: a kinetic study. Journal of Colloid Interface and Science, 287, 6–13, 2005. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.02.002.

[28] B. Hameed, A. Ahmed and K. Latiff, Adsorption of basic dye (methylene blue) onto activated carbon prepared from rattan sawdust. Dyes and Pigments, 75, 143–149, 2007. https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2006.05.039.

[29] X. Han, W. Wang and X. Ma, Adsorption characteristics of methylene blue onto low cost biomass material lotus leaf. Chemical Engineering Journal, 171, 1–8, 2011. https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.02.067.

[30] A. Dinçer, M. Sevildik and T. Aydemir, Optimization, isotherm and kinetics studies of the adsorption of azo dyes on eggshell membrane. International Journal of Chemistry and Technology, 3 (1), 52-60, 2019. http://dx.doi.org/10.32571/ijct.538736.

[31] B. A. Fil, Montmorillonit kili ile basic orange 2 boyar maddesinin adsorpsiyon kinetiği. BAUN Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 24 (2), 555-566, 2022. https://10.25092/baunfbed.1064819.

[32] F. Erdem, S. *cerevisiae* ile remazol sarı (rr) gideriminde yapay sinir ağı (ysa) yaklaşımı. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 24 (2), 289-298, 2019. https://doi.org/10.17482/uumfd.461122.

[33] D. Bingöl, E. Kılıç ve M. Hercan, Artificial neural network (ann) approach to copper biosorption process. SAÜ Fen Bilimleri Dergisi, 20 (3), 433-440, 2016. https://doi.org/10.16984/saufenbilder.25723.

[34] A. Nasrullah, A. H. Bhat, M. H. Isab, M. Danish, A. Naeem, N. Muhammad and T. Khan, Efficient removal of methylene blue dye using mangosteen peel waste: kinetics, isotherms and artificial neural network (ann) modeling, Desalination and Water Treatment, 86, 191-202, 2017. https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21295.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 139-148

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Kanalizasyon optimizasyonu için kısıt yönetimi mekanizmalarının karşılaştırılması

Comparison of constraint-handling mechanisms for sewer optimization

Mustafa Erkan Turan [1], Tülin Çetin [2,*], Mümin Emre Şenol [3]

[1,2] Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Manisa, Türkiye
[3] Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Manisa, Türkiye

Öz

Bu çalışmanın amacı kanalizasyon hidrolik tasarım optimizasyonu probleminde en uygun kısıt yönetimi mekanizmasını araştırmaktır. Bu amaçla problemin çözümünde daha önce kullanılmamış olan Karahindiba Optimizasyon Algoritması kullanılmıştır. Ele alınan problem kısıtlı optimizasyon problemi olduğundan, problemin çözümünde kısıt yönetimi mekanizmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışmada çeşitli kısıt yönetimi mekanizmalarının, algoritmanın performansı üzerindeki etkileri iki farklı boyuttaki kanalizasyon şebekesinde araştırılmıştır. Kullanılan kısıt yönetimi mekanizmaları statik ceza yöntemi, dinamik ceza yöntemi, olurlu çözümlerin üstünlüğü ile birleştirilmiş dinamik ceza yöntemi, üstel dinamik ceza yöntemi, olurlu çözümlerin üstünlüğü ile birleştirilmiş üstel dinamik ceza yöntemi, eklektik ceza yöntemi, uyarlanabilir ceza yöntemi ve ters tanjant yöntemidir. Performans ölçütü olarak çözüm kalitesi, çözüm süresi ve gelişme oranı ölçütleri kullanılmıştır. Ele alınan kısıt yönetimi mekanizmalarından en tutarlı sonuca sahip olan yöntem, uyarlanabilir ceza yöntemi olmuştur.

Anahtar kelimeler: Kanalizasyon optimizasyonu, Karahindiba optimizasyon yöntemi, Kısıtlı optimizasyon, Kısıt yönetimi mekanizmaları, Ceza yöntemi

Abstract

The aim of this study is to investigate the most appropriate constraint-handling mechanism in the sewer hydraulic design optimization problem. For this purpose, Dandelion Optimizer, which has not been used before to solve this problem, was used. Since the considered problem is a constrained optimization problem, constraint-handling mechanisms are required to solve this problem. In this study, the effects of various constraint-handling mechanisms on the performance of the algorithm were investigated in two different sized sewer networks. The constraint-handling mechanisms used are static penalty method, dynamic penalty method, dynamic penalty method with the superiority of feasible points, exponential dynamic penalty method, exponential dynamic penalty method with the superiority of feasible points, eclectic penalty method, adaptive penalty method and inverse tangent method. Solution quality, solution time and progress ratio were used as performance criteria. The most consistent result among the constraint-handling mechanisms discussed, was the adaptive penalty method.

Keywords: Sewer optimization, Dandelion optimizer, Constrained optimization, Constraint-Handling mechanisms, Penalty method

1 Giriş

Bir kanalizasyon şebekesinin ana bileşenleri borular ve muayene bacalarıdır. Bu bileşenlerin sayı, konum ve boyut değerleri şebekenin inşa edileceği yerleşim bölgesinin büyüklüğüne, imar planına, topoğrafyasına, nüfusuna ve tasarım kriterlerine göre projelendirme aşamasında belirlenmektedir. Kanalizasyon şebekelerinin işlevini yerine getirmesinin yanında en uygun maliyete de sahip olması amaçlanmaktadır. Böylece kanalizasyon optimizasyonu kavramı ortaya çıkmaktadır.

Kanalizasyon optimizasyonunda en uygun maliyeti elde edebilmek için proje mühendisi çoğunlukla kendi deneyimlerinden faydalanır ve deneme yanılma yöntemini kullanır. İzlenen bu yol, sonucun en uygun maliyete sahip olduğunu garanti etmemektedir. Dolayısıyla elde edilen sonuç kişiye bağlı olmaktadır. Günümüzde bu dezavantaj, en uygun maliyete sahip şebekeyi elde edebilmek için optimizasyon yöntemleri kullanılarak giderilmeye çalışılmaktadır.

Kanalizasyon sistemi tasarımı, şebeke planının belirlenmesi ve şebekenin hidrolik tasarımı olmak üzere iki farklı kısımdan oluşmaktadır. Şebeke planının belirlenmesi, muayene bacalarının, boruların, pompa istasyonlarının, arıtma tesisi ve diğer tesislerin konumunun dolayısıyla akış yönlerinin belirlenmesini içerir. Hidrolik tasarım ise boru çapları ile boru eğimlerinin belirlenmesidir.

Literatür incelendiğinde, kanalizasyon optimizasyonu hakkındaki çalışmalarda şebeke planının optimizasyonunun ve hidrolik tasarım optimizasyonunun ayrı ayrı veya birlikte ele alındığı görülmüştür. Ancak çoğunlukla hidrolik tasarım optimizasyonu hakkında çalışmalar [1-9] bulunmaktadır. Şebeke planının optimizasyonu hakkındaki çalışmalar [10-14] ise daha azdır. Bazı çalışmalarda ise şebeke planı

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: tulin.cetin@cbu.edu.tr (T. Çetin)
Geliş / Recieved: 23.06.2023 Kabul / Accepted: 09.11.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngmuh.1318989

optimizasyonu ve hidrolik tasarım optimizasyonu [15-18] birlikte yapılmaktadır.

Optimizasyon problemleri kısıt durumuna göre kısıtlı ve kısıtsız olarak iki gruba ayrılmaktadır. Kısıtsız optimizasyon problemlerinde karar değişkenlerinin alabileceği değerlerin bir sınırlaması yoktur. Öte yandan kısıtlı optimizasyon problemlerinde karar değişkenlerinin alabileceği değerler sınırlandırılmıştır. Optimizasyon problemlerinin çözümünde, problemin yapısına göre farklı çözüm yöntemleri kullanılmaktadır. Metasezgisel optimizasyon yöntemleri, bu çözüm yöntemlerinden biridir. Metasezgisel optimizasyon yöntemleri genellikle kısıtsız optimizasyon problemlerinin çözümüne yönelik geliştirilmektedirler. Bu nedenle metasezgisel optimizasyon yöntemlerine kısıtlı optimizasyon problemlerini çözme yeteneği kazandırmak için, farklı kısıt yönetimi mekanizmaları kullanılmaktadır.

Tan vd. [19] kanalizasyon optimizasyonu probleminin çözümünde statik ceza yöntemini, Çunkaş ve Ürkmez [20] dalgıç asenkron motorların tasarım optimizasyonu probleminin çözümünde eklektik ceza yöntemini, Garip vd. [21] kısıtlı sürekli optimizasyon problemleri için dinamik ceza yöntemini, Baykasoğlu ve Özsoydan [22] mekanik dizayn optimizasyon problemleri için ters tanjant yöntemini, Taşgetiren [23] oryantiring problemi için uyarlamalı ceza yöntemini, Iyengar ve Sigman [24] kayıp ağların kontrolü için üstel dinamik ceza fonksiyonu yöntemini, Gölcük [25] mühendislik tasarım problemlerinin çözümü için olurlu çözümlerin üstünlüğü ile birleştirilmiş dinamik ceza yöntemini ve olurlu çözümlerin üstünlüğü ile birleştirilmiş üstel dinamik ceza yöntemini kullanmıştır.

Literatürde farklı problemler için kısıt yönetimi mekanizmalarının çözüme etkisinin araştırıldığı çalışmalar [25-27] bulunmakla beraber, kanalizasyon hidrolik tasarım optimizasyonu problemi konusunda bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada kanalizasyon hidrolik tasarım optimizasyonu problemi, literatüre yeni kazandırılmış ve bu problemin çözümünde daha önce kullanılmamış bir metasezgisel optimizasyon algoritması olan Karahindiba Optimizasyon Algoritmasıyla (KOA) çözülmüştür. Kanalizasyon optimizasyon probleminin kısıtlarını ele almak için kısıt yönetimi mekanizmaları kullanılmıştır. Kullanılan kısıt yönetimi mekanizmaları sırasıyla, statik ceza yöntemi, dinamik ceza yöntemi, olurlu çözümlerin üstünlüğü ile birleştirilmiş dinamik ceza yöntemi, üstel dinamik ceza yöntemi, olurlu çözümlerin üstünlüğü ile birleştirilmiş üstel dinamik ceza yöntemi, eklektik ceza yöntemi, uyarlanabilir ceza yöntemi ve ters tanjant yöntemidir.

Yapılan çalışmanın amacı, farklı kısıt yönetimi mekanizmalarının kanalizasyon hidrolik tasarım optimizasyonu probleminin çözüm performansına etkisini araştırmaktır. Bu sebeple KOA ile iki farklı boyuttaki kanalizasyon şebekesi, farklı kısıt yönetimi mekanizmaları ile çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar, çözüm kalitesi, çözüm süresi ve gelişme oranı ölçütleri ile değerlendirilmiştir.

2 Materyal ve metot

2.1 Kanalizasyon şebekesi hidrolik tasarım optimizasyonu

Tamamen serbest yüzeyli akışa sahip bir kanalizasyon şebekesinin maliyetinin ana bileşenleri boru, muayene bacası ve kazı maliyetleridir. Kanalizasyon şebekesinin hidrolik tasarım optimizasyonu probleminde amaç, en düşük maliyete sahip şebekeyi elde etmektir. Problemin amaç fonksiyonu Denklem 1'de gösterildiği gibi tanımlanabilir [14]:

$$\min C = \sum_{i=1}^{N} L_i \, C_{p_i} + \sum_{j=1}^{M} C_{m_i} \tag{1}$$

Burada C kanalizasyon şebekesinin maliyetini, N toplam boru sayısını, L_i boru uzunluğunu, C_{p_i} kanalizasyon borusu inşa birim maliyetini, M toplam baca sayısını, C_{m_i} muayene bacası inşa maliyetini ifade etmektedir. C_{p_i} değeri, boru çapına (d_i), C_{m_i} ise muayene bacası derinliğine (h_{m_i}) bağlı olarak değişmektedir.

Kanalizasyon şebekelerinin projelendirilmesi sırasında diğer mühendislik projelerinde olduğu gibi uyulması gereken kurallar ve sağlanması gereken şartlar bulunmaktadır. Bu durum optimizasyon probleminde kısıtlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Kanalizasyon şebekelerinin hidrolik tasarım optimizasyonu problemi için bu çalışmada dikkate alınan kısıtlar, Denklem 2-10 arasında verilmiştir:

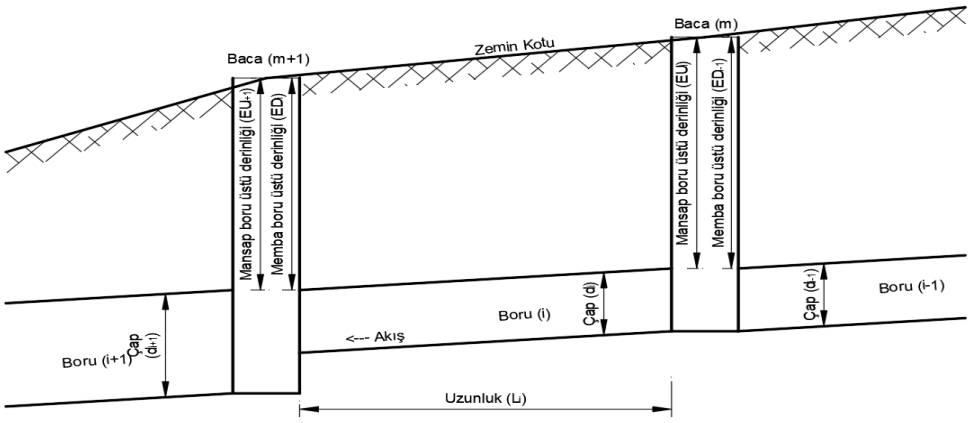
$$d_i \in D, (\forall_i = 1, \dots, N) \tag{2}$$
$$d_i \geq D', (\forall_i = 1, \dots, N) \tag{3}$$
$$V_i \geq V_{min}, (\forall_i = 1, \dots, N) \tag{4}$$
$$V_i \leq V_{max}, (\forall_i = 1, \dots, N) \tag{5}$$
$$\beta_i \geq \beta_{min}, (\forall_i = 1, \dots, N) \tag{6}$$
$$\beta_i \leq \beta_{max}, (\forall_i = 1, \dots, N) \tag{7}$$
$$S_i \geq S_{min}, (\forall_i = 1, \dots, N) \tag{8}$$
$$E_i \geq E_{min}, (\forall_i = 1, \dots, N, \forall_i = 1, \dots, M) \tag{9}$$
$$E_i \leq E_{max}, (\forall_i = 1, \dots, N, \forall_i = 1, \dots, M) \tag{10}$$

Burada D ticari boru çaplarını, D' memba boru çapını, V_i i'inci borudaki akım hızını, V_{min} izin verilen minimum akım hızını, V_{max} izin verilen maksimum akımı hızını, β_i i'inci borudaki doluluk oranını, β_{min} izin verilen minimum doluluk oranını, β_{max} izin verilen maksimum doluluk oranını, S_i i'inci borunun eğimini, S_{min} izin verilen minimum boru eğimini, E_i i'inci boru üstü derinliğini, E_{min} izin verilen minimum boru üstü derinliğini, E_{max} izin verilen maksimum boru üstü derinliğini ifade etmektedir.

Hidrolik hesaplamalarda Denklem 11'de verilen Manning denklemi kullanılmıştır:

$$Q_i = \frac{1}{n} A_i R_i^{2/3} S_i^{1/2}, (\forall_i = 1, \dots, N) \tag{11}$$

Burada Q_i i'inci borudaki debiyi, n Manning katsayısını, A_i i'inci borudaki ıslak alanı, R_i i'inci borudaki hidrolik yarıçapı ifade etmektedir.



Şekil 1. Şebeke profili

Bahsedilen ifadeler Şekil 1'de şebeke profili üzerinde gösterilmiştir.

2.2 *Karahindiba optimizasyon algoritması (Dandelion optimizer) (KOA)*

Karahindiba optimizasyon algoritması Zhao vd. [28] tarafından 2022 yılında geliştirilmiş sürü zekâsı optimizasyon algoritmasıdır. Önerilen algoritma, karahindiba bitkisine ait tohumların rüzgârla uzun mesafe taşınması sürecinin üç aşamada matematiksel olarak modellenmesi ile geliştirilmiştir. Bu üç aşama yükselme, alçalma ve iniş olarak adlandırılmaktadır.

Başlangıçta karahindiba tohumları olarak ifade edilen ve popülasyonu oluşturan olası çözümler rastgele olarak Denklem 12 yardımı ile üretilirler. Her tohum popülasyondaki bir bireye ve dolayısıyla bir olası çözüme karşılık gelir [28].

$$x_{ij} = x_j^{min} + rand * \left(x_j^{max} - x_j^{min}\right) \quad (12)$$

Burada x_{ij} i'inci bireyin j'inci boyutu, x_j^{min} ve x_j^{max} sırasıyla j'inci boyutun en küçük ve en büyük sınır değerine karşılık gelir. Başlangıç aşamasında en iyi uygunluk değeri Denklem 13 ile ifade edilmektedir. Denklem 14 ile ifade edilen en iyi uygunluk değerine sahip birey ise başlangıç elit bireyi olarak adlandırılır. Bu birey karahindiba tohumunun gelişmesi için yaklaşık en iyi konum olarak kabul edilir [28].

$$f_{best} = min\left(f(X_i)\right) \quad (13)$$

$$X_{elite} = X\left(find\left(f_{best} == f(X_i)\right)\right) \quad (14)$$

2.2.1 *Yükselme aşaması*

Bu aşamada karahindiba tohumları, üzerlerinde oluşan vorteks ile hava durumundan bağımsız olarak yükselir. Hava yağmurlu olduğunda ise vorteks oluşmaz ve arama yerel olur. Yükselme belirli bir değere ulaştıktan sonra tohumlar ebeveynlerinden uzaklaşabilir. Yükselme miktarı hava şartlarına (rüzgâr hızı, nem vb.) bağlıdır. Hava durumu iki şekilde ifade edilmiştir.

Birinci durum: Havanın açık olduğu bir günde rüzgâr hızının log-normal dağılıma uyduğu kabul edilebilir. Bu kabul ile üretilen rastgele sayılar Y ekseninde daha fazla yayılmış olur, böylece tohumların daha uzağa gitme şansı artar. Bu durum karahindiba optimizasyon algoritmasının keşif aşamasıdır. Tohumların yükseleceği yükseklik rüzgâr hızı ile orantılıdır. Rüzgârdan etkilenen vorteksler tohumların spiral şeklinde yükselmesini sağlar. Bu durum Denklem 15 ile ifade edilmiştir:

$$X_{t+1} = X_t + \alpha * v_x * v_y * lnY * (X_s - X_t) \quad (15)$$

Burada X_t tohumun t'inci iterasyondaki konumunu, X_s t'inci iterasyonda arama uzayında rastgele seçilen konumu, $lnY \sim N(\mu, \sigma^2)$ ise log-normal dağılımı ifade etmektedir. X_s Denklem 16 ile elde edilir:

$$X_s = rand(1, Dim) * \left(x_j^{max} - x_j^{min}\right) + x_j^{min} \quad (16)$$

Denklem 17 ile hesaplanan α değeri, arama adım uzunluğunu ayarlayan uyarlanabilir bir parametredir.

$$\alpha = rand * \left(\frac{1}{T^2}t^2 - \frac{2}{T}t + 1\right) \quad (17)$$

v_x ve v_y karahindiba kaldırma katsayısı bileşenlerine karşılık gelir ve Denklem 18-20 ile hesaplanırlar:

$$r = \frac{1}{e^{\theta}} \quad (18)$$

$$v_x = r * \cos\theta \quad (19)$$

$$v_y = r * \sin\theta \quad (20)$$

Burada θ $-\pi$ ile π arasında değerler alan rastgele bir sayıdır.

İkinci durum: Bu durum yağışlı bir günü ifade etmektedir. Hava şartlarından dolayı tohumlar yeterince yükselmezler ve uzaklara uçamazlar. İkinci durum Denklem 21 ile modellenmiştir:

$$X_{t+1} = X_t * k \quad (21)$$

Burada *k* karahindibanın yerel arama alanını düzenlemek için kullanılan bir sayı olup Denklem 22-23 ile elde edilir:

$$k = 1 - rand * q \quad (22)$$

$$q = \frac{1}{T^2-2T+1}t^2 - \frac{2}{T^2-2T+1}t + 1 + \frac{1}{T^2-2T+1} \quad (23)$$

Yükselme aşamasındaki karahindiba tohumlarının davranışının matematiksel modeli Denklem 24 ile verilmiştir:

$$X_{t+1} = \begin{cases} X_t + \alpha * v_x * v_y * lnY * (X_s - X_t) & randn < 1.5 \\ X_t * k & diğer \end{cases} \quad (24)$$

Burada *randn* standart normal dağılıma göre üretilen rastgele bir sayıdır [28].

2.2.2 *Alçalma aşaması*

Alçalma aşamasında, daha önce havalanan tohumlar uzayda yönlerini devamlı düzenleyerek istikrarlı bir şekilde alçalırlar. Hareket yörüngesi, Brown hareketi ile simüle edilir. Bu aşama keşif aşamasına karşılık gelir. Keşif aşaması Denklem 25 ile matematiksel olarak modellenmiştir:

$$X_{t+1} = X_t - \alpha * \beta_t * \left(X_{mean\_t} - \alpha * \beta_t * X_t\right) \quad (25)$$

Burada β_t Brown hareketini belirten normal dağılıma uyan rastgele bir sayıdır. X_{mean_t} *i*'inci iterasyondaki popülasyon ortalama konumu olup Denklem 26 ile hesaplanır. Ortalama konum bilgisi kullanılarak popülasyonun gelişimi kolaylaştırılmış olur.

$$X_{mean\_t} = \frac{1}{pop}\sum_{i=1}^{pop} X_i \quad (26)$$

Burada *pop* popülasyon büyüklüğüdür [28].

2.2.3 *İniş aşaması*

Bu aşamada, alçalan tohumlar büyümek için rastgele konumlara inerler. Bu hareket Denklem 27 ile ifade edilmiştir:

$$X_{t+1} = X_{elite} - levy(\lambda) * \alpha * (X_{elite} - X_t * \delta) \quad (27)$$

Burada X_{elite} *i*'inci iterasyondaki en iyi çözümü, $levy(\lambda)$ Levy uçuşunu, ifade eder. Levy uçuşu Denklem 28 ile verilmiştir:

$$Levy(\lambda) = s \times \frac{\omega \times \sigma}{|t|^{\frac{1}{\beta}}} \quad (28)$$

Burada β 0 ile 2 arasında rastgele bir sayıya, s değeri 0. 001 olan sabit bir sayıya, ω ve *t* 0 ile 1 arasında rastgele sayıya karşılık gelir. σ ise Denklem 29 ile hesaplanmaktadır:

$$\sigma = \left(\frac{\Gamma(1+\beta) \times \sin\left(\frac{\pi\beta}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1+\beta}{2}\right) \times \beta \times 2^{\left(\frac{\beta-1}{2}\right)}}\right) \quad (29)$$

Burada β değeri 1. 5 olan sabit bir sayıdır. δ ise Denklem 30'da verildiği gibi 0'dan 2'ye doğrusal artan bir fonksiyondur.

$$\delta = \frac{2t}{T} \quad (30)$$

Karahindiba algoritmasının akış şeması Algoritma 1'de verilmiştir [28].

Algoritma 1. Karahindiba algoritması [28]

Girdi: Birey sayısı *pop*, maksimum iterasyon sayısı *T*, karar değişkeni sayısı *Dim*
Çıktı: En iyi karahindiba tohumu X_{best}, ve bu tohuma ait uygunluk değeri
1.Karahindiba tohumlarının başlangıç değerlerini ata *X*
2.Tüm karahindiba tohumlarının uygunluk değerlerini f hesapla
3.Uygunluk değerlerine göre en iyi karahindiba tohumunu X_{elite} seç
4. **while (t<T) do**
/*Yükselme Aşaması*/
5. **if** *randn<1.5* **do**
6. Denklem (17) ile uyarlanabilir parametreleri oluştur
7. Denklem (15) karahindiba tohumlarını güncelle
8. **else if do**
9. Denklem (22-23) ile uyarlanabilir parametreleri oluştur
10. Denklem (21) karahindiba tohumlarını güncelle
11. **end if**
/*Alçalma Aşaması*/
12. Denklem (25) karahindiba tohumlarını güncelle
/*İniş Aşaması*/
13. Denklem (27) karahindiba tohumlarını güncelle
14. Karahindiba tohumlarını uygunluk değerlerine göre iyiden kötüye doğru sırala
15. X_{elite} güncelle
16. **if** $f(X_{elite}) < f(X_{best})$
17. X_{best}=X_{elite}, $f_{best} = f(X_{elite})$
18. **end if**
19. **end while**
20.**Return** X_{best} ve f_{best}

2.3 *Kısıt-yönetimi mekanizmaları*

Kısıtlı bir optimizasyon problemi Denklem 31-33 gibi ifade edilebilir:

$$\min f(x) \quad (31)$$

$$g_i(x) \leq 0, i = 1, \ldots, m \quad (32)$$

$$h_j(x) = 0, j = 1, \ldots, p \quad (33)$$

Burada $f(x)$ maliyet fonksiyonunu, $g_i(x)$ eşitsizlik kısıtlarını, $h_j(x)$ eşitlik kısıtlarını, *m* eşitsizlik kısıt sayısını, *p* eşitlik kısıt sayısını, *x* çözüm vektörünü ifade etmektedir.

Denklem 34~~,~~ kısıtların tümünü sağlayan *x* kümesini, yani uygun çözüm kümesini ifade etmektedir. Denklem 35 ise kısıtlardan en az bir veya birden fazlasını sağlamayan *x* kümesi~~ni~~, başka bir deyişle uygun olmayan çözüm kümesidir.

$$\mathcal{F} = \left\{x: g_i(x) \leq 0 \wedge h_j(x) = 0, \forall i, j\right\} \quad (34)$$

$$\mathcal{F} = \{x: x \notin \mathcal{F}\} \quad (35)$$

Optimizasyon yöntemlerinde ceza fonksiyonu yaklaşımı, bireyin maliyet fonksiyonunun bireyin kısıt ihlali ölçüsüne göre değiştirilmesidir. Bu durum Denklem 36-37'deki gibi ifade edilebilir:

$$\min \emptyset(x) = f(x) + \sum_{i=1}^{m+p} r_i G_i(x) \quad (36)$$

$$G_i(x) = \begin{cases} [\max(0, g_i(x))]^{\beta}, & \forall i \in [1, m] \\ [\max(0, |h_i(x)| - \varepsilon)]^{\beta}, & \forall i \in [m+1, m+p] \end{cases} \quad (37)$$

Burada $\emptyset(x)$ ceza terimi eklenmiş amaç fonksiyonudur [29].

2.3.1 Statik ceza yöntemi (SC)

Statik ceza yönteminde kısıt aşımına uygulanan ceza, iterasyona bağlı olmayan sabit bir değer olup Denklem 38-39'da verildiği gibi hesaplanır:

$$\min \emptyset(x) = f(x) + \sum_{i=1}^{m+p} r_i G_i(x) \quad (38)$$

$$r_i = \begin{cases} R_{i1}, & G_i(x) \epsilon (0, T_i] \\ R_{i2}, & G_i(x) \epsilon (T_{i1}, T_{i2}] \\ \vdots & \vdots \\ R_{iq}, & G_i(x) \epsilon (T_{i,q-1}, \infty] \end{cases} \quad (39)$$

Burada r_i ceza miktarını, $G_i(x)$ ise kısıt ihlal miktarını göstermektedir [29].

2.3.2 Dinamik ceza yöntemi (DC)

Bu yöntemde, kısıt ihlalinde uygulanan ceza miktarı iterasyon ilerledikçe arttığından dinamik ceza yöntemi adını almıştır. Dinamik ceza yönteminin hesaplanması Denklem 40-41'de verilmiştir:

$$\min \emptyset(x) = f(x) + (ct)^{\alpha} M(x) \quad (40)$$

$$M(x) = \sum_{i=1}^{m+p} G_i(x) \quad (41)$$

Burada c ve α ceza katsayılarını, t ilgili iterasyon adımını, $M(x)$ toplam kısıt ihlal miktarını göstermektedir [29].

2.3.3 Olurlu çözümlerin üstünlüğü ile birleştirilmiş dinamik ceza yöntemi (BDC)

Dinamik ceza yöntemindeki bir diğer seçenekte, dinamik ceza yöntemini olurlu çözümlerin üstünlüğü yöntemiyle birleştirmektir. Bu yöntem dinamik ceza yöntemine ek olarak, kısıt ihlali yapan çözümlere $\theta(x)$ fonksiyonuyla hesaplanan ek bir ceza uygulanmasıdır. Bu yöntemde kullanılan $\theta(x)$ fonksiyonu, tüm olurlu çözümlerin olurlu olmayan çözümlere göre daha iyi bir uygunluk değerine sahip olmalarını sağlar. BDC yönteminin hesaplanması Denklem 42-44'te verildiği gibidir [29]:

$$\emptyset(x) = \begin{cases} f(x), & x \in \mathcal{F} \\ f(x) + (ct)^{\alpha} M(x) + \theta(x), & x \notin \mathcal{F} \end{cases} \quad (42)$$

$$M(x) = \sum_{i=1}^{m+p} G_i(x) \quad (43)$$

$$\theta(x) = \quad (44)$$

$$\begin{cases} 0, & x \in \mathcal{F} \\ \max[0, max_{y \in \mathcal{F}} f(y) - min_{y \notin \mathcal{F}} \emptyset(y), & x \notin \mathcal{F} \end{cases}$$

2.3.4 Üstel dinamik ceza yöntemi (ÜDC)

Üstel dinamik ceza yönteminde, dinamik ceza yönteminde olduğu gibi ceza miktarı iterasyonla artmaktadır. T değeri, iterasyon sayısı sonsuza yaklaştıkça olurlu çözüm sağlamayan bireylerin uygunluk değerlerinin de sonsuza yakınsamasını sağlar. ÜDC yönteminin hesaplanması Denklem 45-46'da verilmiştir:

$$\min \emptyset(x) = f(x) e^{(M(x)/T)} \quad (45)$$

$$\mathrm{T} = 1/\sqrt{t} \quad (46)$$

Burada $M(x)$ toplam kısıt ihlal miktarını göstermektedir [29].

2.3.5 Olurlu çözümlerin üstünlüğü ile birleştirilmiş üstel dinamik ceza yöntemi (BÜDC)

Bu yöntemde üstel dinamik ceza yöntemi ile olurlu çözümlerin üstünlüğü yöntemi birleştirilmiştir. Üstel dinamik ceza yöntemine ek olarak kısıt ihlali yapan çözümlere $\theta(x)$ fonksiyonuyla hesaplanan ek bir ceza uygulanmaktadır. Bu yöntemde kullanılan $\theta(x)$ fonksiyonu, tüm olurlu çözümlerin olurlu olmayan çözümlere göre daha iyi bir uygunluk değerine sahip olmalarını sağlar. BÜDC yönteminin hesaplanması Denklem 47-48'de gösterilmiştir [29]:

$$\emptyset(x) = \begin{cases} f(x), & x \in \mathcal{F} \\ f(x) e^{(M(x)/T)} + \theta(x), & x \notin \mathcal{F} \end{cases} \quad (47)$$

$$\theta(x) = \begin{cases} 0, & x \in \mathcal{F} \\ \max[0, max_{y \in \mathcal{F}} f(y) - min_{y \notin \mathcal{F}} \emptyset(y), & x \notin \mathcal{F} \end{cases} \quad (48)$$

2.3.6 Eklektik ceza yöntemi (EC)

Eklektik Ceza yöntemi olurlu çözümlerin üstünlüğünü sağlamak için Denklem 49'da verildiği üzere başka bir yaklaşım önerir:

$$\emptyset(x) = \begin{cases} f(x), & x \in \mathcal{F} \\ K\left(1 - \frac{s(x)}{m+p}\right), & x \notin \mathcal{F} \end{cases} \quad (49)$$

Burada K olurlu çözümlerin uygunluk değerinin olurlu olmayan çözümlerin uygunluk değerinden iyi olmasını sağlayan bir katsayıyı, $s(x)$ sağlanan kısıt sayısını, $m+p$ ise toplam kısıt sayısını göstermektedir [29].

2.3.7 Uyarlanabilir ceza yöntemi (UC)

Uyarlanabilir ceza yönteminde ceza üç farklı duruma göre Denklem 50'de verildiği şekli ile hesaplanmaktadır:

$$r_i(t+1) = \begin{cases} \frac{r_i(t)}{\beta_1}, & Durum\ 1 \\ \beta_2 r_i(t), & Durum\ 2 \\ r_i(t), & diğer \end{cases} \quad (50)$$

Burada *Durum 1* geçmiş *k* iterasyonun her birinde en iyi bireyin olurlu olduğu, *Durum 2* geçmiş *k* iterasyonun hiçbirinde olurlu birey olmadığı, *diğer* ise bu iki durum dışındaki durumları ifade etmektedir. Genellikle $r_i(1)$=1, β_1=4, β_2=3 alınırken, *k* değeri problem boyutuna eşit olarak alınır [29].

2.3.8 *Ters tanjant yöntemi (TT)*

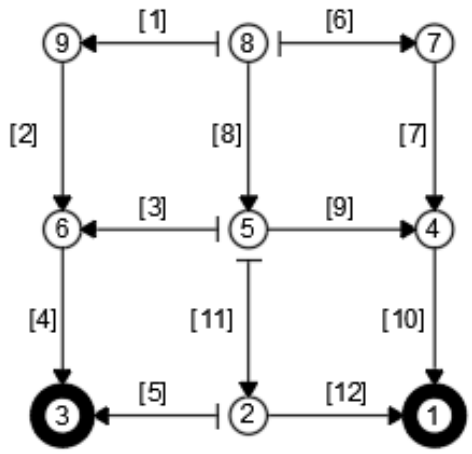
İterasyondaki bireylerin kısıtları ihlal etmesi durumunda, ihlal edilen kısıtların en büyük değeri ($g_{max}(\vec{x})$) uygunluk değeri olarak belirlenir. Öte yandan ihlal edilen kısıt bulunmaması durumunda ise, uygunluk değeri amaç fonksiyonunun ters tanjant değeri olarak alınır. Ters tanjant yönteminde uygunluk değeri Denklem 51'de verildiği gibi hesaplanır:

$$f(\vec{x}) = \begin{cases} \hat{g}(\vec{x}) = g_{max}(\vec{x}), & g_{max}(\vec{x}) > 0 \\ \hat{f}(\vec{x}) = atan[f(\vec{x})] - \pi/2, & \text{diğer} \end{cases} \quad (51)$$

Burada $atan[.]$ ters tanjant fonksiyonunu ifade etmektedir [30].

2.4 *Uygulama*

Çalışma için, literatürde bulunan iki farklı büyüklükteki şebeke seçilmiştir. Birinci şebeke, ilk olarak Moeini ve Afshar [31] tarafından önerilen ve daha sonraki çalışmalarda farklı planlara sahip olarak çalışılmış bir şebekedir. Bu çalışmada Şekil 2'de gösterildiği gibi, şebekenin Moeini ve Afshar [32] tarafından önerilen hali kullanılmaktadır.



Şekil 2. Birinci şebeke [32]

Bu şebekede 9 baca ve her birinin uzunluğu 100 m, olan 12 hat bulunmaktadır. Başlangıç bacası 8'in zemin kotu 1000 m,'dir. Diğer bacaların zemin kotları, akış yönünde %2 azalacak şekilde hesaplanmaktadır. Şebekede çözüm için V_{min}=0.75 m/s, V_{max}=6 m/s, β_{min}=0.1, β_{max}=0.83, E_{min}=2.5 m, E_{max}=10 m, S_{min}=0.0005, n=0.013, D (mm)=[100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 660, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 950, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500] olarak alınmıştır. Şebeke için maliyet fonksiyonu Denklem 52 ve 53'te verilmektedir [32]:

$$K_p = 10.93e^{3.43d_i} + 0.012\bar{E}_i^{1.53} + 0.437\bar{E}_i^{1.47}d_i \quad (52)$$

$$K_m = 41.46h_{m_i} \quad (53)$$

Burada *i* dikkate alınan boruyu, K_p kanalizasyon borusu inşa birim maliyetini, d_i boru çapını, $\bar{E}_i$ ortalama boru üstü derinliğini, K_m baca inşa maliyetini, h_{m_i} baca derinliğini ifade etmektedir.

Çalışmada kullanılan ikinci şebeke, ilk olarak Mansouri ve Khanjani [33] tarafından önerilen ve Şekil 3'te verilen Kerman Şehrine ait şebekedir. Bu şebekede 21 baca ve 20 hat bulunmaktadır. Şebekede çözüm için V_{min}=0.3 m/s, V_{max}=3 m/s, β_{min}=0.1, β_{max}=0.82, E_{min}=2.45 m, n=0.013, D (mm)=[150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600, 700] olarak alınmıştır [33]. Hassan vd.'nin [34] çalışmasında belirtildiği gibi bu şebeke ile yapılan bazı çalışmalarda kazı derinliği olarak boru altı derinliği dikkate alınırken, bazı çalışmalarda ise boru üstü derinliği dikkate alınmıştır. Bu durum çalışmalarda maliyet değerlerinin farklı olarak elde edilmesine neden olmaktadır. Bu çalışmada ise, kazı derinliği olarak boru üstü derinliği dikkate alınmıştır. Şebeke için maliyet fonksiyonu Denklem 54 ve 55'te verilmektedir [33]:

$$K_p = 1.93e^{3.43d_i} + 0.812\bar{E}_i^{1.53} + 0.437\bar{E}_i^{1.47}d_i \quad (54)$$

$$K_m = 41.46h_{m_i} \quad (55)$$

Denklem 52-53 ve 54-55'te verilen boru ve baca inşa maliyet değerlerinin toplamı, Denklem 56'da verilen toplam şebeke maliyetini K_T ifade etmektedir:

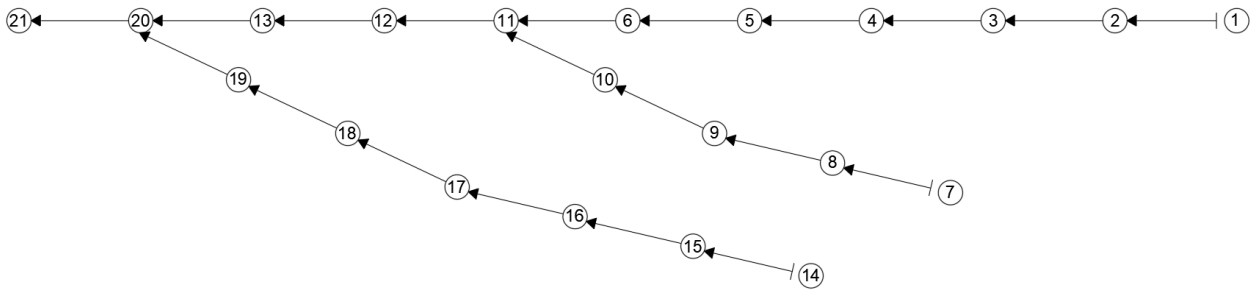
$$K_T = K_p + K_m \quad (56)$$

Çalışmada kullanılan karar değişkenleri, boru çapları ve her borunun memba ve mansabındaki boru üstü derinlikleridir. Birinci şebekede 12 hat, her hat için 3 değişken olmak üzere toplam 36 karar değişkeni, ikinci şebekede ise 20 hat, her hat için 3 değişken olmak üzere 60 karar değişkeni bulunmaktadır.

Çalışmada kullanılan KOA'nın birey sayısı ve iterasyon sayısı olmak üzere 2 parametresi bulunmaktadır. Birey sayısı birinci şebeke için 50, ikinci şebeke için 100 olarak alınmıştır. İterasyon sayısı ise her iki şebeke içinde 40000 olarak belirlenmiştir. Sonuçları istatistiksel açıdan değerlendirebilmek amacıyla her bir farklı kısıt mekanizması için 30 bağımsız koşum yapılmıştır. Her bir koşum için başlangıç popülasyonunun kısıtları sağlamasına dikkat edilmiştir. Bir başka deyişle başlangıç popülasyonu olurlu çözümlerden meydana gelmektedir.

3 Bulgular ve tartışma

Kısıt yönetimi mekanizmalarının çözüm kalitesi ve süresi üzerindeki etkisini ölçmek için KOA, her iki şebekede de her bir kısıt yönetimi mekanizması için 30 defa koşturulmuştur. Bu 30 koşumda elde edilen sonuçların en iyi, ortalama, en kötü değerleri ve standart sapma değerleri kaydedilmiştir. Bu veriler Tablo 1'de özetlenmiştir.



Şekil 3. İkinci şebeke [33]

Tablo 1. İstatistiksel sonuçlar

Şebeke	Performans Ölçütü	Kısıt Yönetimi Mekanizmaları							
		SC	DC	BDC	ÜDC	BÜDC	EC	UC	TT
Şebeke 1	En iyi	**23001.66**	23001.98	23233.03	23001.87	23004.12	23006.31	23035.61	23233.03
	Ortalama	23504.13	23521.28	23502.72	23432	23372.76	23512.24	**23343.09**	23420.13
	En Kötü	24602.52	24846.31	24498.32	24524.03	24614.8	24565.08	24013.99	24996.72
	Standart Sapma	415.07	486.72	356.94	355.43	332.83	373.41	**189.99**	339.65
Şebeke 2	En iyi	82897.51	82384.18	**82324.29**	82712.34	82580.93	82638.90	83263.91	82603.49
	Ortalama	87646.46	87027.18	88551.82	88294.21	87372.69	86964.09	**85678.31**	86485.10
	En Kötü	102362.39	97716.64	109007.33	104903.72	102510.57	100317.88	91288.97	97896.73
	Standart Sapma	4246.38	2813.12	5439.35	5022.66	4086.42	3656.28	**2116.35**	3663.77

Tablo 1'den de görüldüğü gibi şebeke 1 için uygunluk fonksiyonu değerinin en iyi sonuç olduğu kısıt yönetimi mekanizması, statik ceza (SC) yöntemidir. Öte yandan, uygunluk değerleri ortalama ve standart sapma performans ölçütleri açısından değerlendirildiğinde ise uyarlamalı ceza (UC) yönteminin diğer mekanizmalara göre daha iyi sonuca sahip olduğu görülmüştür.

Tablo 1'e göre şebeke 2 için sonuçlar değerlendirildiğinde en iyi sonuca olurlu çözümlerin üstünlüğüyle birleştirilmiş dinamik ceza (BDC) yöntemi sahiptir. Bunun yanında, uyarlanmış ceza (UC) yöntemi şebeke 1'de olduğu gibi şebeke 2'de de ortalama ve standart sapma ölçütlerine göre en iyi sonuca sahiptir.

Kısıt yönetimi mekanizmalarını ortalama performans değerlerine göre karşılaştırmak için Friedman Testi uygulanmıştır. Friedman testi sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Sonuçlara göre en başarılı mekanizma uyarlamalı ceza (UC) yöntemi olurken, ters tanjant (TT) yöntemi ikinci sırada yer almıştır.

Tablo 2. Friedman test sonuçları

Kısıt Yönetimi Mekanizması	Friedman Test Ortalaması (Sıralama)
SC	4.68 (5)
DC	4.62 (4)
BDC	5.07 (8)
ÜDC	4.77 (7)
BÜDC	4.30 (3)
EC	4.68 (5)
UC	3.75 (1)
TT	4.13 (2)

Sonuçlar ayrıca gelişim oranı (progress ratio) açısından da değerlendirilmiştir. Gelişim oranı hesaplamadaki amaç, algoritmanın arama uzayının uygulanabilir bölgesi içindeki iyileştirme kabiliyetini ölçmektir. Bu ölçüm için yüksek değerler tercih edilir, çünkü bunlar daha yüksek bir gelişmeyi gösterirler. Gelişim oranı Denklem 57 ile hesaplanır:

$$\text{Gelişim oranı} = \begin{cases} \left| ln \sqrt{\frac{f(X_{ilk})}{f(X_{eniyi})}} \right| & eğer, f(X_{eniyi}) > 0 \\ \left| ln \sqrt{\frac{f(X_{ilk})+1}{f(X_{eniyi})+1}} \right| & eğer, f(X_{eniyi}) = 0 \\ \left| ln \sqrt{\frac{f(X_{ilk})+2|f(X_{eniyi})|}{f(X_{eniyi})+2|f(X_{eniyi})|}} \right| & eğer, f(X_{eniyi}) < 0 \end{cases} \quad (57)$$

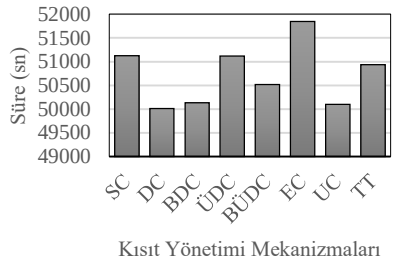
Kısıt yönetimi mekanizmalarına ait gelişim oranı değerleri Tablo 3'te verilmiştir. Gelişim oranına göre en iyi mekanizma eklektik ceza (EC) yöntemi olurken, ters tanjant (TT) yöntemi ikinci sırada yer almıştır.

Tablo 3. Gelişim oranı katsayısı test sonuçları

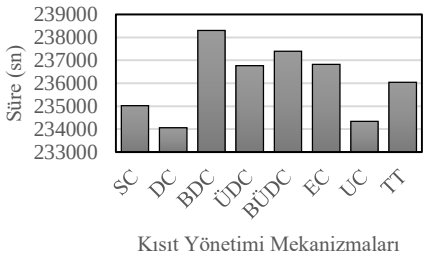
Kısıt Yönetimi Mekanizması	Gelişim Oranı
SC	0.4405 (5)
DC	0.4352 (8)
BDC	0.4364 (7)
ÜDC	0.4405 (5)
BÜDC	0.4417 (3)
EC	0.4474 (1)
UC	0.4416 (4)
TT	0.4446 (2)

Her kısıt yönetimi mekanizması çalışma süreleri açısından karşılaştırılmıştır. Her bir mekanizma için çalışma

süresi, 30 koşumun sürelerinin ortalamasıdır. Çalışma sürelerinin çubuk grafikleri Şekil 4 ve 5'te verilmiştir. Çalışma süreleri açısından mekanizmalar arasında çok fark olmamasına rağmen, uyarlamalı ceza (UC) yöntemi ve dinamik ceza (DC) yöntemi en kısa çalışma süresine sahiptir.



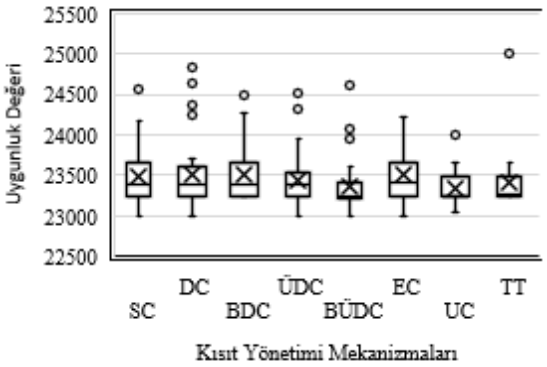
Şekil 4. Şebeke 1 için çalışma süreleri



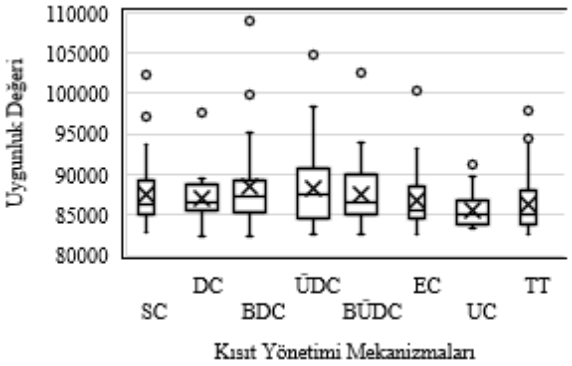
Şekil 5. Şebeke 2 için çalışma süreleri

Son olarak, kısıt yönetimi mekanizmalarına ait sonuçlar iki şebeke için ayrı ayrı kutu grafikler olarak şebeke 1 için Şekil 6'da, şebeke 2 için Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 6'ya göre olurlu çözümlerin üstünlüğü ile birleştirilmiş dinamik ceza (BDC) yöntemi en az yayılıma sahip kutu grafiğine sahiptir. Bunun yanında uyarlamalı ceza (UC) yöntemine ait medyan değeri diğer mekanizmalardan küçüktür. Bu da uyarlamalı ceza (UC) yönteminin en başarılı mekanizma olduğunu göstermektedir.

Şekil 7'ye göre en az yayılıma sahip kutu grafiğine sahip mekanizma uyarlamalı ceza (UC) yöntemidir. Bunun yanında uyarlamalı ceza (UC) yöntemine ait medyan değeri diğer mekanizmalardan küçüktür.



Şekil 6. Şebeke 1 kutu grafiği



Şekil 7. Şebeke 2 kutu grafiği

4 Sonuçlar

Bu çalışmada statik ceza yöntemi, dinamik ceza yöntemi, olurlu çözümlerin üstünlüğü ile birleştirilmiş dinamik ceza yöntemi, üstel dinamik ceza yöntemi, olurlu çözümlerin üstünlüğü ile birleştirilmiş üstel dinamik ceza yöntemi, eklektik ceza yöntemi, uyarlanabilir ceza yöntemi ve ters tanjant yöntemleri kullanılarak kısıt yönetimi mekanizmalarının kanalizasyon şebekesi hidrolik tasarım optimizasyonu probleminin çözümünde performansa etkisi araştırılmıştır. Değerlendirme için iki farklı boyutta kanalizasyon şebekesi kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Performans ölçütü olarak çözüm kalitesi, çözüm süresi ve gelişme oranı ölçütleri kullanılmıştır.

Karahindiba Optimizasyon Algoritması seçilerek bu problemin çözümü için literatürde ilk defa kullanılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre her ne kadar birinci şebekede en iyi sonucu statik ceza yöntemi, ikinci şebekede ise en iyi sonucu olurlu çözümlerin üstünlüğü ile birleştirilmiş dinamik ceza yöntemi vermiş olsa da sonuçlar ortalama ve standart sapmaya göre değerlendirildiğinde uyarlamalı ceza yönteminin her iki şebekede de en uygun sonuca sahip olduğu görülmüştür. Metasezgisel algoritmalar yapıları gereği zaman zaman iyi sonuçlar verse de önemli olan nokta, tutarlı sonuçlara sahip olmalarıdır. Sonuçlar bu açıdan değerlendirildiğinde uyarlamalı ceza yönteminin diğer kısıt yönetimi mekanizmalarının önünde olduğu görülmektedir. Sonuçlar gelişim oranı açısından değerlendirildiğinde, eklektik ceza yönteminin gelişim oranı en fazla olan mekanizma olduğu anlaşılmaktadır. Sonuçlar çalışma süresi açısından değerlendirildiğinde ise dinamik ceza yönteminin en kısa çalışma süresine sahip olduğu, en tutarlı sonuçlara sahip olan uyarlamalı ceza yönteminin çalışma süresi açısından ikinci sırada yer aldığı görülmektedir. Friedman test sonuçlarına göre uyarlamalı ceza yöntemi ilk sırada, ters tanjant yöntemi ise ikinci sıradadır.

Bu bilgiler ışığında uyarlamalı ceza yönteminin seçilebilecek en uygun kısıt yönetimi mekanizması olduğu söylenebilir. Fakat bu yöntem yapısı gereği parametre optimizasyonu gerektirdiği için, parametresi olmayan ters tanjant yöntemi de bir alternatif olarak seçilebilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

[1] L. W. Mays and B. C. Yen, Optimal cost design of branched sewer systems. Water Resources Research, 12(1), 37–47, 1975.

[2] L. W. Mays and H. G. Wenzel, Optimal design of multilevel branching sewer systems. Water Resources Research, 12(5), 913–917, 1976.

[3] L. Y. Liang, R. G. Tompson, and D. M. Young, Optimising the design of sewer networks using genetic algorithms and tabu search. Engineering, Construction and Architectural Management, 11(2), 101–112, 2004. https://doi.org/10.1108/ 09699980410527849.

[4] M. H. Afshar, A. Afshar, M. A. Mariño, and A. A. S. Darbandi, Hydrograph-based storm sewer design optimization by genetic algorithm. Canadian Journal of Civil Engineering, 33(3), 319–325, 2006. https://doi.org/10.1139/L05-121.

[5] T.-C. Pan and J.-J. Kao, GA-QP model to optimize sewer system design. Journal of Environmental Engineering, 135(1), 17–24, 2009. https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339372(2009)135:1(17).

[6] M. H. Afshar, A parameter free continuous ant colony optimization algorithm for the optimal design of storm sewer networks: constrained and unconstrained approach. Advances in Engineering Software, 41(2), 188–195, 2010. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.09.009.

[7] T. Cetin and M. A. Yurdusev, Genetic algorithm for networks with dynamic mutation rate. Gradevinar, 69(12), 1101–1109, 2018. https://doi.org/10.14256/JCE.1533.2015.

[8] Masoumi, F., S. Masoumzadeh, N. Zafari, and M.J.E. Skardi, Optimum sanitary sewer network design using shuffled gray wolf optimizer. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice 12(4): 04021055, 2021. https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000597.

[9] A. Gholami, P. G. Durgut and M. T. Ayvaz, An integrated simulation-optimization approach for dynamic design of the urban wastewater collection systems. Turkish Journal of Civil Engineering, 2023 105-134, 719, 2023. https://doi.org/10.18400/tjce.1209180.

[10] K. N. Praveen and Y. P. Mathur, Application of graph theory for optimal sewer layout generation. Discovery, 40(183), 151-157, 2015.

[11] A. E. Bakhshipour, M. Bakhshizadeh, U. Dittmer, W. Nowak, and A. Haghighi, A graph-theory based algorithm to generate decentralized urban drainage layouts. Green, 633–637, 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99867-1_109.

[12] N. de Villiers, G. C. van Rooyen and M. Middendorf, Sewer network design layout optimisation using ant colony algorithms. Journal of the South African Institution of Civil Engineers, 60(3), September 2018, 2–15, 1773, 2018. https://doi.org/10.17159/2309-8775/2018/v60n3a1.

[13] G. P. W. Rodrigues, L. H. M. Costa, G. M. Farias and M. A. H. de Castro, A depth-first search algorithm for optimizing the gravity pipe networks layout. Water Resources Management, 33,4583–4598, 2019. https://doi.org/10.1007/s11269-019-02373-x.

[14] M. E. Turan, G. Bacak-Turan, T. Cetin and E. Aslan, Feasible sanitary sewer network generation using graph theory. Advances in Civil Engineering, 2019, 8527180, 15, 2019. https://doi.org/10.1155/2019/8527180.

[15] G. Li and R. G. S. Matthew, New approach for optimization of urban drainage systems. Journal of Environmental Engineering, 116(5),927–944, 1990. https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339372(1990)116:5(927) .

[16] A. F. Diogo and V. M. Graveto, Optimal layout of sewer systems: a deterministic versus a stochastic model. Journal of Hydraulic Engineering, 132(9), 927–943, 2006. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:9(927).

[17] N. Duque, D. Duque, A. Aguilar and J. Saldarriaga, Sewer network layout selection and hydraulic design using a mathematical optimization framework. Water, 12, 3337, 2020. https://doi.org/10.3390/w12123337.

[18] F. M. Alfaisal and L. W. Mays, Optimization models for layout and pipe design for storm sewer systems. Water Resources Management, 35,4841–4854, 2021. https://doi.org/10.1007/s11269-021-02958-5.

[19] E. Tan, D. Sadak, and M.T. Ayvaz, Kanalizasyon sistemlerinin diferansiyel evrim algoritması kullanılarak optimum tasarımı. Teknik Dergi, 31(5), 10229-10250, 2020. https://doi.org/10.18400/tekderg.541507.

[20] M. Çunkaş, and A. Ürkmez, Çok kriterli bulanık genetik algoritma ile dalgıç asenkron motorların tasarım optimizasyonu. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 23(3), 2008.

[21] Z. Garip, M.E. Çimen, and A. F. Boz, Harris şahinleri ve balina optimizasyon algoritmalarının kısıt işleme teknikleriyle uygulaması: Karşılaştırmalı bir çalışma. Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications, 4(2), 76-85, 2021. https://doi.org/10.38016/jista.857881.

[22] A. Baykasoğlu, and F.B. Ozsoydan, Adaptive firefly algorithm with chaos for mechanical design optimization problems. Applied soft computing, 36, 152-164, 2015. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.06.056.

[23] M.F. Tasgetiren, A Genetic Algorithm with an Adaptive Penalty Function for the Orienteering Problem. Journal of Economic & Social Research, 4(2), 2002.

[24] G. Iyengar, and K. Sigman, Exponential penalty function control of loss networks. The Annals of Applied Probability, 14(4), 1698–1740, 2004. https://doi.org/10.1214/105051604000000936.

[25] İ. Gölcük, A comparative analysis of constraint-handling mechanisms for solving engineering design problems. Endüstri Mühendisliği, 32(2), 201-216, 2021. http://orcid.org/0000-0002-8430-7952.

[26] O. Kramer, A review of constraint-handling techniques for evolution strategies. Applied Computational Intelligence and Soft Computing, 1-19, 2010. https://doi.org/10.1155/2010/185063.

[27] M. Y. Ameca-Alducin, M. Hasani-Shoreh, W. Blaikie, F. Neumann and E. Mezura-Montes, A comparison of constraint handling techniques for dynamic constrained optimization problems. 2018 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC) (pp. 1-8). IEEE, 2018. https://doi.org/10.1109/CEC.2018.8477750.

[28] S. Zhao, T. Zhang, S. Ma and M. Chen, Dandelion optimizer: a nature-inspired metaheuristic algorithm for engineering applications. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 114, 105075, 2022. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105075.

[29] D. Simon, Evolutionary optimization algorithms. John Wiley & Sons, 2013.

[30] T. H. Kim, I. Maruta, and T. Sugie, A simple and efficient constrained particle swarm optimization and its application to engineering design problems. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 224(2), 389-400, 2010. https://doi.org/10.1243/09544062JMES1732.

[31] R. Moeini and M. H. Afshar, Layout and size optimization of sanitary sewer network using intelligent ants. Advances in Engineering Software 51,49–62, 2012. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2012.05.003.

[32] R. Moeini and M. H. Afshar, Arc based ant colony optimization algorithm for optimal design of gravitational sewer networks. Ain Shams Engineering Journal 8, 207–223, 2017. https://doi.org/10.1016/j.asej.2016.03.003.

[33] M. Mansouri, M. Khanjani, Optimization of sewer networks using nonlinear programming. J Water Wastewater, 10(2), 20-30,1999.

[34] W. H. Hassan, M. H. Jassem, and S. S. Mohammed, A GA-HP model for the optimal design of sewer networks. Water Resources Management 32:865-879, 2018. https://doi.org/10.1007/s11269-017-1843-y.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 149-155

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Flotation of low-rank coal slimes

Düşük dereceli kömür şlamlarının flotasyonu

Vildan Onen[1,*], Mustafa Kutkan Karaoglan[2]

[1,2] *Konya Technical University, Mining Engineering Department, 42250, Konya Türkiye*

Abstract

During coal production, a significant amount of fine coal dust is generated. Utilizing these high-ash coals is of great importance for the national economy. This study aims to recover the slime of the coal washing plant located in the Kütahya-Tuncbilek region by flotation. The experimental parameters studied include the collector dosage, dispersant dosage, frother dosage, flotation time, air flow rate, and solid ratio. Flotation performance was evaluated by determining the ash, calorific value, sulfur, volatile matter, fixed carbon, and combustible recovery values of the products obtained at the end of the experiment. As a result of the experimental studies, the highest combustible matter recovery value was obtained using 2000 g/t sodium silicate, 2000 g/t diesel oil, and 100 g/t MIBC with a solid ratio of 10%, a flotation time of 4 minutes, and an air flow rate of 4 L/min. Thus, marketable coal was produced with 6312 kcal/kg calorific value, 0.95% sulfur, and 22.4% ash content.

Keywords: Enrichment, Flotation, Lignite, Low-rank coal, Slime,

Öz

Kömür üretimi sırasında yüksek miktarlarda ince boyutlu toz kömür ortaya çıkmaktadır. Yüksek kül içerikli bu kömürlerin değerlendirilmesi ülke ekonomisi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada Kütahya-Tunçbilek bölgesinde bulunan lavvar tesisindeki tikiner altı şlamlı malzemenin flotasyonla zenginleştirilerek ekonomiye kazandırılması amaçlanmıştır. Toplayıcı miktarı, köpürtücü miktarı, flotasyon süresi, hava akış hızı ve katı oranı çalışılan deneysel parametrelerdir. Flotasyon performansı, deney sonunda elde edilen ürünler üzerinde kül, kalori, kükürt, uçucu madde, sabit karbon ve verim değerleri belirlenerek değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda, 4 L/d hava akış hızında, 4 dakika flotasyon süresinde, %10 katı oranı, 2000 g/t Sodyum silikat, 2000 g/t mazot ve 100 g/t MIBC kullanılarak gerçekleştirilen en yüksek verim değerine sahip deney sonucu ile 6312 kcal/Kg ısıl değere sahip %0.95 kükürt ve %22.4 kül içerikli satılabilir kömür elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Zenginleştirme, Flotasyon, Linyit, Düşük dereceli kömür, Şlam,

1 Introduction

In recent years, with the continuous development of coal mining and the transition to mechanized methods, the amount of coal slime produced in coal preparation plants has increased significantly. Coal slime is often used as a fuel for power generation, resulting in significant waste of resources and environmental pollution [1]. The industrial use of coal slime has been significantly limited due to its high moisture content, high viscosity, high ash content and low calorific value [2,3]. In order to use this part of the coal efficiently and to reduce pollution, the slime is usually dried to increase the calorific value or enriched by flotation to reduce the gangue content [4,5]. Flotation has been widely used in the enrichment of fine-sized coals for decades [1]. However, it is difficult to separate coal gangue, which consists mainly of quartz, kaolin and montmorillonite, by flotation due to the abundance of oxygen-containing functional groups on the low-grade coal surface [3,6]. Fine slime containing high amounts of clay tends to coat the surface of coal particles by electrostatic attraction and reduce surface hydrophobicity, resulting in a low recovery rate of combustible materials. In addition, due to their lightness and small particle size, clay minerals are dragged into the concentrate by the mechanical transport mechanism, further reducing the flotation efficiency. Sodium silicate is a widely used dispersant in coal flotation to suppress quartz and silicate minerals [7].

About half of all global coal deposits are bituminous coal and lignite, which are very abundant in China, Australia, Turkey, India and the northern United States. Lignite mining is of great importance today [6]. Lignite, one of the main riches of our country, is evaluated by both the state and the private sector, as it is both an energy raw material and an important source of industry. Turkish lignites are low rank coals of which calorific values varies between 1000 and 4200 Kcal/kg. The upper calorific value of lignite coal in the Afşin-Elbistan basin, where the largest reserve is located, is 1000-1400 kcal/kg, while the lower calorific value is in the range of 900-1250 kcal/kg [8].

In the coal washing plant located in the Tuncbilek district of Kütahya province, which is the subject of this study, coal is produced by the open pit method from the inefficient veins of a mine whose production was terminated because it was not economical at the time (Figure 1). The seam structure contains an average of 3 meters of coal within an 8 meter thickness. This structure shows a distribution of 30 cm clayey formation and 25 cm coal and has a very intermediate

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: vonen@ktun.edu.tr (V. Onen)
Geliş / Recieved: 08.07.2023 Kabul / Accepted: 09.11.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1324175

slice structure. Since the excavator mouths of the machines are larger than the seam, the intermediate cutting is taken without being completely separated. Coal enrichment is carried out at the coal washing plant. Additionally, there is a decrease in coal washing recovery due to low open pit efficiency. Approximately 100000 tons of saleable coal is obtained for an average of 500000 tons of raw coal production. There is a slime loss of around 21% in the plant [9]. Considering that the slime loss is equivalent to coal washing recovery, the main objective of this study is to investigate the recovery of fine-sized Tunçbilek lignite coal through flotation and increase the plant's efficiency to prevent cost losses arising from these losses.



Figure 1. Coal seams of the plant

2 Material and method

2.1 Material

The coal, whose characteristics are given in Table 1, is being fed to the washing plant for enrichment after being extracted from the coal mine. The washing plant is operating at efficiency levels of around 20% in parallel with the mine's efficiency, which is 25%. Considering the market share of the powdered coal in the plant, which is currently sized between 10 and 0.2 mm, this coal is mixed with the slime to evaluate the slime. In plant, powder coal, which has an average combustible matter recovery of 8.5% and a calorific value of 3575 kcal/kg, accounts for 41.5% of the total sales. Depending on the formation of seams, the recovery of powdered coal taken from the plant may decrease. The tailing in the plant ranges from 50% to 59%. It is thought that the efficiency of clean coal can be increased by flotation of the slime in the plant and thus the losses can be compensated.

Table 1. Properties of raw coal in plant

	Original Coal	Dry coal (in air)	Dry Coal
Ash (%)	42	57	60
Volatile matter (%)	19.24	25.95	27.35
Total sulfur (%)	0.99	1.33	1.40
Upper cal. value (kcal/kg)	1750	-	3307
Lower Cal. Value kcal/kg)	1501	-	2166

In the experimental studies, the slime of 75 kg taken from downstream of the thickener in the washing plant was used (Table 2). Due to the open pit and washing plant conditions, the samples were taken at different times, homogenized, and used in the studies. Then, the sample was divided by the rectangular method: one part was used in the experiments, and the other part was stored. The particle size of approximately 80% of the samples was below 0.2 mm. In the experiments, diesel oil, methyl Isobutyl Carbinol (MIBC), and sodium silicate were used as a collector, frother, and dispersant, respectively. Tap water was used in the study.

Table 2. Properties of the slime used in experimental studies

	Original Coal	Dry Coal
Lower calorific value (KCal/Kg)	504	1040
Upper calorific value (KCal/Kg)	757	1130
Volatile matter (%)	13.57	19.45
Total sulfur (%)	0.60	1.71
Ash (%)	34.83	72.84

2.2 Method

The experiments were done in a 1L cell using a Denver-type flotation machine having an air compressor providing variable air flow rates. The experiments were carried out at the natural pH (7.8) of the coal suspension and at a stirring speed of 1450 rpm. The water and coal mixture prepared according to the desired solid ratios were stirred for 3 minutes for a homogeneous pulp mixture. Then, dispersant, collector and frother were added respectively, air was supplied to the system and froth was removed at certain flotation times. Conditioning times for the collector and frother were determined as 3 minutes. At the end of the experiment, the obtained products were filtered and dried in an oven (at 105 °C), and the ash contents of the concentrate were determined to calculate the combustible recovery values (Equation 1).

$$\text{Combustible recovery (\%)} = \frac{M_c \times (100-A_c)}{M_f \times (100-A_f)} \times 100 \qquad (1)$$

Where, Ac and Af are the ash content of clean coal and feed; Mc and Mf are the mass of clean coal and feed, respectively.

The flotation performance was evaluated by determining the ash, calorific value, sulfur, volatile matter, fixed carbon, and combustible recovery values on the obtained products at the end of the experiment. Leco AC-350 model calorimeter device was used for calorific value analysis, Leco TGA-701 for volatile matter determination, and Leco SC-144 DR carbon-sulfur analysis device for sulfur content and fixed carbon analysis. The experimental studies were carried out depending on variables including the concentration of collector, dispersant and frother, airflow rate, and solid %. (Table 3).

Table 3. Experimental parameters

Parameters	
MIBC (g/t)	50, 75, 100, 150, 200
Sodium Silicate (g/t)	750, 1000, 2000, 4000, 6000, 7000
Diesel oil (g/t)	800, 1000, 2000, 4000, 6000, 10000
Solid ratio (%)	10, 15, 20, 25
Air flow rate (L/min^{-1})	4, 6, 7, 8, 9, 10

3 Results and discussion

3.1 Optimization experiments

Firstly, preliminary experiments were conducted to test the floatability of the slime and to determine the average working range of the studied flotation chemicals (collector, dispersant, frother) and experimental conditions (air flow rate). In the experimental studies carried out at this stage, the flotation performance was evaluated by the percentage of float product (Figure 2). In the preliminary experiments, the working ranges of the collector and dispersant concentrations were tested in the range of 800-10000 g/t for the collector and 750-7000 g/t for the dispersant. As a result, floated matter recoveries in the range of 23% to 41% and 35% to 40% were obtained, respectively (Figure 2a-b). For low-grade coal, the strong surface hydrophilicity of oxygen functional groups makes the collector to adsorb on coal surface difficult, so high float product recovery cannot be achieved. The maximum floated product recoveries were obtained at collector and dispersant concentrations of 2000 g/ton. Further addition of the collector decreased the amount of floated matter (Figure 2a). It is known that the addition of the collector above the optimum concentration leads to a negative effect on flotation efficiency due to layered adsorption on the mineral surface. Furthermore, the addition of more than the optimum concentration of collector also causes the clays and associated particles to float, reducing the product quality [10]. Sodium silicate is one of the most important modifying chemicals in flotation. It is commonly used as a depressant but can also function as a dispersant. Soluble silicates are intensely hydrolyzed and interact with the mineral surface [11]. However, no effective increase was observed in the float product recovery with sodium silicate, and the addition of sodium silicate above the optimum concentration did not result in a significant change in float product recovery (Figure 2b). Similarly, Oats et al. [12] also found that dispersants did not significantly improve flotation efficiency in coal flotation.

In the preliminary experiments, frother concentration was tested in the range of 50-200 g/t, and recoveries in the range of 32-40% were achieved. The maximum recovery was obtained with a frother concentration of 100 g/ton (Figure 2c). Bubble size significantly influences the flotation efficiency, especially for very fine-sized coal. The flotation of fine particles requires large surface areas, so fine bubbles must be produced. On the other hand, the main purpose of using frother is not only to create small-sized bubbles but also to generate small and stable bubbles that do not rapidly coalesce with other bubbles. This situation varies depending on the type/concentration of frother used and the presence of fine-sized particles in the feed [13]. Apart from this, the airflow rate is another factor that affects the bubble sizes. The most important variable that increases the flow rate of froth is the air flow rate fed into the cell. In this case, it can be expected that the float product recovery will increase with the increasing air flow rate, but it is observed that there is a decrease in the float product recovery with the increase in the airflow rate. The highest float product recovery (41%) was obtained with the lowest air flow rate (4 L/d) (Figure 2d). It is thought that this situation may be caused by the increase in the airflow rate, increasing the bubble size, and, consequently, the decrease in the bubble surface area. The number of bubbles in the pulp increases with increasing airflow rate. This will increase the probability of collisions between bubbles and coal. In this case, the flotation efficiency can be expected to increase. However, a very high airflow rate will cause a decrease in the recovery rate of combustible material in flotation due to the increased bubble size. When the air flow rate exceeds a certain value, a decrease in efficiency is observed due to bubble coalescence. Additionally, fast airflow can cause instability in the flow level. Furthermore, fine slime particles can adhere to air bubbles, resulting in more ash and less clean coal [14]. It is also supported by the studies in the literature that increasing air flow rate leads to bubble coalescence beyond a certain threshold, disrupting the flow conditions and reducing flotation efficiency by decreasing the bubble surface area [10, 14]. In the second stage of the experimental studies, the effect of these variables on the product quality (ash-sulfur-volatile matter- calorie values-combustible matter recovery) in different experimental variable combinations was also evaluated.

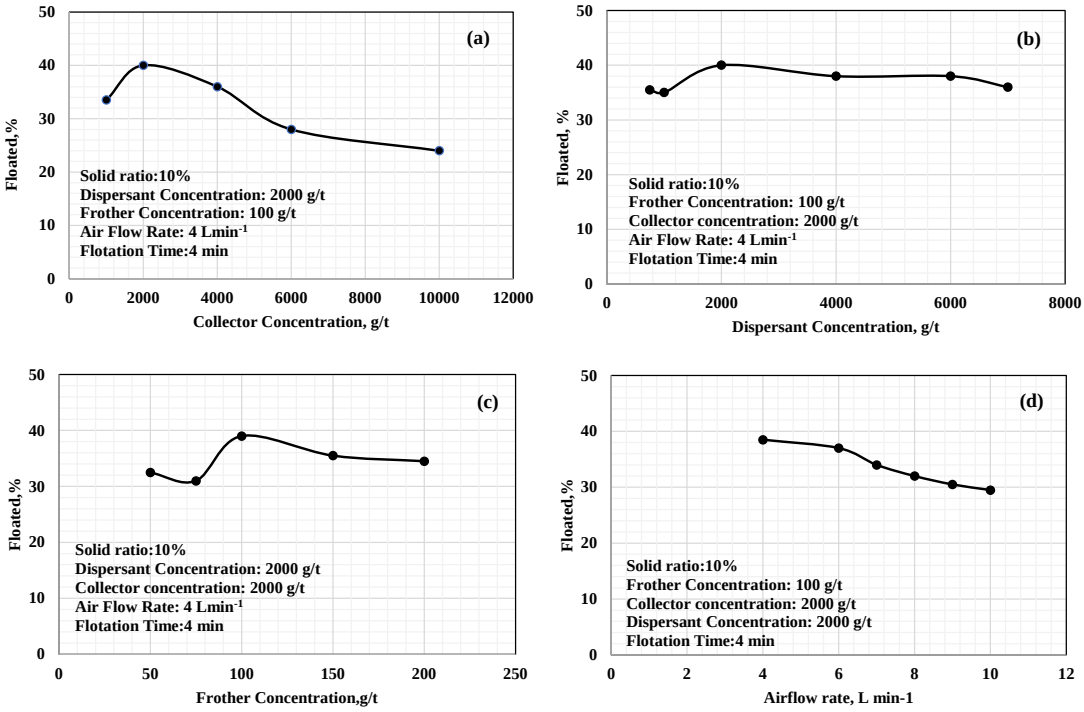


Figure 2. Effect of flotation variables on floatability of lignite slime

3.2 Flotation experiment results

The preliminary experiments conducted with the slime taken from the thickener in the coal preparation plant showed that the material could be floated to some extent, even in small amounts. However, no evaluation was made in terms of product quality. In the second stage of the study, experiments were conducted with different combinations of experimental variables to investigate the potential of incorporating of the slime to the plant. At this stage, flotation performance is discussed in terms of combustible matter recovery and product quality (ash- sulfur- volatile matter-calorific values). Table 4 shows the flotation test results for different combinations of experimental variables.

According to the experimental studies, the optimum conditions were determined as follows: 10% solids ratio, 100 g/t MIBC, 2000 g/t sodium silicate, 2000 g/t diesel oil, 4 L/min airflow rate, and 4 min flotation time. As the amount of reagents studied and other variables increase under experimental conditions the samples obtained in the experiments tend to deviate from the optimum result and the product quality decreases (Table 4). Unlike the optimization studies that focus on determining the float product amount, this section also includes evaluating flotation time and solid ratio as additional experimental variables. The quality of the product obtained is expected to decrease with the increasing flotation time. However, long flotation times have also been tried since the aim is to obtain a product with a minimum of 2500 kcal/kg and above. Optimum results were obtained in the studies performed with 10% solids ratio, and while the ash content increased with increasing solids ratio, the calorific value and combustible matter recovery decreased (Figure 3). A significant decrease in efficiency was observed at high solid concentrations due to the coal slime used in the study having very fine particle size and containing a significant amount of clay as the gangue. It was also determined in the previous flotation studies that a lower pulp density should be used for fine coal particles [15,17]. In addition, an increased solid ratio may lead to a decrease in efficiency due to the effect of intra-cellular airflow.

Consequently, under optimum conditions, clean coal with a calorific value of 6312 kcal/kg, sulfur content of 0.95%, ash content of 22.44 % on an dry basis was obtained from slimy material with a calorific value of 1130 kcal/kg, sulfur content of 1.71% and ash content of 72.8% on the dry basis. However, in these conditions, obtaining a larger amount of product at an acceptable calorific value seems possible by extending the flotation time. Lignite surface is rich in polar functional groups such as C-O, O-H, and CO= groups. Lignite is much more hydrophilic than other coals due to the abundance of oxygenated functional groups, cracks and micropores on its surface. Therefore, achieving satisfactory flotation efficiency for lignite is challenging. These groups can combine with water molecules via hydrogen bonds and cause the formation of a thicker hydration film on the surface. The formed hydration layer limits the adsorption of collectors on the surface [18]. In addition, exposure to oxidation of coal slimes, which are exposed to outdoor effects such as sun, rain, and wind for a long time, also leads to low flotation efficiency. Furthermore, the degree of slimming also significantly affects the flotation properties. Slimes cause low flotation efficiencies by covering the surface of minerals, preventing direct contact between collectors and air bubbles [14].

Table 4. Flotation test results for different experimental variable combinations

Solid Ratio %	Amount of MIBC g/t	Amount of Sodium Silicate, g/t	Amount of Diesel oil, g/t	Airflow Rate Lmin^{-1}	Flotation time, min	Sulfur, %	Amount of Volatile matter, %	Ash, %	Fixed Carbon, %	Calorific Value kcal/kg	Combustible matter Recovery, %
10%	100	2000	2000	4	4	0.95	34.02	22.44	41.46	6312	41
	100	4000	2000	4	4	1.27	21.24	27.45	43.91	5188	38
	150	4000	4000	6	6	1.32	17.99	28.96	30.20	4140	39
	150	6000	4000	6	6	1.61	18.88	32.53	28.88	4042	40
	200	6000	6000	7	7	0.94	15.24	34.35	41.12	3901	40
	200	7000	6000	7	7	1.68	25.37	35.24	27.24	3817	36
	75	7000	800	8	8	1.55	22.65	35.90	34.56	3761	37
	75	750	800	8	8	1.14	26.79	33.25	29.22	3617	34
	50	750	10000	9	9	1.21	28.70	38.41	26.68	3601	38
	50	1000	1000	10	10	1.21	28.26	35.00	28.98	3532	32
15%	100	2000	2000	4	4	1.26	27.30	36.08	28.96	3757	33
	100	4000	2000	4	4	1.68	27.82	37.15	31.77	3633	33
	150	4000	4000	6	6	1.11	28.04	37.99	30.86	3615	30
	150	6000	4000	6	6	0.98	29.87	38.06	29.86	3211	38
	200	6000	6000	7	7	0.96	26.71	38.37	31.66	3121	36
	200	7000	6000	7	7	0.80	24.90	38.71	17.81	3057	35
	75	7000	800	8	8	1.10	20.72	38.36	32.23	2986	32
	75	750	800	8	8	0.99	20.45	38.28	25.44	2887	26
	50	750	10000	9	9	1.11	25.36	36.46	27.19	2711	21
	50	1000	1000	10	10	1.02	19.99	39.01	28.85	2651	24
20%	100	2000	2000	4	4	1.44	22.08	39.98	23.79	2922	24
	100	4000	2000	4	4	1.05	22.49	40.71	28.97	2894	23
	150	4000	4000	6	6	0.98	23.58	41.92	30.16	2885	23
	150	6000	4000	6	6	1.26	26.51	42.15	30.50	2817	34
	200	6000	6000	7	7	1.13	24.08	42.39	27.86	2803	30
	200	7000	6000	7	7	0.86	24.10	42.50	29.30	2788	36
	75	7000	800	8	8	0.86	17.74	43.30	32.42	2774	17
	75	750	800	8	8	0.85	18.21	43.46	31.66	2690	18
	50	750	10000	9	9	0.91	19.90	44.58	30.14	2470	16
	50	1000	1000	10	10	1.15	21.14	45.28	27.15	2385	20
25%	100	2000	2000	4	4	1.01	25.65	45.39	24.56	2752	26
	100	4000	2000	4	4	1.29	17.29	45.45	29.35	2706	22
	150	4000	4000	6	6	1.15	25.99	45.46	27.91	2680	23
	150	6.000	4000	6	6	1.00	20.64	46.47	28.20	2590	23
	200	6000	6000	7	7	1.01	22.38	46.85	24.92	2533	26
	200	7000	6000	7	7	0.98	25.95	47.32	23.05	2495	28
	75	7000	800	8	8	0.99	27.30	48.52	31.05	2461	14
	200	750	10000	9	9	0.92	28.40	48.84	17.45	2310	19
	75	1000	4000	6	10	0.98	23.92	41.60	31.82	2619	19

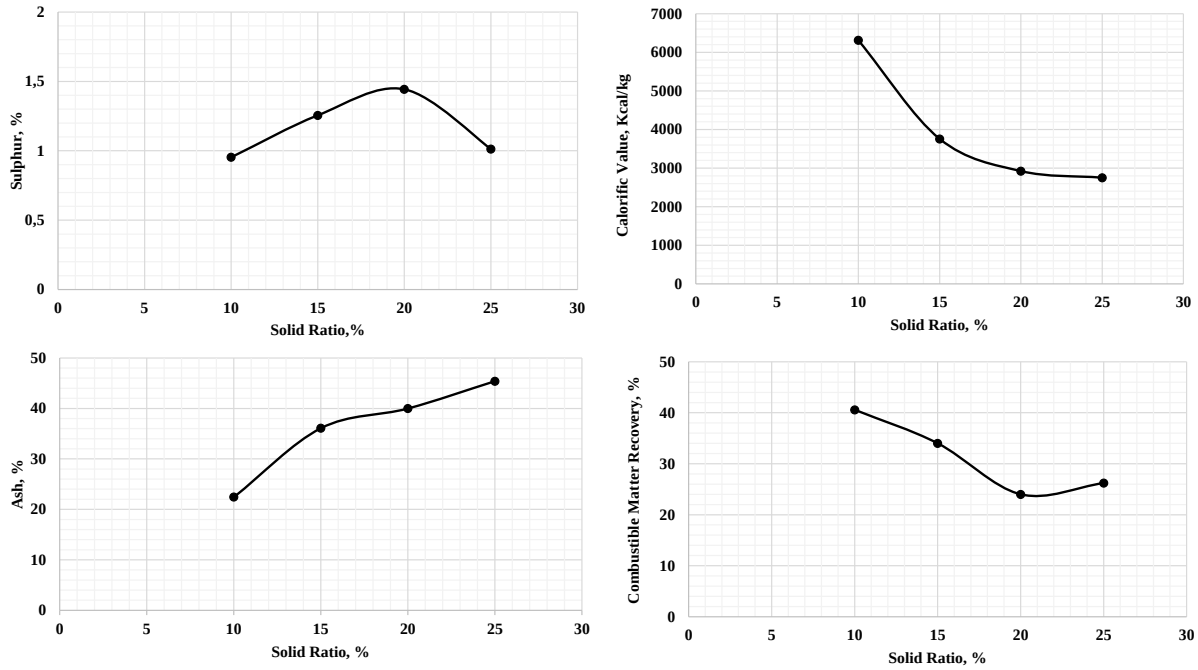


Figure 3. Variation of sulfur, calorie, ash values and combustible matter recovery of concentrate depending on solid ratio (Collector concentration: 2000 g/t; Dispersant concentration: 2000 g/t; frother concentration: 100 g/t; Air flow rate: 4 $Lmin^{-1}$; flotation time 4 min)

4 Conclusion

This study aimed to enrich the slime below the thickener by flotation method in a coal washing plant located in the Tunçbilek district of Kütahya province and contribute it to the economy. The loss of coal at the same level of efficiency as the plant and its effect on operational efficiency causes a decrease in profitability. Pre-flotation tests, where the flotation performance was evaluated based solely on the float product recovery were carried out at varying concentrations of frother, collector, and dispersant, and varying air flow rates in order to test the floatability of the slime. As a result, coal was floated at approximately 40% recovery.

Following the preliminary optimization studies, different combinations of flotation experiments examining the interaction of all studied experimental variables (collector concentration, dispersant concentration, frother concentration, solid ratio, air flow rate, and flotation time) were carried out. At this stage, the flotation performance was evaluated by determining the ash, calories, sulfur, volatile matter, moisture, fixed carbon and recovery values on the products obtained at the end of the experiment. As a result of the experimental studies, the highest efficiency value was obtained under the following conditions: an airflow rate of 4 L/min, a flotation duration of 4 minutes, a solid ratio of 10%, 2000 g/t sodium silicate, 2000 g/t diesel oil, and 100 g/t MIBC. The resulting marketable coal had a sulfur content of 0.95%, an ash content of 22.4%, a calorific value of 6312 kcal/Kg, and a combustible matter recovery of 41.22%. For different experimental conditions, it was determined that coal can be obtained in the range of 2300-6300 kcal/kg average calorific value. As a result, it was concluded that approximately 90000 tons of sludge loss in this plant, which washes approximately 500000 tons of coal per year, may have the potential to be brought into the economy.

Acknowledgement

This study was supported by the Coordinatorship of Selcuk University Scientific Research Projects. (Grant No: 17201106).

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThendicate): 15%

References

[1] Y. Chen, S. Hu, J. Li, L. Weng, C. Wu and K. Liu, Improvement on combustible matter recovery in coal slime flotation with the addition of sodium silicate. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 603, 125220, 2020. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125220.

[2] D. Li, D. Wu, F. Xu, J. Lai, and L. Shao, Literature overview of Chinese research in the field of better coal utilization. Journal of Cleaner Production,185,959-980,2018. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.216.

[3] J. Tan, H. Cheng, L. Wei, C. Wei, Y. Xing, and X. Gui, Using low-rank coal slime as an eco-friendly replacement for carbon black filler in styrene butadiene rubber. Journal of Cleaner Production, 234, 949-960, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.221.

[4] W. Xia, C. Zhou, and Y. Peng, Enhancing flotation cleaning of intruded coal dry-ground with heavy oil. Journal of Cleaner Production, 161, 591-597, 2017. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.193.

[5] L. Xu, J. Tian, H. Wu, Z. Lu, W. Sun and Y. Hu, The flotation and adsorption of mixed collectors on oxide and silicate minerals. Advances in colloid and interface science, 250, 1-14, 2017. https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.11.003.

[6] Y. Xia, R. Zhang, Y. Cao, Y. Xing and X. Gui, Role of molecular simulation in understanding the mechanism of low-rank coal flotation: A review. Fuel, 262, 116535,2020. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116535.

[7] Y. Wang, Y. Zhou, Q. He, Y. Xing, X. Bao, X. Gui and L. Wang, Research on Mechanisms of Improving Flotation Selectivity of Coal Slime by Adding Sodium Polyphosphate. Minerals, 12(11), 1392, 2022. https://doi.org/10.3390/min12111392.

[8] TKİ, 2009, Türkiye Kömür İşletmeleri Genel Müdürlüğü Kömür (Linyit) Sektör Raporu (General Directorate of Turkish Coal Enterprises Coal (Lignite) Sector Report), Ankara, 19 p.

[9] M. K. Karaoğlan, İnce boyutlu tunçbilek linyit kömürünün flotasyonla zenginleştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2018.

[10] H. Hacıfazlıoğlu, Kolon flotasyonu ile bitümlü kömür atıklarından temiz kömür kazanımı. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(2), 11-19, 2008.

[11] P. K. Naik and P. S. R. Reddy, Effect of sodium metasilicate on natural flotability of coal. Colloid and Polymer Science, 284, 1024-1030, 2006. https://doi.org/10.1007/s00396-006-1471-1.

[12] W. J. Oats, O. Ozdemir and A. V. Nguyen, Effect of mechanical and chemical clay removals by hydrocyclone and dispersants on coal flotation. Minerals Engineering, 23(5), 413-419, 2010. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.12.002.

[13] E. C. Çilek, Mineral flotasyonu, Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Yayın No:59, 2013.

[14] Y. Cai, M. Du, S. Wang and L. Liu, Determination of oxidation properties and flotation parameters of low-rank coal slimes. Powder Technology, 353, 20-26, 2019. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.05.017.

[15] Ö. Öney, The enrichment of Zonguldak fine coal by flotation, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 1993.

[16] M. Oruç, Kömür flotasyonuna etki eden bazı faktörler, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 1996.

[17] F.D. Ayhan, H. Abakay and F. Kahraman, Şırnak asfaltitlerinden külün flotasyon yöntemi ile uzaklaştırılması, Madencilik Dergisi, 42:1, 27-34, 2003.

[18] G. Cheng, Z. Li, Z. Ma, Y. Cao, L. Sun and Z. Jiang, Optimization of collector and its action mechanism in lignite flotation. Powder Technology, 345, 182-189, 2019. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.01.011.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 156-168
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
Araştırma makalesi / Research article
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Estimation of economic costs of air pollution from road vehicle transportation in Turkey

Türkiye'de karayolu taşımacılığından kaynaklanan hava kirliliğinin ekonomik maliyetinin tahmini

Eda Ustaoglu[1,*]

[1] *Abdullah Gul University, Department of Economics, 38080, Kayseri, Türkiye*

Abstract

Valuation of the economic, social and environmental impacts of air pollution has become crucial for the benefit-cost analysis of pollution restriction strategies, which serve as a foundation for establishing priorities for action. This paper focuses on the estimation of total external costs caused by road transport-related air pollutants using an integrated evaluation methodology combining air quality modelling, engineering science and economics. Emission factors and transport network characteristics were used to compute emissions from the road transport that is followed by economic valuation approaches adopted from international case studies and used for calculating the economic costs of air pollution in Türkiye. The results showed that total external costs of air pollution in Türkiye in 2018 ranged between 37,500 euros which is computed for CO emissions and 2,686 million euros computed as an upper limit for NOx emissions. Regarding the social costs of CO_2 emissions, the values range between 31 million euro and 1,427 million euro, the former represents the low value estimate while the latter is the high value estimate. The findings indicate that the impact of emissions from road transport on environment and society can be substantial in Türkiye. Therefore, some regulations are necessary to reduce transport emissions and to sustain socio-economic welfare.

Keywords: Road transport, Air pollutants, Economic valuation, External costs, Türkiye

Özet

Hava kirliliğinin sosyo-ekonomik ve çevresel etkilerinin değerlendirilmesi, eylem önceliklerini belirlemek için bir temel oluşturan kirlilik kontrol stratejilerinin maliyet-fayda analizi için çok önemlidir. Bu makale, hava kalitesi modelleme, mühendislik ve ekonomiyi birleştiren entegre bir değerlendirme metodolojisi kullanarak karayolu taşımacılığıyla ilgili hava kirleticilerinin neden olduğu toplam dışsal maliyetlerin tahminine odaklanmaktadır. Karayolu taşımacılığından kaynaklanan emisyonların hesaplanmasında emisyon faktörleri ve ulaşım ağı özellikleri kullanılmış olup uluslararası örnek çalışmalardan uyarlanan ekonomik değerleme yaklaşımları takip edilerek Türkiye'deki hava kirliliğinin ekonomik maliyetinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Sonuçlar, 2018 yılında Türkiye'de hava kirliliğinin toplam dışsal maliyetinin CO emisyonları için hesaplanan 37,500 avro ile NO_x emisyonları için üst sınır olarak hesaplanan 2,686 milyon avro arasında değiştiğini gösterdi. CO_2 emisyonlarının sosyal maliyetleri ile ilgili olarak, değerler 31 milyon avro ile 1,427 milyon avro arasında değişmektedir. Bunlardan ilki düşük değerli tahmini, ikincisi ise yüksek değerli tahmini temsil etmektedir. Bulgular karayolu taşımacılığından kaynaklanan emisyonların çevre ve toplum üzerindeki etkisinin Türkiye'de önemli olabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, ulaşım emisyonlarını azaltmak ve sosyo-ekonomik refahı sürdürmek için bazı düzenlemeler gereklidir.

Anahtar kelimeler: Karayolu taşımacılığı, Hava kirleticiler, Ekonomik değerleme, Dışsal maliyetler, Türkiye

1 Introduction

Emission reductions from air pollutants and greenhouse gases plays a significant part in supporting sustainable development. Road transport is one of the main drivers of increasing levels of greenhouse gases and air pollution [1, 2]. Climate change is known to be worsened by greenhouse gases such as carbon dioxide (CO_2), nitrous oxide (NO_2), and methane (CH_4). Local air pollutants including carbon monoxide (CO), volatile organic compounds (VOCs), particulate matter (e.g. Pb), nitrogen oxide (NO_x), and sulphur oxide (SO_x) have negative impacts on the environment and society [3]. Road traffic exposure raises all-cause mortality, asthma, deteriorated lung function, unfavourable birth outcomes and paediatric cancer [4]. Damage to materials and building structures, crop losses and additional costs for harming the ecosystem and biodiversity are some of the costs associated with air pollution. The considerable rise in private automobile ownership, which is partly fuelled by the construction of large-scale metropolitan highways, has resulted in increased transport-related pollution, and energy use. Nearly the whole global population participates in transportation activities, with road transport making up the biggest portion of such activities.

Continuous economic and population growth and high levels of energy consumption that rely on a carbon-intensive fuel mix, together with a road-dominated transportation

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: eda.ustaoglu.@agu.edu.tr
Geliş / Recieved: 02.08.2023 Kabul / Accepted: 10.11.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1336117

system have caused large increases in greenhouse gases (GHG) and local air pollutant emissions in Türkiye. GHG emissions have followed economic growth path in Türkiye and have been decoupled particularly in recent years [5]. According to Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) [5: p:25], Türkiye experienced the largest increase in GHG emissions among OECD members and transportation industry is one of the major sources of GHG emissions. Türkiye's cities have been identified as one of the worst examples of excessive levels of air pollution found in Europe [5]. In Türkiye, roads are estimated to account for 25% of future infrastructure investment, with railroads accounting for 9%. This will lead to increasing congestion and air pollution levels, particularly in the biggest urban areas and regions of Türkiye. Regarding transportation sector, government needs to encourage a modal shift from private roads to public transportation through application of integrated urban and transportation planning, promotion of alternative fuels and renewal of the existing vehicle fleet structure.

Different methodological techniques and software can be used to evaluate the air pollution caused by vehicle emissions and forecast the air quality in short and long-term scenarios. Basically, there are two types of models to evaluate the transport-related emissions: The bottom-up and the top-down models. The former approach is based on the models that provide data on motor vehicle pollutants at the street scale. In such models, first, road transport characteristics (e.g. traffic volumes, vehicle speeds) including transport mode and types of vehicle involved are specified. Based on this information, total emissions causing air pollution are calculated for each transport mode (e.g. car, bus, rail) and vehicle type (e.g. share of diesel vehicles, age and technology of vehicles). Dispersion and transformation models can be used for the estimation of air pollution concentrations and the population exposed to a certain concentration [6]. The bottom-up method has been used in different Europe-wide studies such as UNITE [7]; NEEDS [8, 9]; HEATCO [10]; CAFE CBA [11]; ExternE [12].

More recently, air pollution monitoring systems based on remote sensing data have been utilised for the assessment of transport-related air pollution [13]. Input data requirements of these models are road traffic characteristics, vehicle emissions, whether data, terrain geometry and location of receptors. Air pollution assessment is carried out based on three different spatial scales: Local (only covering the pollutants including CO_x, NO_x, SO_x) [14, 15], urban (mainly primary pollutants) [16], and regional (primary and secondary pollutants such as O_3, NO_2, and others) [17]. An alternate way for estimating the socioeconomic and environmental effects of exposure to air pollution and for valuing with specific costs in the case of death and morbidity is the top-down approach. This strategy demands the availability of comprehensive exposure data for each country for the specific air pollutants (such PM2.5 or PM10). It is also necessary to have information on how each mode of transportation and vehicle category contributes to total pollution concentrations for each pollutant. This approach was used in the previous studies including INFRAS/IWW [18, 19] and World Health Organisation (WHO) [20]. The reviews of different methods used for modelling air pollution impacts are provided in Carruthers et al. [21], Chang and Hanna [22], Jerrett et al. [23], WHO [24], Sellier et al. [25], Conti et al. [26].

Despite the continuous growth in GHG emissions, Türkiye did not set a mitigation target in 2020 [5]. Nevertheless, the Country puts forward a mitigation target for the year 2030 as part of its Intended Nationally Determined Contribution (INDC) under the UN Framework Convention on Climate Change. Türkiye's National Climate Change Strategy and Action Plan, which established a framework for action with short- and long-term goals and a list of initiatives for reducing GHG emissions and responding to climate change, has been put in place [5]. Low emission zones were included to the 2008 transportation legislation, where they will be governed locally. The government has created a plan to increase domestic demand by making infrastructural expenditures and providing incentives for the adoption of low-emission vehicles [5]. However, Türkiye lacks a thorough framework for evaluating the energy savings from diverse industries (such as transportation) brought about by various policies or infrastructure upgrades. The government has not created strategies or measures for evaluating progress, and there is no assessment of the discrepancy between policy aims and actions taken. [27]. Therefore, the present study will contribute to the literature by focusing on the valuation of external effects of air pollutants caused by road transportation using an integrated assessment approach.

2 Material and methods

The overall transport cost evaluation methodology from CE Delft, INFRAS & Fraunhofer ISI [28] is given in Figure 1. As shown in Figure 1, each vehicle category's emission parameters and travel characteristics must be provided as input data. Calculating the transport-related pollutants brought on by additional vehicle miles is the first step utilizing this data. Then, it is computed how much of each type of pollutant is being released by vehicles. The final stage is to place a monetary value on various air pollution sources and distribute the overall external costs across the various vehicle categories. In Türkiye, road-based transportation account for around 40% of the national NO_x and %13 of the NMVOC emissions [29]. As highlighted by EEA [30, 31], other potential sources of local air pollution are CO, N_2O, NH_3, Pb, PM_{10} and $PM_{2.5}$. Therefore, these pollutants will be used to calculate the costs of air pollutants from road transport in Türkiye. Following the calculation of emissions of all air pollutants per vehicle category, this information is integrated with external air pollution costs for each of the air pollutants to calculate the average costs per vehicle-km by each transportation mode. The sub-sections below present the emission estimation methodology and the methods for evaluating the costs of emissions.

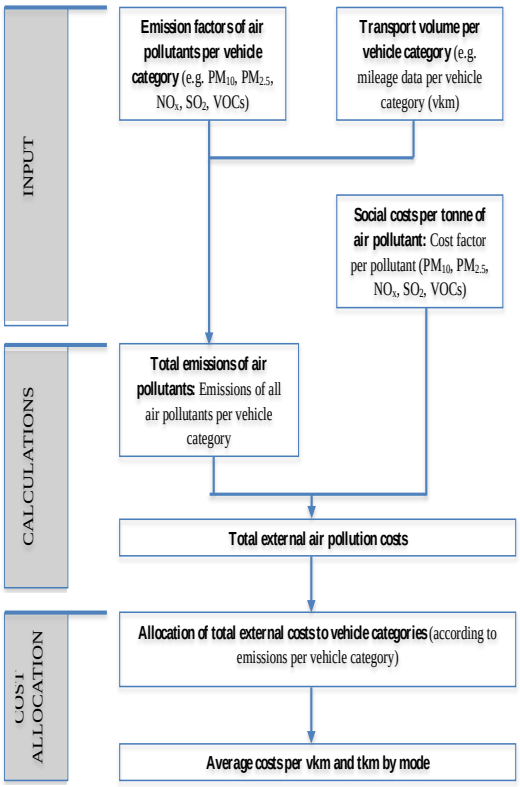


Figure 1. Methodology for air pollution cost evaluation

2.1 The emission estimation methodology

Activity data refers to statistics about the numbers, volumes, and amounts of a particular activity, such as the amount of fuel used and the number of kilometers travelled annually by a particular vehicle category. Many different potential data sources that might be used to compile an inventory. The governmental departments, academic institutions, and organizations that already gather data from many economic sectors are national data sources, and they are also where users may find the most relevant information. Because there is no published work on the emission factors computed for the road transport sector in Türkiye, the emission factors computed by EEA [31] were adopted to the Turkish case. The emission estimation methodology of EEA [31] includes the emissions of NO_x, CO, CO_2, NMVOC, N_2O, CH_4, NH_3, PM and others. Emission factors for NMVOC, CO, NO_x, PM, N_2O, PM, NH_3, and CO_2 were calculated using the Tier 1 method that estimates the emissions in [g/kg]. In the Tier 1 approach, the emissions are calculated based on the following equation:

$$E_i = \sum_j \left(\sum_m FC_{j,m} \times EF_{i,j,m} \right) \quad (1)$$

Where E_i is the emission from pollutant type i [g], $EF_{i,j,m}$ represents the consumption of fuel-specific emission factor of pollutant i for vehicle type j and fuel type m [g/kg]; and $FC_{j,m}$is the fuel consumption of vehicle category j using fuel type m [kg]. Automobiles, heavy-duty vehicles, L-category vehicles, and light commercial vehicles should all be taken into account. The fuels to be considered are diesel, petrol, natural gas and LPG. The Tier 2 method, on the other hand, is based on the fuel used by different vehicle types and their emission standards. As a result, the number of cars and the annual mileage for each technology must be provided. These vehicle-kilometres data are multiplied by the Tier 2 emission factors given by the equation below.

Table 1. Emission factors for different vehicle classes (in g/km)

Category	Vehicle class	CO (g/km)	NMVOC (g/km)	NO_x (g/km)	N_2O (g/km)	NH_3 (g/km)	Pb (g/km)	CO_2 lube (g/km)	$PM_{2.5}$ (g/km)
Petrol PC[1]	PRE-ECE	37.300	2.780	2.780	0.010	0.002	0.000	0.663	0.002
	EURO3	1.797	0.099	0.093	0.002	0.034	0.000	0.464	0.001
	EURO4	0.628	0.052	0.058	0.002	0.034	0.000	0.398	0.001
	EURO5/6	0.628	0.052	0.058	0.001	0.012	0.000	0.398	0.001
Diesel PC	EURO3	0.089	0.029	0.772	0.009	0.001	0.000	0.464	0.039
	EURO4	0.092	0.014	0.580	0.010	0.001	0.000	0.398	0.031
	EURO5	0.043	0.009	0.550	0.004	0.002	0.000	0.398	0.002
	EURO6	0.046	0.009	0.323	0.004	0.002	0.000	0.398	0.002
Petrol LCV[2]	Conventional	25.500	3.440	3.090	0.010	0.003	0.000	0.663	0.002
	EURO3	5.050	0.189	0.129	0.028	0.030	0.000	0.464	0.001
	EURO4	2.010	0.128	0.064	0.013	0.030	0.000	0.398	0.001
	EURO5/6	1.300	0.096	0.064	0.001	0.012	0.000	0.398	0.001
Diesel LCV	Conventional	1.340	0.133	1.660	0.000	0.001	0.000	0.663	0.356
	EURO3	0.473	0.094	1.030	0.009	0.001	0.000	0.464	0.078
	EURO4	0.375	0.035	0.831	0.009	0.001	0.000	0.398	0.041
	EURO5/6	0.075	0.035	0.496	0.004	0.002	0.000	0.398	0.001
Petrol HDV[3]	Conventional	59.500	5.250	6.600	0.006	0.002	0.000	1.990	0.000
Diesel HDV	Conventional	2.040	0.717	9.280	0.029	0.003	0.000	0.486	0.394
	EURO3	1.209	0.223	5.158	0.005	0.003	0.000	0.486	0.106
	EURO4	0.086	0.009	3.183	0.012	0.003	0.000	0.486	0.019
	EURO5/6	0.086	0.009	1.082	0.034	0.010	0.000	0.486	0.010
Busses	Conventional	5.710	1.990	16.500	0.029	0.003	0.000	2.650	0.909
	EURO3	2.670	0.409	9.380	0.001	0.003	0.000	0.861	0.207
	EURO4	0.223	0.022	5.420	0.012	0.003	0.000	0.265	0.046
	EURO5/6	0.223	0.021	1.800	0.036	0.010	0.000	0.265	0.024
Motorcycles	EURO2	7.170	0.900	0.317	0.002	0.002	0.000	0.221	0.014

Source: EEA [5] [1]Personal Cars [2]Light Commercial Vehicles [3]Heavy Duty Vehicles

$$E_{i,j} = \sum_k \left(N_{j,k} \times M_{j,k} \times EF_{i,j,k}\right) \quad (2)$$

Where E_i is as defined previously, $N_{j,k}$ is the total number of vehicles in country's vehicle fleet of category j and technology k; $M_{j,k}$ is the annual average distance driven per vehicle of category j and technology k [km/veh]; $EF_{i,j,k}$ is the technology-based emission factor of pollutant i for vehicle type j and technology k [g/veh-km]. This was estimated for the vehicle categories j including automobiles, heavy-duty vehicles, light commercial vehicles, and L-category vehicles. For each vehicle technology, the Tier 2 emission factors are provided in grammes per vehicle-kilometer. Table 1 contains technology and fuel-specific emission factors for NMVOC, CO, N_2O, NO_x, Pb, NH_3, CO_2 lube and $PM_{2.5}$. It is clear from Table 1 that newer vehicle types use less gasoline and emit fewer pollutants than older vehicle classes (such as PRE-ECE and EURO3).

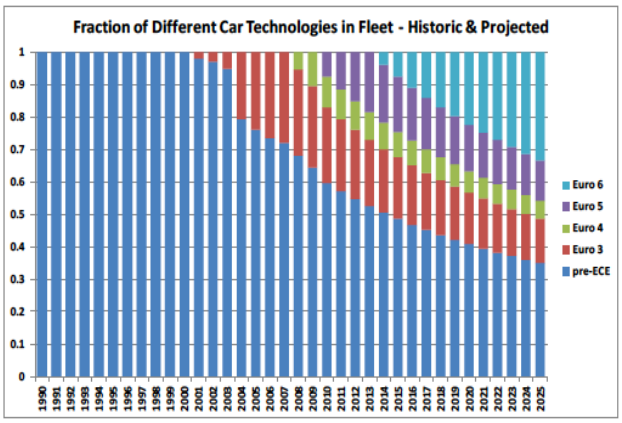


Figure 2. Road transport vehicle fleet characteristics in Türkiye, 1990-2025

The structure of the vehicle fleet is another factor needed to determine emissions per vehicle category. This is provided in Table 2 representing different classes for each vehicle category. More than 40% of cars are PRE-ECE, 17% are EURO3 and EURO6, and the remaining vehicles are EURO4 and EURO5, according to Table 2. (Figure 2).

Türkiye's percentage of diesel-powered vehicles has significantly expanded over the previous few decades, rising from 6.8% to 37% between 2005 and 2018. [5]. Diesel's contribution to road transportation's overall energy consumption rose from 56% in 2005 to 69% in 2015 [5]. The number of vehicles listed in Table 3 was multiplied by an average of 3,817 km for motorcycles, 13,107 km for automobiles, 28,172 km for light commercial vehicles, 50,114 km for heavy duty vehicles, and 50,141 km for buses to determine the total average vehicle kilometers for the year 2018 (see Turkstat vehicle statistics). Because the vehicle fleet structure data including diesel PC, petrol PC, diesel LCV, petrol LCV, diesel HDV, petrol HDV, motorcycle and bus is from the year 2018, total average vehicle kilometers were calculated for the year 2018 (Table 3). The data that was used to adopt emission factors is from EEA [5] and data on vehicle fleet structure and average vehicle kilometers is from EU-RTR Project [29] and TurkStat [32]. The latter data show the annual average vehicle kilometers on the road network for the year 2018. And the vehicle fleet structure represents the total number of different vehicle types given for the year 2018. 2018 data was used in the study as the vehicle fleet structure was provided with the given detail for the subject year comprising all petrol and diesel PC, LCV, HDV, bus and motorcycle (Table 2). Post-2018 data on vehicle statistics exist but does not classify the vehicle fleet structure as given in Table 2.

Table 2. Vehicle fleet structure in Türkiye, 2018

Class	Petrol PC	Diesel PC	Petrol LCV	Diesel LCV	Petrol HDV	Diesel HDV	Bus	Motorcycle
PRE-ECE	1487411	0	58489	106286	1283691	1003073	93965	-
EURO3	588046	1744332	23123	42020	0	396564	37149	-
EURO4	311319	1241462	12242	22246	0	209946	19667	-
EURO5	484273	1555756	19043	34605	0	326582	30593	-
EURO6	588046	1744332	23123	42020	0	396564	37149	-
Total	3459095	6285882	136020	247176	1283691	2332728	218523	3211328

Source: EU-RTR Project [29]; TurkStat [32]
Note: The EU-RTR Project (2012) is the data source for the classifications of Petrol PC and Diesel PC. Accordingly, the percentage distribution of PC classes are: PRE-ECE: 43%; EURO3: 17%; EURO4: 9%; EURO5: 14%; EURO6: 17%. The same percentage distribution was applied LCVs, HDVs and busses in order to redistribute the total vehicle number according to vehicle classes.

Table 3. Total average vehicle kilometres (thousand km) on the road network, Türkiye, 2018

	Petrol PC	Diesel PC	Petrol LCV	Diesel LCV	Petrol HDV	Diesel HDV	Bus	Motorcycle
PRE-ECE	19,495,494	0	1,647,741	2,994,282	64,330,877	50,268,009	4,711,494	-
EURO3	7,707,521	22,862,964	651,433	1,183,786	0	19,873,399	1,862,683	-
EURO4	4,080,452	16,271,839	344,876	626,710	0	10,521,211	986,127	-
EURO5	6,347,370	20,391,292	536,474	974,883	0	16,366,328	1,533,975	-
EURO6	7,707,521	22,862,964	651,433	1,183,786	0	19,873,399	1,862,683	-
Total	45,338,358	82,389,060	3,831,956	6,963,448	64,330,877	116,902,346	10,956,962	12,257,639

2.2 Economic valuation methods

In economic analysis, the health impacts born by the transport sector are considered as transport externalities. With the aid of Figure 3, the basics of road vehicle externalities can be explained.

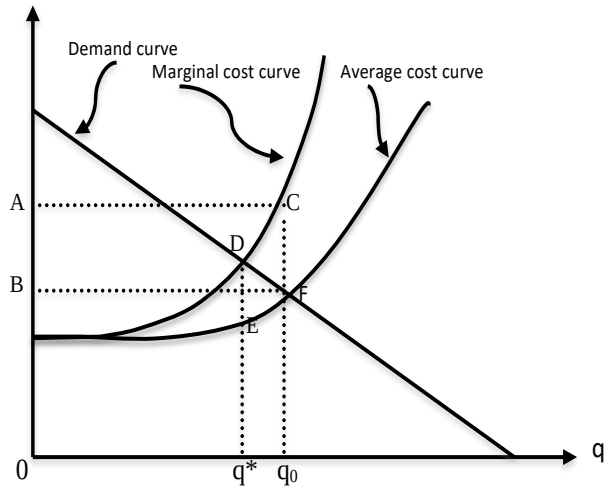


Figure 3. External costs of road transport

The figure shows the quantity of road usage on one axis and the unit cost of using the roads on the other. The unit cost of utilizing the road is a function of the demand curve D(q), which depicts the demand for its use. The average cost curve provides the costs that consumers incur when utilizing the road. The most important elements of this cost are travel time, perceived accident risks and other transport costs (e.g. fuel taxes). There are two types of externalities on the road network: externalities that are internal to road transport users (e.g. travel time, damage to road infrastructure, accident risks) and externalities external to road users (air and noise pollution, barrier effects etc.) that also affect the society as a whole. According to economic theory, the proper operation of a particular market is the single factor that determines whether expenses are internal or external [33] One of the key causes of market failure is external costs. Because of existence of the externalities, the social marginal costs will become higher. From the view of economic approach, there is a potential for efficiency improvement through the internalisation of externality costs, through regulatory measures, taxation and pricing schemes.

At F, when average cost and demand intersect with q_0 vehicle km driven in the zone and a unit cost of B, equilibrium will be reached. Beyond this point, using the road would cost the user more than it would benefit him/her, hence they would not use it. In this equilibrium, CF is the marginal social cost. Due to the additional vehicle on the road, the social marginal cost is equal to the individual cost plus the cost of the time spent by all other vehicles. Because of the externalities that are external to road users, the equilibrium at F is suboptimal. The optimal demand q* will be created by a highway toll or congestion fee equal to section DE. Point D where social marginal cost curve intersect with the demand curve is the optimal solution to the society.

Social marginal costs can be identified by deriving total user costs or experimentally by site observations or macro model simulations [33]. In order to assess the effectiveness of both new and current transportation networks, it is crucial to understand the monetary costs of the health impacts associated with transportation emissions that are borne by society. A monetary value has been attributed to these health impacts of air pollution through a number of studies in order to evaluate the proposed or implemented policy interventions. Three different types of methodologies that are commonly used for the valuation of externalities from transport emissions. These include: (a) the damage cost, (b) the avoidance cost and (c) replacement cost approaches [34]. These methodologies are explained briefly.

2.2.1 Damage cost approach

This method values the damage that is experienced by people as a result of the existence of externalities (such as the health impacts stemming from transport related noise and pollution resulting from transport vehicles). The two approaches used to value the external costs are willingness to accept (WTA) and willingness to pay (WTP), since market values for the experienced damage are not readily available. The Value of Statistical Life (VOSL) is the basis of the traditional methodology used to evaluate mortality or the risk of mortality. Individuals' willingness to pay (WTP) for a marginal decrease in the risk of premature mortality is summed up to determine the value of loss of life (VOSL), which is quantified at the societal level. Assume that each person has an expected utility function, denoted by 'EU', which links the utility of consuming over a specific time period, denoted by 'U(y)', and the risk of passing away during that time period, which is 'r':$EU(y,r) = (1 - r)U(y)$. The individual's WTP to keep the same expected utility as the amount of risk decreases from r to r' is the answer to the of the following equation: $EU(y - WTP, r') = EU(y,r)$; and VOSL is the marginal rate of substitution between consumption and death risk reduction such that $VOSL = \partial WTP/\partial r$.

2.2.2 Avoidance cost approach

The avoidance cost approach determines the cost to reach a policy target (e.g., greenhouse gas reduction targets), with a focus on external cost valuation elements (e.g., shadow pricing). An avoidance cost function is used to assess the cost of delivering an additional level of environmental quality (such as reducing an extra amount of carbon dioxide).

2.2.3 Replacement cost approach

The replacement cost method is primarily concerned with estimating the value of a potential externality given the costs of substituting the externality's negative effects. Given that there are no accurate estimates of damage or avoidance costs, this method is typically employed to value external costs. A person who has health problems experiences multiple losses of utility: Not only is there suffering or discomfort as a result of the sickness, but there is also a loss of consumption (and

leisure) time spent on mitigation activities for existing and prospective morbidity. The aggregate of three separate categories can be used to calculate the economic costs of the health impacts of air pollution: *1. Resource costs:* Direct non-medical and medical costs for treating the negative health impacts of air pollution, including additional costs; *2. Opportunity costs:* Related to the indirect expenses of lost productivity and/or leisure time as a result of health effects; *3. Disutility costs:* Related to the difficulty, pain, and concern brought on by the sickness.

In a recent study, EC [34] focused on the four types of impacts to assess the effects of transportation-related air pollution.: (1) health effects: exposure to air pollutants as nitrogen oxides (NOx), particles (PM2.5, PM10), and others is linked to a high risk of cardiovascular and respiratory disorders. These unfavourable health effects result in health care costs, reduced productivity at work, and even death (2) crop losses: Agricultural crops may be damaged by ozone and other acidic types of air pollutants (such as NO_x and SO_2), which could result in a decrease in crop production. (3) material and building damage: Two different types of damage to materials and structures can be brought on by air pollutants like SO_2 and NO_x. These are (a) particle and dust contamination of building surfaces (b) materials and building facades are harmed by corrosion processes brought on by acidic chemicals (4) biodiversity loss: the damage to ecosystems include (a) acidification of water, soil, and precipitation (e.g., NOx, SO2) (b) eutrophication of ecosystems and negative impacts on ecosystem services (NO_x, NH_3). These environmental damages may result in a decline in biodiversity. The costs of these damages can be calculated by using the response functions. Several studies express their findings in terms of relative risk (RR), which is the ratio of reported incidents at two various stages of exposure. To quantify damages, this RR needs to be translated into concentration response function, namely the exposure response function [35]. Some examples of RR estimates are provided in WHO [24] and EC [34].

Because the literature on the calculation of air pollution costs in Türkiye is scarce, I used the benefit transfer approach, which is targeted at transferring knowledge from previously researched situations to other locations where the information is lacking. This data is presented in Table 4, which shows the value of air pollution expenses from several studies. The benefit transfer strategy multiplies the unit values by the economic disparity between the policy nation and the study nation, which is given as (see [34])

$$WTP_{ps} = WTP_{ss}\left(\frac{I_{os}}{I_{ss}}\right)^{\varepsilon} \quad (3)$$

where WTP_{ps} is the WTP value transferred to the study area, WTP_{ss} is the WTP at the study area, I_{os} and I_{ss} are the income or economic output at other and study areas, and ε is the income elasticity of WTP. In terms of income elasticity, EC [34] advised a value of 0.8, which was also adopted in the current study. According to EC [34], the subject value is based on a comprehensive OECD meta-analysis in which the income elasticity of WTP for environmental and health-related commodities ranges between 0.7 and 0.9.

It has already been demonstrated that the level of efficiency for automobiles and light commercial vehicles in Türkiye is comparable to that of vehicles registered in European nations [36]. As a first attempt, the WTP values obtained for Poland [34] were transferred to the Turkish situation using the formula in eq. (3). Poland was selected as the reference country considering that both countries of Poland and Türkiye have shown similar trends for the GDP per capita in the post-1995 period (Figure 4). Regarding CO estimates, the value reported for Finland (see [10]) was transferred to the Turkish case using eq. (3) and inflated to 2018 prices.

Table 4. Estimates of air pollution costs from different studies

	EU-RTR [29]	EC-DG MOVE	EC [32]			HEATCO [10]	
	Türkiye*	**EU-average**	**EU-average**	**Poland**	**Türkiye****	**Finland**	**Türkiye*****
Pollutants	2010 prices (€)	2010 prices (€/tonne)	2016 prices (€/tonne)	2016 prices (€/tonne)	2018 prices (€/tonne)	2000 prices (€/tonne)	2018 prices (€/tonne)
CO	-	-	-	-	-	12.5	10.63
NMVOC	10	1566	1200	700	852	-	-
NO_x	2,278	10640	17000	11500	13987	-	-
NH_3	5,443	-	-	-	-	-	-
$PM_{2.5}$ (Urb)	-	270178	381000	282000	342999	-	-
$PM_{2.5}$ (Sub-Ur)	-	70258	123000	91000	110682	-	-
$PM_{2.5}$ (Rural)	-	28108	70000	52000	63247	-	-

*Marginal abatement costs
** Estimated using the benefit transfer approach, in which Poland 2016 values have been transferred to the Turkish context and then inflated to 2018 using CPI data from TurkStat [32] for the 2016-2018 period.
*** Estimated using the benefit transfer approach, in which Finland 2000 values have been transferred to the Turkish context and then inflated to 2018 using CPI data from TurkStat [32] for the 2016-2018 period.

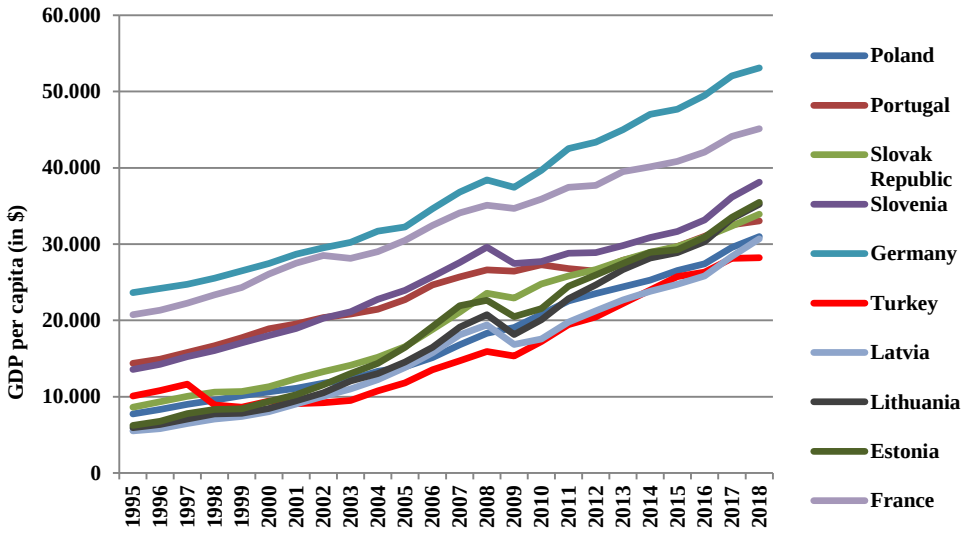


Figure 4. Comparison of GDP per capita across different European countries between 1995-2018 period

2.2.4 The valuation of CO_2 emissions

Fuel combustion accounts for 81% of greenhouse gas (GHG) emissions (CO_2), while agriculture is the main source of methane production. The social cost of carbon aims to assign a price on the physical harm that an additional tonne of GHG emissions will eventually cause. In order to lessen this harm in the future, society must be prepared to pay now. As a result, the social cost of carbon (SCC) is the fall in wellbeing caused by even a minor increase in carbon emissions [37]. The SCC estimations are extremely uncertain due to the unpredictability of future period emissions and climate change. Tol [38] reviewed numerous significant studies on climate change and estimated a median value of €4 and a mean value of €25 per tonne of carbon emissions released. These estimates, however, are cautious because the research only considers damage that can be quantified with an acceptable degree of certainty. Furthermore, longer floods and more frequently hurricanes with greater concentrations of energy are excluded since there is insufficient evidence to indicate a link between global warming and these effects [10].

As an alternative, HEATCO [10] cites research by Watkiss et al. [39] that developed shadow price values for carbon by taking into account projections of carbon's future development costs for damage and abatement. While avoidance cost estimates are centred on the UK state's long-term goal of reducing CO_2 emissions by 60% by 2050, damage costs were evaluated broadly. The latter is acknowledged to be consistent with the EU aim of keeping global warming to a growth of no more than 2°C over pre-industrial levels (HEATCO D5 [10]). Kuik et al.'s [40] meta-analysis work is widely recognized in the literature for confirming the significant diversity in SCC estimations. The study conducted by DEFRA [42] is cited by Kuik et al. [41] in the CASES Project as the most recent policy focused study on the estimation of social costs of carbon. It is highlighted that DEFRA [42] transparently integrates the findings from several Integrated Assessment Models (IAM), and the policy framework in which the values are used is clearly established.

The International Energy Agency (IEA) study, which provided a sub-2°C world scenario as stated by the Paris agreement, was cited in the World Bank Report [43]. The International Energy Agency (IEA) [44] produced specific scenarios for nine global regions in order to lessen reliance on imported fossil fuels, decarbonize power, improve energy effectiveness, and cut emissions in the industrial, transportation, and building construction sectors. The ETP 2012 2°C scenario investigates the technological possibilities for achieving a sustainable development centred on increased energy efficiency and a well-balanced energy system with a higher emphasis on the use of renewable energy sources and fewer air pollutant emissions. The 2°C scenario aims to reduce energy-related CO_2 emissions by more than half (relative to 2009) in 2050 and ensure that they keep decreasing after that. Regarding the 2°C scenario, carbon prices in 2030 rise to \$100/tCO_2 in the OECD countries and \$75/tCO_2 in Brazil, Russia, China and South Africa accompanied by a reduction in fossil fuel subsidies in the industrial and electricity sectors. The specifications on the IEA scenarios can be followed in IEA (2012). Table 5 presents global marginal abatement costs of CO_2 emissions from IEA [44] as cited by Hood [45].

Table 5. Global marginal abatement costs based on the IEA 2°C scenario (2012 prices)

Year of Emission	Values, \$/tCO_2
2010-2020	30-50
2020-2030	80-100
2030-2040	110-130
2040-2050	130-160

Source: IEA [44] as cited by Hood [45]

Table 6. Average pollutant concentrations for different transport vehicle category, Türkiye, 2018

Category	CO (tonne)	NMVOC (tonne)	NO_x (tonne)	N_2O (tonne)	NH_3 (tonne)	Pb (tonne)	CO_2 lube (tonne)	$PM_{2.5}$ (tonne)
Petrol Car	752,409.7	55,901.0	55,963.6	236.8	614.2	0.83	23,719.7	75.5
Diesel Car	5,460.3	1,254.3	45,684.0	530.1	121.3	1.50	34,299.8	1,482.0
Petrol LCV	47,544.6	5,949.5	5,273.7	40.7	48.8	0.01	2,004.8	6.4
Diesel LCV	4,969.2	607.0	7,781.3	24.9	9.9	0.03	3,643.1	1,186.4
Petrol HDV	3,827,687.2	337,737.1	424,583.8	386.0	122.2	0.38	128,018.4	0.0
Diesel HDV	130,595.1	40,848.0	641,665.7	2,887.5	596.3	1.17	56,814.5	22,487.1
Bus	32,853.4	10,230.7	106,670.4	272.6	55.9	0.19	15,250.7	4,795.4
Motorcycle	87,887.3	11,031.9	3,885.7	24.5	23.3	0.01	2,708.9	171.6

3 Results and discussions

3.1 Results from air pollution estimations

The mean concentrations of pollutants in tonnes for each vehicle type can be determined using vehicle fleet data (Tables 2 and 3) and emission factors computed for different road vehicle classes (Table 1), as shown in Table 6. Because there is no research on the distribution of transport emissions for the peak and off-peak periods, to disaggregate the average pollutant concentrations into peak and off-peak traffic periods, the ratios developed in the ExternE project and the rates provided by Casey [46] were used (see Apendix for the average traffic distributions).

The examples of the disaggregated average pollutant concentrations are shown in Table 7. Finally, the percentage distribution of pollutants is given in Figure 5. From Table 7, off-peak emissions are lower than peak emissions as expected for all the categories of air pollutants. CO and NMVOC emissions are the highest for petrol car, NO_x and $PM_{2.5}$ are the highest for bus, and NO_2 is the highest for diesel car. From Table 6, it can be noted that HDVs generate the highest levels of emissions including CO, NMVOC, NO_x, N_2O, CO_2 lube and PM. The passenger cars, on the other hand, produce high levels of NH_3 and Pb emissions. Diesel LCVs and motorcycles are generally associated with the lowest level of emissions.

From Figure 5, cars, LCVs and HDVs are responsible from the highest percentage of CO emissions, which is followed by NO_x and NMVOC. Regarding busses, NO_x emissions have the highest share that is followed by CO, CO_2 and NMVOC. In all vehicle categories, Pb and $PM_{2.5}$ have the lowest shares in the total concentration of pollutants.

However, it should be emphasized that the population's exposure to fine particles in Türkiye is higher than the averages for the EU and OECD, and that the costs of premature mortality due to exposure to outdoor PM2.5 and ozone have increased since 2005 [5, 48]. The main sources of $PM_{2.5}$ emissions are coal-based heating systems, particularly low-quality fuel and burning systems, and industrial and mobile sources [49]. Since there is no detailed data, these health impacts of $PM_{2.5}$ emissions at the local level were not analysed; however, based on the availability of data, this analysis can be conducted in the future.

3.2. Results from air pollution cost estimation

The data in Table 4 was coupled with mean pollutant concentrations calculated for each vehicle type in Table 5 in order to determine air pollution costs related to each different vehicle category. The findings are presented in Table 6 (see also Figure 6), Table 7 and Table 8 where upper and lower limit values represent the pollution costs valued at high and low prices. If there is single cost factor, the corresponding values are represented as average. Finally, the cost factor of $PM_{2.5}$ computed for sub-urban areas (Table 4) was used to compute the cost values of $PM_{2.5}$ in Table 7. From Table 7, it can be seen that the cost of CO, NMVOC, NO_x emissions are the highest for HDVs; and the cost of NH_3 and $PM_{2.5}$ are the highest for passenger cars as well as the diesel HDVs. In common, the emission costs are lower for the diesel vehicles compared to petrol vehicles. Diesel LCVs have the lowest cost estimated for CO, NH_3 and NMVOC; petrol LCVs have the lowest cost regarding NO_x, and petrol HDVs have the lowest cost regarding $PM_{2.5}$ emissions.

Table 7. Disaggregated emission concentrations for public and private vehicles, Türkiye, 2018

Category	CO (tonne)	NMVOC (tonne)	NO_x (tonne)	N_2O (tonne)	$PM_{2.5}$ (tonne)
Petrol Car-Peak	391,253.0	30,186.5	29,101.0	132.6	37.8
Petrol Car-Off-Peak	361,156.7	25,714.5	26,862.5	104.2	37.8
Diesel Car-Peak	2,839.4	677.3	26,039.9	296.8	933.7
Diesel Car-Off Peak	2,621.0	577.0	19,644.1	233.2	548.3
Petrol LCV-Peak	24,723.2	3,212.7	2,742.3	22.8	3.2
Petrol LCV-Off Peak	19,968.7	2,736.8	2,531.4	17.9	3.2
Diesel LCV-Peak	2,584.0	327.8	4,435.3	14.0	747.5
Diesel LCV-Off Peak	2,385.2	279.2	3,346.0	11.0	439.0
Bus-Peak	20,369.1	6,547.7	59,735.4	149.9	2,973.1
Bus-Off Peak	12,484.3	3,683.1	46,935.0	122.7	1,822.3

Note: Calculations are based on the information given in Table 6 and the ratios provided in Bickel et al. [47] and Casey [46]

Table 8. Estimated marginal air pollution costs (in cent€/km) for public and private vehicles in Türkiye, 2018

	CO		NMVOC			NO_x		NH_3	$PM_{2.5}$
	Average	Upper	Average	Lower	Upper	Average	Lower	Average	Average
Petrol Car	0.009	0.053	0.053	0.001	0.863	0.568	0.272	0.007	0.009
Diesel Car	0.000	0.001	0.001	0.000	0.388	0.255	0.122	0.001	0.100
Petrol LCV	0.007	0.066	0.067	0.001	0.962	0.633	0.304	0.007	0.009
Diesel LCV	0.000	0.004	0.004	0.000	0.781	0.514	0.247	0.001	0.943
Petrol HDV	0.032	0.224	0.227	0.003	4.616	3.036	1.456	0.001	0.000
Diesel HDV	0.001	0.038	0.039	0.001	9.898	6.510	3.123	0.007	2.745
Bus	0.002	0.040	0.040	0.001	6.808	4.478	2.148	0.003	2.422
Motorcycle	0.008	0.077	0.078	0.001	0.443	0.292	0.140	0.002	0.155

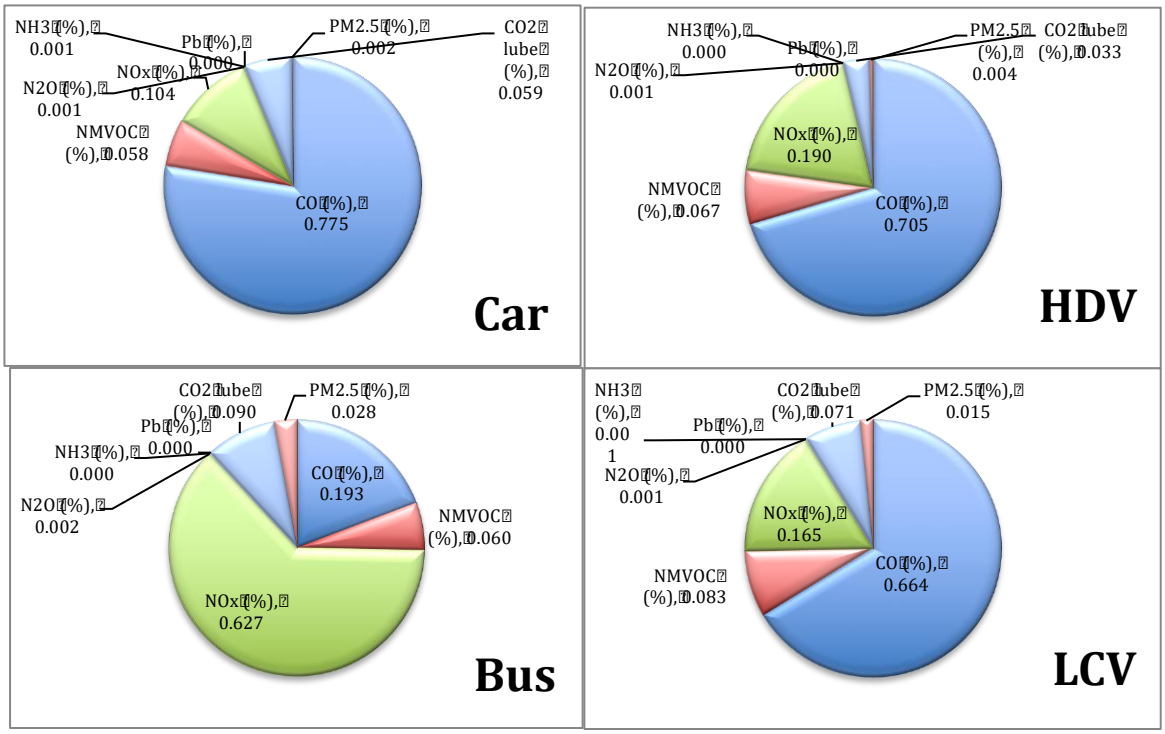


Figure 5. Percentage distribution of air pollutants across different vehicle categories (car, HDV, LCV, bus)

Table 9. Social costs of carbon, Türkiye (2018 prices)

Category	CO_2 (m tonnes)	Low values (€)	Central values (€)	High values (€)
Petrol Car	12.838	404,424,601	539,232,802	674,041,002
Diesel Car	18.565	584,817,754	779,757,005	974,696,257
Petrol LCV	1.009	31,805,919	42,407,892	53,009,865
Diesel LCV	1.834	57,797,853	77,063,803	96,329,754
Petrol HDV	27.184	856,321,758	1,141,762,344	1,427,202,930
Diesel HDV	12.064	380,035,291	506,713,721	633,392,152
Bus	6.473	203,915,071	271,886,762	339,858,452
Motorcycle	4.027	126,881,753	169,175,670	211,469,588

Table 10. Marginal social costs of carbon (in cents€/km), Türkiye (2018 prices)

Category	Low values	Central values	High values
Petrol Car	0.89	1.19	1.49
Diesel Car	0.71	0.95	1.18
Petrol LCV	0.83	1.11	1.38
Diesel LCV	0.83	1.11	1.38
Petrol HDV	1.33	1.77	2.22
Diesel HDV	0.33	0.43	0.54
Bus	1.86	2.48	3.10
Motorcycle	1.04	1.38	1.73

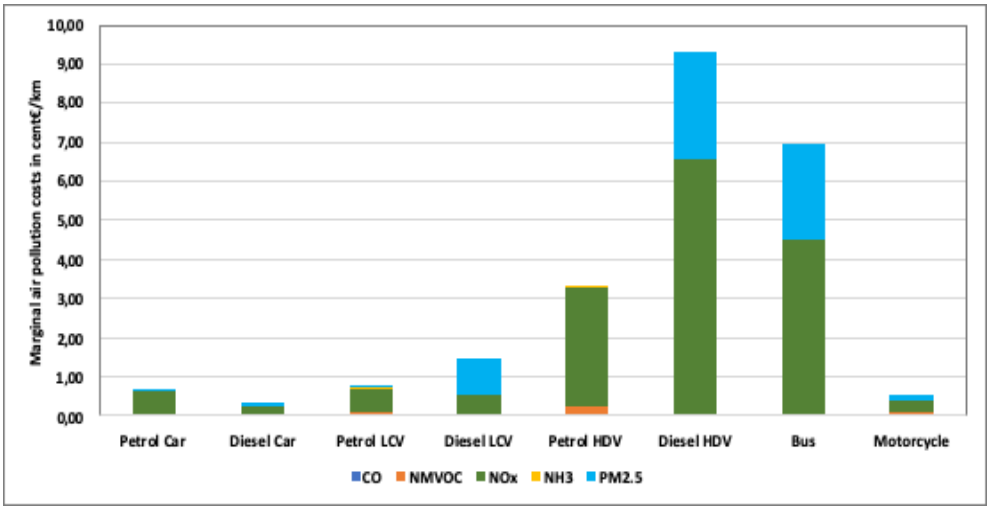


Figure 6. Air pollution costs across different vehicle categories (car, HDV, LCV, bus, motorcycle)

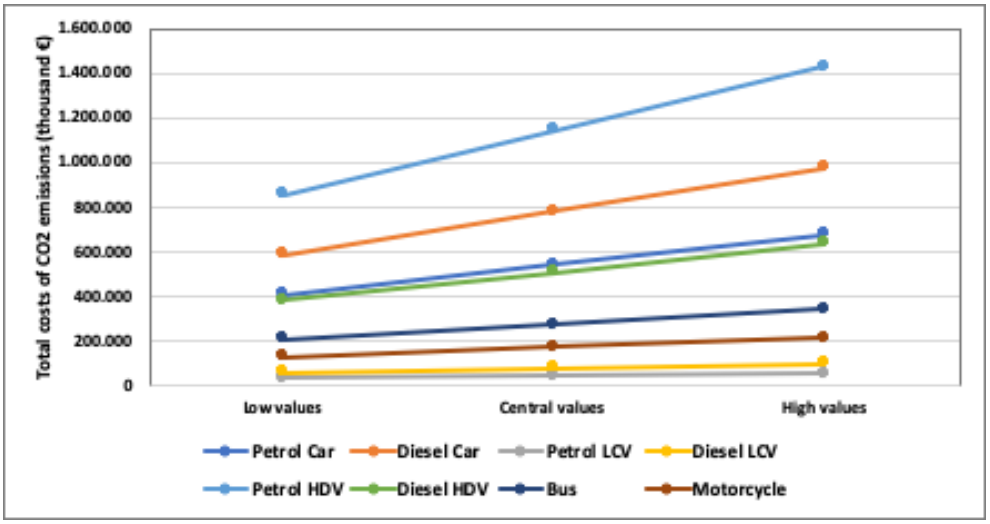


Figure 7. Social costs of carbon across different vehicle categories (car, HDV, LCV, bus, motorcycle)

For the evaluation of CO_2 emissions, a cost factor reflecting the global shadow value was used considering that greenhouse gas emissions have global environmental impacts such as ozone depletion and global warming. As presented in Table 5, carbon values derived by IEA [44] was utilised in the current analysis. These figures have been adjusted to 2018 World prices using OECD and non-OECD averages of general CPI information. In Türkiye, carbon dioxide emissions from transportation totalled 84.6 million tonnes in 2017 [48]. I utilized the % share distribution of CO2 lube in Table 6 for the breakdown of carbon dioxide emissions according to road vehicle type. Based on the CO_2 emissions computed for each vehicle category as given in the first column of Table 9 and shadow prices of carbon in Table 5, the values of CO_2 emissions in 2018 are computed in Tables 9 and 10. From Table 9 (see also Figure 7), the highest costs of CO_2 emissions were estimated for petrol HDVs followed by diesel car and petrol car and diesel HDVs. The lowest cost values were estimated for petrol and diesel LCVs.

4 Conclusions

Valuation of external costs of road transport emissions has become a key component in evaluating the socio-economic and environmental costs of air pollution as it enables evaluation of the effectiveness of cost-benefit analyses of pollution control methods and serves as a foundation for the development of an appropriate policy framework. It was found that the main air pollutants CO, NMVOC, NO_x, N_2O, CO_2 and PM are the emissions that are commonly associated with road vehicle transport in Türkiye. The air pollution may have different spatial impacts with excessive contamination on the highways and busy roads and slighter impacts on other sites. Therefore, the application of a bottom-up model would be more relevant in such a case for detailed assessment and estimation of peak and off-peak levels of air pollution for the identification of problematic sites that are prone to heavy traffic and significantly pollute the air.

There needs to be a validation of the current model by using a local data to understand whether there is

overestimation or underestimation of the modelled air pollutant concentrations. The reason may be the different sources of uncertainties that can be related to the structure of transport vehicle flows, the conditions of emission concentrations such as climatic factors (e.g. temperature, wind speed) and characteristics of road and the nearby landscape. Therefore, more detailed data would be essential for the estimation of many of the significant parameters. Among these, the data from an operational transportation model (e.g. vehicle flows, average vehicle speeds, vehicle kilometers), spatial distribution of population, the emission factors from different road vehicles can be prioritised. The development of such data at the local and national levels, investigation of local cost variables (such as valuation of air pollution at the local and global levels), and assessment of the effects of mitigation measures for externalities should all be the goals of future research. Due to the variety of road classes, road vehicles and vehicle kilometers, it might be claimed that the marginal external costs determined in the current study may be underestimated. Another reason may be the assumptions being made for the estimation of external costs undertaken in the study. The lack of data and research on the estimation of external costs of transport-related air pollution in Türkiye has limited the analysis of the current study. An in-debt examination of the externality effect assessments at the local/regional scale, as well as the compilation of disaggregated data for the model's inputs, will thereby improve the estimations of external costs of air pollution.

Acknowledgement

The research conducted as part of this study was generously funded by The Scientific and Technological Research Council of Türkiye (TUBİTAK) linked to BIDEB-2232 Programme, Project No. 118C002.

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 19%

References

[1] Commission of the European Communities. Green paper on the urban environment. European Commission, Brussel, 1990.

[2] P. Duffy, K. Black, P. O'Brian, B. Hyde, A. M. Ryan, J. Ponzi and M. S. Alam, National inventory report 2017, EPA, Ireland, 2017.

[3] Y. Van Fan, S. Perry, J. J. Klemes and C. T. Lee, A review on air emissions assessment: Transportation. Journal of Cleaner Production, 194, 673-684, 2018. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.151

[4] V. L. Boothe and D. G. Shendell, Potential health effects associated with residential proximity to freeways and primary roads: Review of scientific literature 1999-2006. Journal of Environmental Health, 70(8), 33-41, 2008. https://www.jstor.org/stable/26327596

[5] OECD. OECD Environmental performance reviews: Türkiye, OECD, Paris, 2019.

[6] L. Zhao, Y. Xie, J. Wang and X. Xu, A performance assessment and adjustment program for air quality monitoring networks in Shanghai. Atmospheric Environment, 122, 382-392, 2015. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.09.069

[7] UNITE (Unification of Accounts and Marginal Costs for Transport Efficiency). Funded by EU's 5th RTD Framework Programme. ITS, University of Leeds, UK. http://www.its.leeds.ac.uk/projects/unite, 2000.

[8] NEEDS. New Energy Externalities Development for Sustainability (NEEDS). Deliverable D4.2: Assessment of biodiversity losses: Econcept AG and ESU-services Zurich, Ulster, 2006.

[9] NEEDS. New Energy Externalities Development for Sustainability (NEEDS). Deliverable D6.7: Final report on the monetary valuation of mortality and morbidity risks from air pollution, University of Paris, Paris, 2007.

[10] HEATCO (Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment). Deliverable 5. Funded by 6th Framework Programme IER, Germany, 2004.

[11] CAFÉ. Clean air for Europe Programme (CAFE): Damages per tonne of $PM_{2.5}$, NH_3, SO_2, NO_x and VOC's of EU-25 Member State and surrounding seas. AEA Technology Environment, Didcot UK, 2005.

[12] ExternE. Externalities of Energy: Methodology 2005 update. EC, Luxembourg, 2005.

[13] K. Chen, M. Ni, M. Cai, J. Wang, D. Huang., H. Chen, X. Wang and M. Liu, Optimization of a coastal environmental monitoring network based on the kriging method: A case study of Quanzhou Bay, China. BioMed Research International, 2016. https://doi.org/10.1155/2016/7137310

[14] K. Z. Benis, E. Fatehifar, S. Shafiei, K. F. Nahr and Y. Purfarhadi, Design of a sensitive air quality monitoring network using an integrated optimization approach. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 30, 779-793, 2016. https://doi.org/10.1007/s00477-015-1189-z

[15] G. A. Giorgio, M. Ragosta and V. Telasca, Application of a multivariate statistical index on series of wheather measurements at local scale. Measurement, 112, 61-66, 2017. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.08.005

[16] A. Mofarrah and T. Husain, A holistic approach for optimal design of air quality monitoring network expansion in an urban area. Atmospheric Environment, 44, 432-440, 2010. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.07.045

[17] J. Zheng, X. Feng, P. Liu, L. Zhong and S. Lai, Site location optimization of regional air quality monitoring network in China: methodology and case study. Journal of Environmental Monitoring, 13, 3185-3195, 2011. https://doi.org/10.1039/C1EM10560D

[18] INFRAS/IWW. External costs of transport: Update study. INFRAS and IWW, Zurich/Karlsruhe, 2000.

[19] INFRAS/IWW. External costs of transport: Accident, environmental and congestion costs of transport in

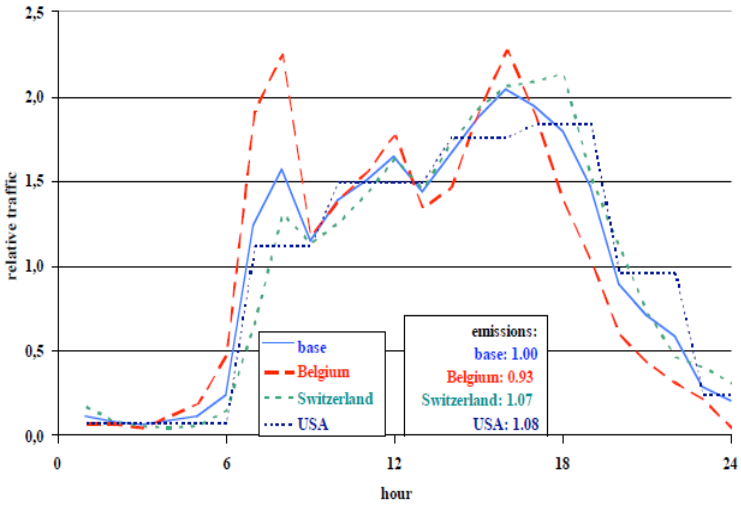
Western Europe. INFRAS and IWW, Zurich/Karlsruhe, 2004.
[20] WHO. Guidelines for community noise. S. I. WHO, Copenhagen, 1999.
[21] D. J. Carruthers, P. Dickson, C. A. McHugh, S. G. Nixon and W. Oates, Determination of compliance with UK and EU air quality objectives from high-resolution pollutant concentration maps calculated using ADMS-Urban. International Journal of Environment and Pollution, 16, 460-471, 2001. https://doi.org/10.1504/IJEP.2001.000641
[22] J. C. Chang and S. R. Hanna, Air quality model performance evaluation. Metheorology and Athmospheric Physics, 87, 167-196, 2004. https://doi.org/10.1007/s00703-003-0070-7
[23] M. Jerrett, A. Arain, P. Kanaroglou, B. Beckerman, D. Potoglou, T. Sahsuvaroglu, J. Morrison and C. Giovis, A review and evaluation of intraurban air pollution exposure models. Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology, 15, 185-204, 2005. https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500388
[24] WHO. Economic valuation of transport-related health effects: Review of methods and development of practical approaches, with a special focus on children. WHO, Copenhagen, 2008.
[25] Y. Sellier, J. Galineau, A. Hulin, F. Caini, N. Marquis et al., Health effects of ambient air pollution: Do different methods for estimating exposure lead to different results? Environment International, 66, 165-173, 2014. https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.02.001
[26] O. G. Conti, B. Heibati, I. Kloog, M. Fiore and M. Ferrante, A review of AirQ models and their applications for forecasting the air pollution health outcomes. Environmental Science and Pollution Research, 24, 6426-6445, 2017. https://doi.org/10.1007/s11356-016-8180-1
[27] IEA. Energy policies of IEA countries: Turkey 2016 review. International Energy Agency, France, 2016.
[28] CE Delft, INFRAS & Fraunhofer ISI. External costs of transport in Europe. CE Delft, Delft, 2011.
[29] EU-RTR. Technical assistance for improving emissions control. Final Report-Part II: Main Technical Results. PM Project number: 300424. Project co-financed by European Union and Republic of Turkey, 2012.
[30] EEA. Air pollution fact sheet 2014 Turkey. EEA, Copenhagen, 2014.
[31] EEA. EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook 2019. EEA, Copenhagen, 2019.
[32] TurkStat. Road vehicle statistics. http://www.tuik.gov.tr/, Accessed. 25 March, 2020
[33] CE Delft. Health impacts of costs of diesel emissions in the EU. CE Delft, Delft, 2018.
[34] EC. Handbook on the external costs of transport. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019.
[35] A. Rabl, J. Spadaro and M. Holland, How much is clean air worth? Calculating the benefits of pollution control. Cambridge University Press, Cambridge, 2014.
[36] P. Mock, IPC-mercator policy brief: Policy options to reduce emissions from the road transport sector in Turkey. Istanbul Policy Center, Sabancı University, Istanbul, 2016.
[37] R. S. J. Tol and S. Lyons, S. Incorporating GHG emission costs in the economic appraisal of projects supported by state development agencies. Working Paper 247. ESRI, Ireland, 2008.
[38] R. S. J. Tol, The marginal damage costs of carbon dioxide emissions: An assessment of the uncertainties. Energy Policy, 33(16), 2064-2074, 2005. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2004.04.002
[39] P. Watkiss, D. Anthoff, T. Downing, C. Hepburn, C.H.R. Hope, A. Hunt, A and R. Tol, The social cost of carbon (SCC) review-Methodological approaches for using SCC estimates in policy assessment. Final Report December 2005, DEFRA, UK, 2005.
[40] O. Kuik, L. Brander and R. S. J. Tol, Marginal abatement costs of carbon-dioxide emissions: A meta analysis. Working Paper 248, ESRI, Ireland, 2008.
[41] O. Kuik, L. Brander, N. Nikitina, S. Navrud, K. Magnussen and E. H. Fall, Report on the monetary valuation of energy related impacts on land-use changes, acidification, eutrophication, visual intrusion and climate change CASES (Cost Assessment of Sustainable Energy Systems) Funded by EU 6th Framework Programme, 2007.
[42] DEFRA. The social costs of carbon review-Methodological approaches for using SCC estimates in policy assessment. AEA Technology Environment, London, 2005.
[43] World Bank. Report of the high-level commission of carbon prices. The World Bank, Washington, 2017.
[44] IEA. Energy Technology Perspectives 2012 (ETP 2012), http://www.iea.org/etp/publications/etp2012, Accessed 16 April 2022
[45] C. Hood, Input to the high-level commission on carbon prices. Background paper for the Commission. EC, Brussels, 2017.
[46] E. Casey, Estimating Vehicular Emissions and Informing Air Quality Assessments for Dublin, Using Descriptions of Vehicle Activity. Unpublished PhD Thesis, University College Dublin, 2010.
[47] P. Bickel, S. Schmid, W. Krewitt and R. Friedrich, External costs of transport in ExternE. EC, Louxembourg, 1997.
[48] OECD. Air and climate: Greenhouse gas emissions from source. OECD Environment Statistics database, Paris, 2020.
[49] MEU. State of the environment report for Republic of Turkey. Ministry of Environment and Urbanisation: Ankara, Turkey, 2016.

Appendix

Table A1. Relative traffic distribution $ptf_{i,h}$ during the day

Hour	$Ptf_{i,h}$	Hour	$Ptf_{i,h}$	Hour	$Ptf_{i,h}$	Hour	$Ptf_{i,h}$
1	0.12	**7**	1.29	**13**	1.40	**19**	1.28
2	0.08	**8**	1.78	**14**	1.60	**20**	0.86
3	0.05	**9**	1.16	**15**	1.93	**21**	0.58
4	0.08	**10**	1.33	**16**	2.17	**22**	0.39
5	0.13	**11**	1.50	**17**	1.99	**23**	0.31
6	0.32	**12**	1.71	**18**	1.76	**24**	0.18
						average	1.00

Source: ARTEMIS (2007)



Source: ARTEMIS (2007)

Figure A1. Average Traffic Distributions (relative to the Hourly Average) Representative of 3 Countries, Belgium, Switzerland, USA, and Relative Base (Average) Distribution

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 169-175

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

The effect of basalt fiber reinforcement at different ratios on the unconfined compressive strength of kaolin

Farklı oranlardaki bazalt fiber takviyesinin kaolinin serbest basınç dayanımına etkisi

Yasemin Aslan Topçuoğlu[1,*], Zülfü Gürocak[2]

[1,2] *Fırat University, Geological Engineering Department, 23119, Elazığ Türkiye*

Abstract

There are many materials used for stabilization or reinforcement of low strength soils. While additives such as fly ash, lime, tuff, silica fume are preferred in stabilization works, fibers are used in reinforcement works. The use of fiber, which has emerged as an alternative to traditional methods, has become widespread. The most preferred fiber types in soil reinforcement are glass, carbon, polypropylene and basalt fibers. Basalt fiber, which is produced from basalt rock and widely distributed in nature, was chosen as a reinforcement material in this study, which is increasingly used due to its high strength, economic, environmentally friendly, natural and many other superior properties. The aim of this study is to examine the effects of basalt fiber ratio on strength in low plasticity kaolin clay reinforced with basalt fiber. For this purpose, unconfined pressure tests were carried out on cylindrical samples prepared by adding 6 mm long basalt fiber at different rates to clay and compressing it at optimum water content. In the samples reinforced with basalt fiber, the maximum strength was obtained from the sample which has 2 % basalt fiber ratio. It was determined that the strength decreased in samples with higher basalt fiber content.

Keywords: Basalt fiber, Reinforcement, Kaolin clay, Unconfined compressive strength

Öz

Dayanımı düşük olan zeminleri stabilize etmek veya güçlendirmek amacıyla kullanılan birçok malzeme bulunmaktadır. Stabilize çalışmalarında uçucu kül, kireç, tüf, silis dumanı gibi katkı malzemeleri tercih edilirken, güçlendirme çalışmalarında ise fiber kullanımı yaygınlaşmaktadır. Geleneksel yöntemlere alternatif olarak ortaya çıkan fiber kullanımı yaygınlaşmıştır. Zemin güçlendirmede en fazla tercih edilen fiber türleri ise cam, karbon, polipropilen ve bazalt fiberlerdir. Doğada çok geniş yayılım gösteren bazalt kayasından üretilen, dayanımı yüksek, ekonomik, çevre dostu, doğal ve daha birçok üstün özelliğinden dolayı günümüzde kullanımı artan bazalt fiber bu çalışmada takviye malzemesi olarak seçilmiştir. Bu çalışmanın amacı, bazalt fiber ile güçlendirilen düşük plastisiteli kaolin kilinde bazalt fiber oranının dayanıma olan etkilerinin incelenmesidir. Bu amaçla 6 mm uzunluğundaki bazalt fiberin kile farklı oranlarda eklenmesi ve optimum su içeriğinde sıkıştırılmasıyla hazırlanan silindirik örneklerde serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bazalt fiber ile güçlendirilen örneklerde maksimum dayanım % 2 bazalt fiber katkı oranına sahip örnekte elde edilmiştir. Bazalt fiber oranının daha fazla olduğu örneklerde ise dayanımın azaldığı belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Bazalt fiber, Güçlendirme, Kaolin kili, Serbest basınç dayanımı

1 Introduction

New engineering materials are rapidly taking their place in different areas of use depending on the rapid technological progress and needs. One of the new products in geotechnical applications is artificial fibers and it has gained importance in recent years as an alternative to traditional methods. Ekincioğlu [1] defines fibers as materials that can be found naturally or can be produced by humans, with one dimension much larger than the other, and with a higher strength and modulus of elasticity than the larger shape of the same material.

There are two types of fiber, natural and artificial. Recently, artificial fibers are preferred because of their high strength, light weight, flexibility and resistance to environmental effects [2]. One of the newest artificial fibers is basalt fiber (BF) produced from basalt rock, which has attracted attention in recent years. Basalt, which is widely used in volcanic areas and preferred because of its durability with easy access, is also the raw material of BF. In addition, interest in basalt fibers is increasing day by day because of its high chemical resistance, resistance to microorganism effects and high temperature, and no additives are used during its production.

Looking at the studies on BF, it is possible to see that most of these studies are on soil reinforcement with BF and the optimum BF length-additive ratio. As a matter of fact,

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: yaslan@firat.edu.tr (Y. Aslan Topçuoğlu)
Geliş / Recieved: 30.08.2023 Kabul / Accepted: 13.11.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngmuh.1352665

Gao et al. [3] stated that the BF ratio, which has the highest soil strength in clay, was 0.25 % and the fiber length is 12 mm.

Ndepete and Sert [4] used BF as reinforcement in a silty soil. In the study, it was determined that the fiber length with maximum strength was 24 mm and the fiber ratio was 1.5 %.

Gisymol and Ramya [5] determined that the greatest increase in strength of organic soil occurred with the addition of 10 mm fiber at the rate of 0.05 % and after 28 days of curing.

Boz et al. [6] stated that the maximum strength increase occurred with the use of 9 % lime and 0.75 % of 19 mm long BF in high plasticity kaolin clay and a 90-day cure.

Kenan and Özocak [7] defined that 1.5 % fiber additive was the most appropriate ratio in a silty soil. Pandit et al. [8] determined that the maximum dry unit volume weight value increased, while the optimum water content value decreased with the use of 4 % BF.

Küçükosmanoğlu [9] used BF of different lengths (6, 12, 24 mm) and different proportions (2.0, 1.5, 1.0, 0.20, 0.15, 0.10, 0.05 by weight) as reinforcement in a low plasticity clay soil. According to the experimental study results, it was determined that the fiber ratio, which had the least swelling and maximum bearing capacity ratio (CBR), was 0.20 % and its length was 6 mm.

Ocakbaşı [10] stated that the highest strength values were obtained in the samples prepared with the addition of 2 % and 24 mm in length BF.

Kale et al. [11] in their experimental study on basalt fiber added soil, they determined that the maximum dry unit volume weight of the soil increased and the optimum water content value decreased with basalt fiber additive. They also stated that the undrained shear strength of the soil increased with the addition of basalt fiber and that the fiber content that provided the maximum improvement in strength was 3 %.

Sungur et al. [12] determined that shear strength increased with increasing the length of 1.5 % BF in clayey soil up to 15 mm, but shear strength decreased with larger fiber lengths.

Terzi [13] conducted experimental studies by adding BF at different rates (0, 1, 1.5, 2, 2.5 % by weight) and different lengths (6, 12, 24 mm) to high plasticity clay. The researchers determined the maximum cohesion value in a 12 mm long sample reinforced with 1.5 % BF. They determined the maximum internal friction angle in a 24 mm long sample with 2 % BF reinforcement.

Xu et al. [14] prepared samples with three different fiber lengths and four different fiber ratios in low plasticity loess and conducted experimental studies. According to the test results, it was stated that the shear strength of loess improved significantly if the maximum fiber ratio was 0.6 % and the fiber length was 12 mm.

Zhao et al. [15] examined the reinforcing effect of BF and polypropylene fiber on low plasticity clay. In the study, it was stated that the effect of fibers on strength came mainly from their improving effect on cohesion, but the fiber did not contribute much to the increase in the internal friction angle. It has been stated that the maximum improvement in strength can be achieved by using 0.2 % of 10-13 mm long fiber.

Saran and Demiröz [16] carried out unconfined pressure and splitting tensile experiments on the samples they prepared by adding BF and fly ash to high plasticity clay. Researchers achieved the maximum increase in strength with 1 % BF reinforcement and 10 % fly ash additive in 18 mm length and after 56 days of curing.

Gürocak and Aslan Topçuoğlu [17] carried out experimental studies in kaolin clay, in which water and BF were added in different ratios. They indicated that the maximum unconfined compressive strength was obtained by adding 25 % water at the rate of 1 % BF.

By adding fiber to a clay soil, fiber and soil particles interact with each other and limit each other. A single small fiber in the soil is surrounded by soil particles, and the soil and fiber particles come into contact with each other, creating an interface force [18]. When the basalt fiber content is quite low, the fiber spacing is wide, the intersection between fiber – soil columns is difficult, and therefore the fiber and soil cannot form an effective fiber – soil network. As the fiber content gradually increases, the fiber spacing decreases, which makes adjacent fiber – soil columns easily intersect to form an effective fiber – soil network. When the fiber content is high, many fiber filaments are collected in clusters in the soil sample due to electrostatic interaction, making it difficult to distribute the fibers properly. Thus, the excess of fibers reduces the effect of fiber reinforcement. Figure 1 shows model of fiber and soil column – net [3].

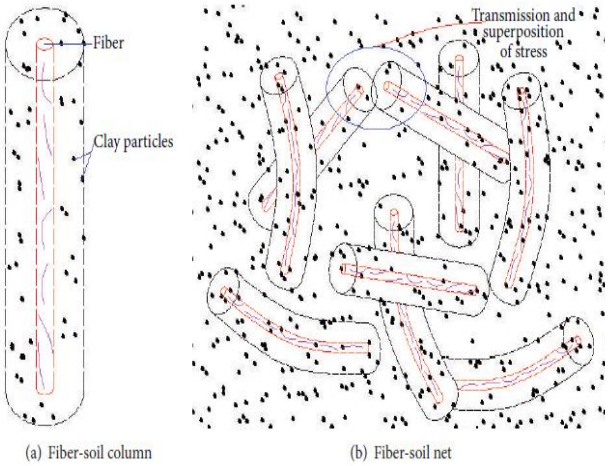


Figure 1. Model of fiber and soil column – net [3]

The aim of this study is to determine the changes in the unconfined compressive strength of the soil reinforced with BF at different rates and optimum BF ratio. The results of the study will contribute to future studies on the use of BF in soil reinforcement.

2 Material and method

In this study, kaolin clay (K) was used as the clayey soil, and BF, which has increased in use in recent years and still needs to strengthen the database with new studies, was used as the reinforcement material.

2.1 K and BF

Kaolin is a clay group, the main mineral of which is kaolinite, formed as a result of in situ weathering of granite and other igneous/volcanic rocks. Kaolinite ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) is the most important mineral that forms the raw material of kaolin, a white, plastic, grain size 2 µm soft clay type, and it has aluminum hydrosilicate composition [19]. In this study, pure K produced in Balıkesir - Sındırgı (Turkey) clay quarry was used (Figure 2).



Figure 2. The K used in the study

BF is obtained from a natural material called basalt, which is a dark-colored and fine-grained volcanic rock. Basalt, a hard and dense rock commonly found around the world, is of igneous origin and melts when heated like thermo-plastic materials [20]. The fact that it is economical, abundant and natural in nature and durable has been remarkable in the use of BF for soil reinforcement. The BF used in the study was obtained from the company that sells fiber and is 6 mm long (Figure 3).

2.2 Experimental studies

Laboratory experiments in this study were carried out in Firat University, Department of Geological Engineering, Rock-Soil Mechanics Laboratory. In the first stage, liquid limit, plastic limit and standard proctor tests were performed in K. In the second stage, different ratios of BF were added to K and compressed at optimum water content. Finally, unconfined compressive strength tests were carried out on the prepared samples.

2.2.1 Liquid and plastic limit tests

At this stage of the laboratory studies, a total of 10 tests were carried out according to the [21] standard to determine the LL and PL values of unreinforced K. According to the test results, the average LL value was 45 %, the PL value was 24 %, and the PI value was calculated as 21 %. The clay used in the study is in the low plasticity (CL) clay class according to the Unified Soil Classification (USCS) (Table 1).

Table 1. Consistency limits of K and proctor test results

Parameters	Values
LL (%)	45
PL (%)	24
PI (%)	21
Soil class (USCS)	CL
w_{opt} (%)	25.00
γ_{kmax} (kN/m^3)	13.01
Fines Content (FC, %)	100

2.2.2 Standard proctor tests

The optimum water content (w_{opt}) of K was determined by standard proctor tests according to [22]. The test is carried out by releasing a 2.5 kg load to free fall on the soil from a height of 30.5 cm and compressing the soil in three layers in the formwork. According to the results of the standard proctor test, the w_{opt} value of kaolin clay was determined as 25.00 % and the γ_{kmax} value was determined as 13.01 kN/m^3 (Table 1).

2.2.3 Sample preparation

In the sample preparation stage, the K passed through the sieve no. 200 was dried in an oven at 105 ºC for 24 hours and mixed with a mixer by adding BF (by dry weight), which was separated with the help of a compressor (Figure 3). During the mixture preparation process, distilled water was sprayed into the mixture and mixed again with the help of a mixer (Figure 4). Manual mixing was also applied in order to ensure that the distribution of the fibers in the soil is homogeneous and to prevent fiber aggregation and agglomeration. The mixing time was set at 10 minutes. Fiber ratios in a total of 5 different mixtures created by adding BF at different rates are given in Table 2. This mixture with BF added is compressed at optimum water content.



Figure 3. Unseparated (a) and separated (b) BF used in the study



Figure 4. Preparation of K and BF mixtures

Table 2. BF ratios of the mixtures used in experimental studies

BF length (mm)	BF rate (%)	Samples
6	0	K
	1	K + 1 % BF
	2	K + 2 % BF
	3	K + 3 % BF
	4	K + 4 % BF
	5	K + 5 % BF

2.2.4 Unconfined compressive tests

In order to determine the unconfined compressive strength (q_u) of the samples, unconfined compression tests were carried out on cylindrical soil samples whose length is twice the diameter and the q_u values of samples were determined. Experiments were carried out on 30 samples according to [23] standard (Figure 5).

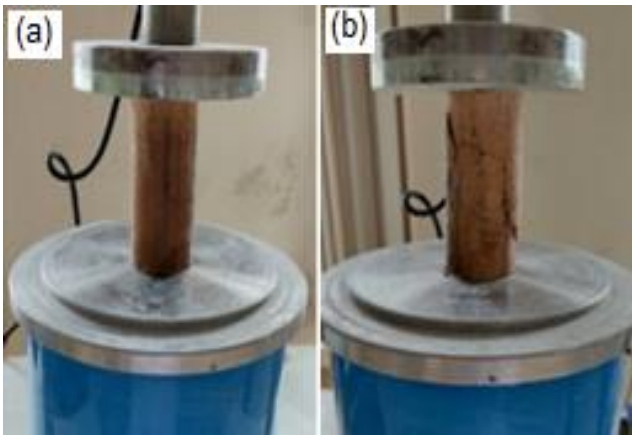


Figure 5. Sample before unconfined compressive test (a) and after test (b)

According to the results of unconfined pressure tests, the average q_u value of unreinforced clay was determined as 294.08 kPa. It was determined that the average q_u values of BF reinforced samples varied between 501.11 – 854.16 kPa (Table 3).

Some examples of experimental studies are given in the Figure 6.



Figure 6. Samples used in laboratory studies

Table 3. Minimum, maximum and average q_u values of unreinforced and reinforced samples

Samples	q_u (kPa)		
	Min	Max	Avrg.
K	280.76	311.25	294.08
K + 1 % BF	581.41	606.84	593.09
K + 2 % BF	846.74	863.14	854.16
K + 3 % BF	711.02	741.66	726.43
K + 4 % BF	562.99	600.02	581.41
K + 5 % BF	485.25	513.21	501.11

The stress - strain graphs of the unconfined compressive strength test performed on each mixture of unreinforced clay and BF reinforced mixtures are shown in Figure 7.

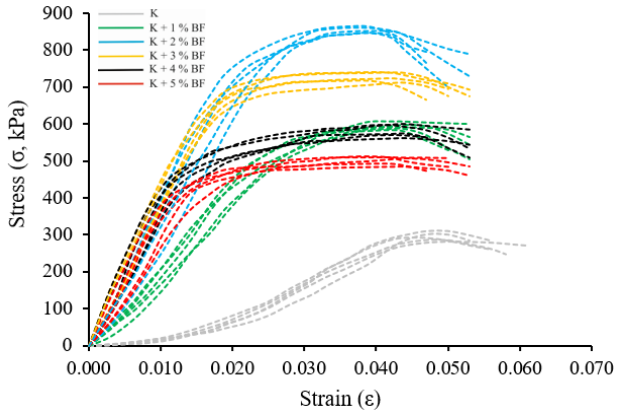


Figure 7. Stress – strain curves of unreinforced K and BF reinforced samples

Maximum stress (σ_{max}), strain (ε) and percentage of axial deformation of unreinforced and reinforced samples are given in Table 4. The unit length change in unreinforced K is 5.29 %. In reinforced samples, it is between 0.036 % and 0.044 %, and the lowest value was determined in the K + 2 % BF sample (Table 4).

Table 4. σ_{max}, ε, % ε values of unreinforced clay and BF reinforced samples

Samples	σ_{max}	ε	ε (%)
K	311.25	0.050	5.29
K + 1 % BF	606.84	0.042	4.41
K + 2 % BF	863.14	0.036	3.70
K + 3 % BF	741.66	0.039	4.06
K + 4 % BF	600.02	0.044	4.59
K + 5 % BF	513.21	0.039	4.06

Mohr graphs of unreinforced clay and BF reinforced samples are shown in Figure 8.

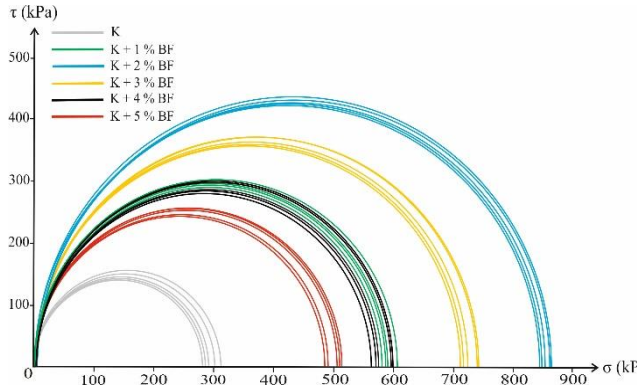


Figure 8. Mohr graphs of unreinforced clay and BF reinforced samples

3 Findings and discussion

The changes in the unconfined compressive strength of the unreinforced and BF reinforced samples were determined with experimental studies. The average q_u value of unreinforced K was determined as 294.08 kPa. The q_u values of the clay showed a significant increase for all ratios of BF. The maximum q_u value was determined as 854.16 kPa in the K + 2 % BF sample, and the lowest q_u value was 501.11 kPa in the K + 5 % BF sample. It was determined that q_u values increased until 2 % BF ratio, but decreased at higher BF ratios (Table 5, Figure 9).

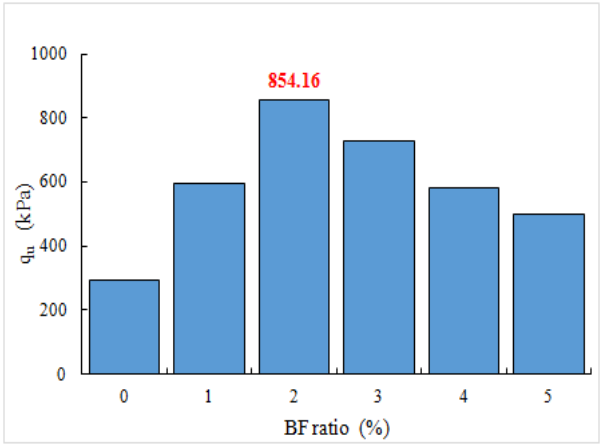


Figure 9. The relation of q_u - BF ratio of unreinforced and reinforced clay samples

The increases in the q_u values of the samples were 101.68 % in the 1 % BF sample, 190.45 % in the 2 % BF sample, 147.02 in the 3 % BF sample, 97.70 % in the 4 % BF sample, and 70.40 % in the 5 BF sample, respectively (Table 5, Figure 10).

According to all these data, it is possible to say that the optimum BF ratio in reinforced samples compressed at the optimum water content of unreinforced kaolin clay is 2 %.

Table 5. Percentages of change in the q_u values of the samples

BF length (mm)	Sample name	q_u (% change)
6	K	-
	K + 1 % BF	101.68
	K + 2 % BF	190.45
	K + 3 % BF	147.02
	K + 4 % BF	97.70
	K + 5 % BF	70.40

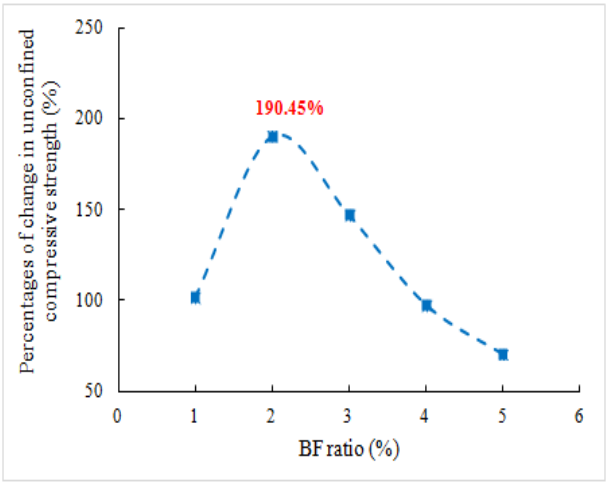


Figure 10. Relation of change percentages of q_u - BF ratio in samples

The q_u value of the clay increased up to the 2 % BF ratio, but after the 2 % BF ratio, the q_u values decreased. The reason for this can be explained as the fiber accumulation caused by the increased fiber ratio in the soil and the difficulty encountered in distributing the fiber homogeneously within the soil [3, 9, 12, 13]. When the fiber ratio in the soil is high, electrostatic interaction occurs between the fibers and the fibers that are not homogeneously dispersed in the soil are collected in clusters and thus the strength is reduced [3].

When studies on BF in the literature are examined [4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17] it is seen that the type, plasticity, water content and BF length of the soil have a significant effect on the optimum BF ratio.

In studies conducted on low plasticity clays [9, 11, 12, 14, 17] it is seen that the optimum BF ratio varies between 0.2 and 3 % depending on the BF size. It can be said that the optimum 2 % BF rate determined in this study is compatible with the literature.

4 Results

The results of this experimental study, which was carried out to determine the optimum BF ratio in the reinforcement of low plasticity clayey soils, are briefly summarized below.

The average strength value of unreinforced K was determined as 294.08 kPa and the average q_u values of BF reinforced samples vary between 501.11 – 854.16 kPa in the unconfined pressure tests. The q_u values increased with BF reinforcement at all BF ratios.

It is possible to say that the BF ratio that provides the highest increase in the q_u value for BF reinforced kaolin compressed at the optimum water content of unreinforced kaolin is 2 % (190.45 % increase).

In the BF – reinforced samples, q_u values increased up to 2 % BF, but more BF reinforcement caused a decrease in the q_u values. It can be said that the reason for this is fiber agglomerations due to the increased fiber ratio.

The data revealed in this study will contribute to the studies on the use of BF, which is natural, environmentally friendly and abundant in nature, which has attracted a lot of attention in recent years.

In applications where BF will be used, it should not be forgotten that BF size, water content, soil type and plasticity have a significant impact on the optimum BF ratio for successful reinforcement.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 7 %

References

[1] Ö. Ekincioğlu, Mechanical Behavior of Cement Based Composites Reinforced with Hybrid Fibres-An Optimum Design. Master Thesis, Istanbul Technical University Institute of Science and Technology, 2003.

[2] M. Aral, Mechanical behavior of cement based composites with hybrid fibres-an optimum design. Master Thesis, Istanbul Technical University Institute of Science and Technology, 2006.

[3] L. Gao, G. Hu, N. Xu, J. Fu, C. Xiang and C. Yang, Experimental study on unconfined compressive strength of basalt fiber reinforced clay soil. Advances in Materials Science and Engineering, 1-8, 2015. https://doi.org/10.1155/2015/561293.

[4] C.P. Ndepete S. Sert, Use of basalt fibers for soil improvement. Acta Physica Polonica, 130(1), 355-356, 2016. https://doi.org/10.12693/ APhysPolA.130.355.

[5] PG. Gisymol and K. Ramya, A study on the effect of basalt fiber in organic soil. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), 14(4), 13-17, 2017.

[6] A. Boz, A. Sezer, T. Özdemir, G.E. Hızal, O. Azdeniz Dolmacı, Mechanical properties of lime-treated clay reinforced with different types of randomly distributed fibers. Arabian Journal of Geosciences, 11(122), 1-14, 2018. https://doi.org/10.1007/s12517-018-3458-x.

[7] A. Kenan and A. Özocak, Effect of basalt fiber addition on shear strength of silty soils. International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management, 918-924, 2018.

[8] V. M. Pandit, C. Rohit, K. Tushar, C. Ayushi, G. Bhushan and C. Deepali, Study of basalt fiber on compaction characteristics of black cotton soil. 6th International Conference on Recent Trends in Engineering & Technology (ICRTET), 850-853, 2018.

[9] M. Küçükosmanoğlu, Use of basalt fiber in soil improvement. Master's thesis, Sakarya University, Sakarya, 2019.

[10] P. Ocakbaşı, The Effect of Basalt Fiber Addition on Undrained Shear Strength of Clayey Soils. Master Thesis, Sakarya University Institute of Science and Technology, 2019.

[11] R. Y. Kale, ND. Dahake, SM. Sahu, GA. Gawande, PJ. Wailker, VR. Patekar and CR. Pawar, Soil stabilization by using basalt fibers. International Journal of Scientific Research & Engineering Trends, 6(3), 1931-1935, 2020.

[12] A. Sungur, MF. Yazıcı and SN. Keskin, Experimental research on the engineering properties of basalt fiber reinforced clayey soil. European Journal of Science and Technology Special Issue, 28, 895-899, 2021. https://doi.org/10.31590/ejosat.1011881.

[13] S. Terzi, Contribution of basalt fiber to shear strenght of clayey soils. Master's thesis, Sakarya University, Sakarya, 2021.

[14] J. Xu, Z. Wu, H. Chen, L. Shao, X. Zhou, S. Wang, Triaxial shear behavior of basalt fiber-reinforced loess based on digital image technology. KSCE Journal of Civil Engineering 25(10), 3714-3726, 2021. https://doi.org/10.1007/s12205-021-2034-1.

[15] N. Zhao, H. Wu, Z. Huang, Strength behavior of red clay reinforced by basalt chopped fiber. Arabian Journal of Geosciences, 14, 2021. https://doi.org/ 10.1007/s12517-020-06275-w.

[16] O. Saran, A. Demiröz, Investigation of basalt fiber and fly ash use in soil stabilization. Konya Journal of Engineering Sciences, 10(2), 495-511, 2022. https://doi.org/10.36306/konjes.1103582.

[17] Z. Gürocak and Y. Aslan Topçuoğlu, The effect of basalt fiber use on the unconfined compressive strength of low plasticity clay. Gümüşhane University Journal of Science and Technology, 13(3), 608-701, 2023. https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1283148.

[18] C. Tang, B. Shi, W. Gao, F. Chen and Y. Cai, Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. Geotextiles and Geomembranes, 25(3), 194-202, 2007.

[19] MTA-Maden Tetkik Arama. (2023, August, 28). https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/img/kaolen.pdf.

[20] H. Jamshaid and R. Mishra, A green material from rock: basalt fiber-a review. The Journal of the Textile Institute, 107(7), 923-937, 2015. https://doi.org/10.1080/00405000.2015.1071940.

[21] ASTM D4318-17e1, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. https://doi.org/10.1520/D4318-17E01.

[22] ASTM D698-12e2, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012. https://doi.org/10.1520/D0698-12E02.

[23] ASTM D2166M-16, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. https://doi.org/10.1520/D2166-06.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 176-187

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

3B yazıcıda üretilen plakaların sürtünme karıştırma kaynak parametrelerinin YSA ile tahmini

Estimation of friction stir welding parameters of 3D printed sheets using ANN

Nergizhan Anaç[1], Oğuz Koçar[2,*], Erhan Baysal[3]

[1,2] *Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 67100, Zonguldak, Türkiye*
[3] *Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Alaplı Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 67850, Zonguldak, Türkiye*

Öz

Bu çalışmada 3B yazıcı kullanılarak PLA Wood (Ahşap katkılı polilaktik Asit) ve PLA-CF (karbon fiber katkılı polilaktik Asit) filamentlerden plakalar basılmıştır. Hazırlanan plakalar SKK metodu kullanılarak birleştirilmiştir. SKK metodunda işlem parametreleri farklı karıştırıcı uç geometrisi (kare, üçgen ve vida), takım ilerleme hızı (20, 40 ve 60 mm/dk) ve takım dönme hızı (1250, 1750 ve 2250 dev/dk) olarak seçilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen veri seti (54 deney) yapay sinir ağlarının eğitim ve testi için kullanılmıştır. YSA modelinin optimizasyonu için eğitim algoritması, transfer fonksiyonu ve gizli katmandaki nöron sayısı değiştirilerek 30 model oluşturulmuştur. Modellerin eğitim ve test sonuçları istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak en iyi tahmin modelinde (trainlm, nöron sayısı 14 ve tansig) eğitim sonucu %99, test sonucu %96 doğrulukla yapılmıştır. YSA modelinin eğitim ve test sonuçları, YSA'nın SKK metodunda işlem parametrelerinin değerini tahmin etmek için kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Eklemeli imalat, 3B yazdırma, Dolgu takviyeli filament, Sürtünme karıştırma kaynağı, Yapay sinir ağları (YSA)

Abstract

In this study, sheets were printed from PLA Wood and PLA-CF filaments using a 3D printer. The prepared sheets were welded using the FSW method. The process parameters were selected as different mixed tip geometries, tool feed rate, and rotational tool speed. The data set obtained from the experiments was used to train and test artificial neural networks. To optimize the ANN model, 30 models were created by changing the training algorithm, transfer function, and the number of neurons in the hidden layer. The training and test results of the models were statistically evaluated. As a result, in the best prediction model (trainlm, number of neurons 14 and tansig), the training result was 96% accurate and the test result was 99% accurate. The training and testing results of the ANN model show that ANN can be used to estimate the value of process parameters in the FSW method.

Keywords: Additive manufacturing, 3D printing, Filler reinforced filament, Friction stir welding, Artificial neural networks (ANN)

1 Giriş

Termoplastik malzemelerin kolay işlenebilirlik, hafiflik, dayanıklılık ve geri dönüşüm gibi özelliklerinden dolayı kullanımları her geçen gün artmaktadır. Parçalarda ağırlığı azaltmak için metal malzeme yerine geçmeleri sayesinde mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda (özellikle otomobil sektöründe) yaygın olarak tercih edilmektedirler [1]. Ayrıca, son yıllarda 3B yazıcı teknolojisindeki gelişmeler bu yöntemin sarf malzemesi olan termoplastik filamentlere ilginin artmasını sağlamıştır. Bu yüzden, yeni termoplastik malzemelerin geliştirilmesine ve mevcut malzemelere dolgu (karbon fiber, cam elyaf lifleri vb) katılarak özelliklerinin iyileştirilmesine çalışılmaktadır. Fakat 3B yazıcılardaki yazıcı tablalarının boyutsal sınırlılığı, büyük parçaların üretiminin çok parçalı yapılması ve parçaların sonradan bir araya getirilerek tamamlanması zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır. Bu durum daha geniş ele alındığında; benzer veya benzer olmayan termoplastiklerin birleştirilmesi için inovatif ve güvenli yöntemler geliştirilmesi veya hâlihazırda bilinen yöntemlerin etkinliğinin arttırılması gerekmektedir [2].

Plastik malzemelerin birleştirilmesinde mekanik birleştirme, yapıştırma ve kaynak yöntemleri, malzemelerin uzun zamandır kullanılan üç temel yöntemdir. Mekanik birleştirmede yer alan ilave parçaların sisteme fazladan yük getirmesi, yapıştırma işleminde yapıştırıcıların termal ve mekanik zorlamalar karşısındaki düşük performansları bu yöntemlerin dezavantajlarıdır. Plastik malzeme kaynak uygulamalarında ise geleneksel metal malzeme kaynak tekniklerinden farklı yönler bulunmaktadır. Plastiklerde kullanılan kaynak yöntemleri titreşim kaynağı [3], lazer kaynağı [4], sürtünme kaynağı [5], sürtünme karıştırma nokta kaynağı [2], dikiş kaynağı, ultrasonik kaynak, yüksek frekans kaynağıdır. Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) özellikle farklı malzemelerin kaynak edebilmesi, yüksek verimlilik, enerji tasarrufu ve çevre dostu olmasıyla dikkat çekmektedir [6]. Günümüzde, sürtünme karıştırma kaynağının polimerlerin birleştirilmesindeki uygulamaları önemli ölçüde artmıştır [7]. SKK, 1991 yılında İngiliz

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: oguz.kocar@yahoo.com.tr (O. Koçar)
Geliş / Recieved: 11.05.2023 Kabul / Accepted: 15.11.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngmuh.1295673

Kaynak Enstitüsü'nde (TWI) W. Thomas tarafından icat edilen bir katı hal kaynağıdır [8]. SKK yönteminde; omuz ve karıştırıcı uç geometrisine sahip pimden oluşan bir takım, kaynak çizgisi boyunca belirlenen bir hızda ve devirde ilerlemektedir. Bu sırada takım omuzu ve parça arasındaki sürtünmeden oluşan ısı, kaynak bölgesinin plastikleşmesine sebep olurken, karıştırıcı uç ise malzeme akışını sağlayarak birleştirme işlemini gerçekleştirir [9, 10].

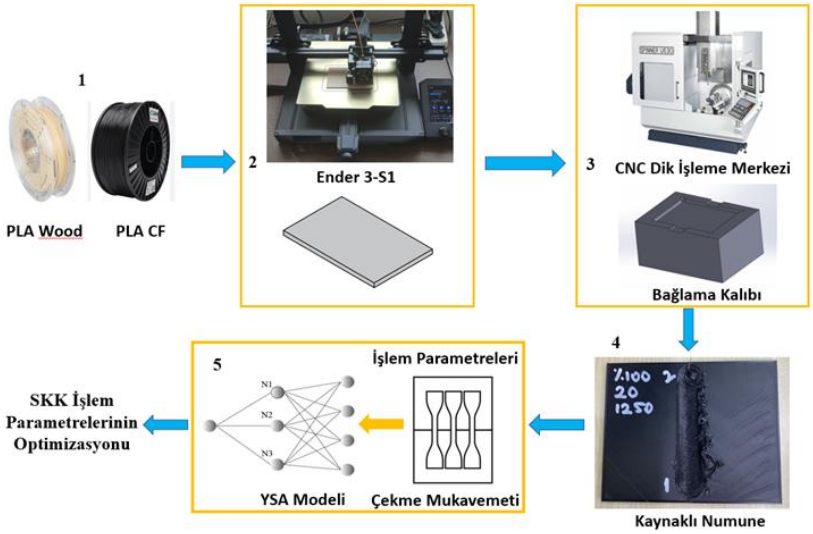
SKK işleminde malzeme çeşidi ve işlem parametreleri (takım uç geometrisi, takım omuz geometrisi, takım eğim açısı, kaynak hızı, takım dönme hızı, takım eğim açısı), kaynak kalitesi ve üretim verimliliği üzerinde doğrudan etkilidir. Bu nedenle, doğru işlem parametrelerinin belirlenmesi, başarılı bir kaynak sürecinin anahtarıdır. SKK yönteminde işlem parametreleri takım ilerleme ve dönme hızı, takım omuz şekli, karıştırıcı uç profili, takım ve omuz batma derinliği, takım eğim açısı, ilk dalma hızı ve bekleme süresi olarak sıralanabilir. Bunun yanında kullanılan malzemenin özellikleri de (erime sıcaklığı, mikro yapı ve mekanik özellikler) bilinmelidir. Fakat, hali hazırda işlem parametrelerinin belirlenmesi deneme yanılma yöntemi ile yapılmaktadır. Bu deneme yanılma yöntemi, hem zaman hem de malzeme israfına neden olmaktadır. Bu tür doğrusal olmayan tahmin problemlerinin çözümünde yapay sinir ağları (YSA) modeli sıklıkla kullanılmaktadır. YSA, işlem parametreleri ve kaynak kalitesi arasındaki ilişkinin belirlenmesi için matematiksel bir model oluşturarak çalışmaktadır. Oluşturulan model esnek olduğu için yeni veriler eklenerek tahmin alanı genişletilebilir. Tablo 1'de SKK yöntemi kullanılarak birleştirilen termoplastik malzemeler ve kullanılan işlem parametreleri yer almaktadır.

Tablo 1 incelendiğinde kaynak kalitesinin belirlenmesi için farklı birçok işlem parametresi değerinin kullanıldığı görülmektedir. Genel olarak SKK'nın endüstriyel ve akademik uygulamalarında işlem parametrelerinin malzemeye göre deneme yanılma yöntemi kullanılmaktadır. Bu durum işlemin hem uzun sürmesine hem de maliyetinin artmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple uygun parametrelerin daha kısa sürede belirlenmesi için yeni yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır. YSA modeli kullanılarak yapılan bu çalışma, SKK için daha hızlı ve doğru bir şekilde parametrelerin tahminine dayanmaktadır.

Yapılan bu çalışmada; 3B yazıcıda PLA-CF (karbon fiber katkılı) ve PLA Wood (ahşap katkılı) filamentlerden basılan levhalar SKK metodu ile birleştirilmiştir. SKK işlemi için üç farklı karıştırıcı uç geometrisi (üçgen, kare ve vida), takım ilerleme hızı (20, 40 ve 60 mm/dk) ve takım dönme hızı (1250, 1750 ve 2250 dev/dk) olarak kullanılmıştır. Kaynak kalitesinin belirlenmesi için, SKK işlemi sonrası çekme numuneleri elde edilmiştir. Daha sonra SKK işlem parametrelerinin daha hızlı ve doğru belirlenebilmesi için yapay sinir ağları (YSA) modeli oluşturulmuştur. YSA modeli dört nöronlu giriş katmanı (SKK işlem parametreleri) ve tek nöronlu çıkış katmanından (kaynak kalitesi) oluşmaktadır. YSA modelinin optimizasyonu için üç farklı eğitim algoritması, iki farklı transfer fonksiyonu ve gizli katmandaki nöron sayıları değiştirilmiştir. Modeller istatiksel olarak değerlendirilmiştir. YSA'nın kaynak kalitesini tahmin etme kabiliyeti tartışılmıştır. Bu çalışma ile SKK metodunda işlem parametrelerinin hızlı ve doğru belirlenmesi için alternatif bir metot önerilmiştir.

2 Materyal ve metot

Yapılan çalışmada PLA-CF ve PLA Wood plakalarının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi gerçekleştirilmiş ve kaynak performansı incelenmiştir. Şekil 1'de çalışmanın genel akış şeması verilmiştir. Filament olarak temin edilen PLA-CF ve PLA Wood (1) malzemeler 3B yazıcı ile plaka şeklinde (2) basılmıştır. Daha sonra sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi kullanılarak plakalar birleştirilmiştir (3-4). Kaynak kalitesini belirlemek için üç tekrarlı çekme testleri yapılmış ve YSA modeli oluşturulmuştur (5). YSA modelinin giriş katmanı; SKK işlem parametrelerinden (malzeme çeşidi, karıştırıcı uç profili, takım ilerleme hızı ve takım dönme hızı), çıkış katmanı ise kaynak kalitesinden oluşmaktadır. Deneyler, YSA modelinin SKK işlem parametreleri ve kaynak kalitesi arasındaki ilişkiyi tahmin etme kabiliyeti üzerine tasarlanmıştır.



Şekil 1. Genel akış şeması

Tablo 1. Literatürden SKK yöntemi kullanılarak birleştirilen malzeme ve işlem parametreleri

Malzeme	Takım ilerleme hızı (mm/dk)	Takım dönme hızı (dev/dk)	Karıştırıcı uç geometrisi
HDPE [11]	45,75,115	1500, 2000, 3000	Silindirik
HDPE [12]	15	1200-2000	Silindirik
PLA [13]	20, 30, 40	700, 1400, 2000	Silindirik, vida ve konik
PLA/Al [14]	20, 30, 40	800,1100, 1400	Silindirik
PLA [15]	10, 14, 20	800, 1400, 2000	Konik pin
PLA [16]	3, 6, 9	600, 1000, 1400	Kesik koni ve silindirik
PE [17]	16, 29, 44	900, 1280, 1700	Vida M10, M12, M14
HDPE [18]	20, 40, 63	500, 710, 1000, 1400, 2000	Silindirik
PE-PP [19]	8, 10, 12.5	900, 1860, 2920	Vida, kare, üçgen, düz ve silindir
PP [20]	8	2000	Kare, konik vida, dört ağızlı vida

2.1 Filament malzemeleri

3B yazıcılarda sarf malzemeleri olarak genel kullanım amacıyla PLA (polilaktik asit), ABS, PETG gibi filamentler, mühendislik işleri veya daha özel sektörlerin kullanımı için ise farklı çeşitlerde kompozit filamentler bulunmaktadır.

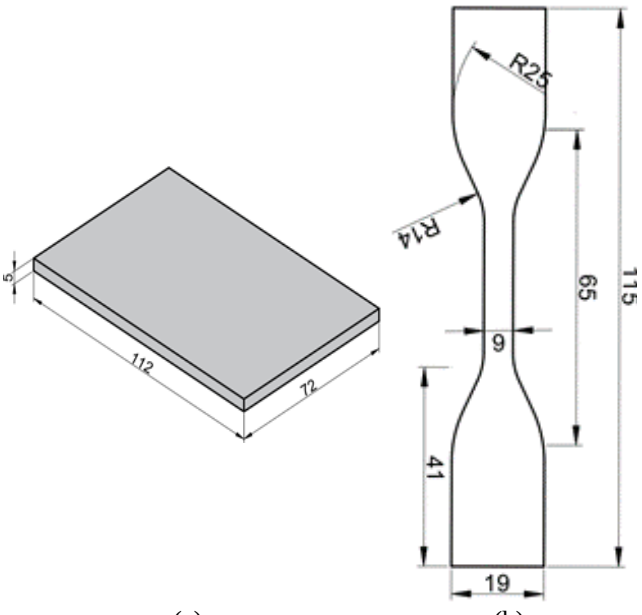
PLA; hem filamenti oluşturan ana malzeme olarak hem de içerisine dolgu eklenmesi sayesinde geliştirilebilir olması sebebiyle çok tüketilen bir malzemedir. PLA filamentler; düşük sıcaklıklarda basılması, tabla ısıtmasına ihtiyaç duyulmaması ve baskı sırasında oluşabilecek hataların azlığı nedeniyle tercih edilmektedirler. PLA; mısır, patates, şeker kamışı vb. yenilebilir kaynaklardan üretilebilen organik bir malzeme olduğu için insan sağlığına zararsızdır ve belli şartlarda doğada ayrışabilen biyopolimerlerdendir [21-23]. Bu özelliklerinden dolayı petrol bazlı polimerlere (polipropilen (PP), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), polistiren (PS) ve poliamid (PA)) alternatif olarak kullanılmaktadır [24, 25]. PLA filamentler, farklı uygulamalarda kullanılabilmesi için çeşitli dolgu malzemeleri eklenerek modifiye edilmektedir. Eklemeli imalatta sarf malzeme olarak kullanılan filamentlerin çeşitleri her geçen gün artmaktadır. SKK metodunda kaynak kalitesini etkileyen fazla sayıda parametre olduğu ve eklenen her parametre ciddi sayıda deney sayısını arttırdığı için yapılan çalışma malzeme olarak PLA-CF ve PLA Wood ile sınırlandırılmıştır. Bu çalışmada, karbon fiber katkılı PLA (PLA-CF) ve ahşap katkılı PLA (PLA Wood) olmak üzere iki kompozit termoplastik filament kullanılmıştır. PLA-CF filament, karbon lif takviyeli (%15) PLA kompozit filamenttir. Ana matris içinde yer alan karbon lifler kristalleşmeyi iyileştirerek sade PLA'ya kıyasla daha iyi mekanik ve termal özellikler göstermesine olanak sağlamaktadır [22, 26]. PLA Wood ise, %30 oranında ağaç lifi (çam, sedir, bambu, meşe ve zeytin vb.) içeren kompozit PLA filamenttir. Düşük mukavemetine rağmen doğal görünümü ve ahşap hissi vermesinden dolayı özellikle görselliğin önemli olduğu mimari ve ev dekorasyon modelleri ürünlerinde tercih edilmektedir [27]. PLA-CF ve PLA Wood filamentlerin özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Filamentlerin teknik özellikleri

Mekanik Özellikler	PLA-CF[28]	PLA-Wood[29]
Çap ölçüsü (mm)	1.75	1.75
Marka	Filameon	Filameon
Renk	Siyah	Açık Kahverengi
Çekme Mukavemeti (MPa)	55	47
Yoğunluk (g/cm^3)	1.23	1.13

2.2 Deney numunelerinin üretimi

Deneylerde, eriyik yığma modelleme prensibi ile çalışan Ender 3-S1 3B yazıcı kullanılarak SKK için 72x114x5 mm ölçülerinde plakalar (Şekil 2a) ve filamentlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için ASTM D638-10 [30] standartlarına uygun numuneler (Şekil 2b) basılmıştır. PLA-CF ve PLA Wood numunelerin baskı parametreleri sırasıyla; nozul sıcaklığı 215/220 ºC, tabla sıcaklığı 65/65 ºC, basım hızı 45/50 mm/sn ve basım yönü XYZ olarak kullanılmıştır. Numuneler, katman kalınlığı 0.2 mm ve %100 doluluk oranında basılmıştır. Her malzeme için 5 adet çekme numunesi basılarak çekme mukavemetlerinin ortalaması alınmıştır.



(a) (b)

Şekil 2. SKK kaynağı plaka ve çekme numune ölçüleri (mm)

2.3 Sürtünme karıştırma kaynağı işlemleri

SKK yönteminde malzeme çiftlerinin birleştirilmesinde kaynak kalitesi işlem parametrelerinden doğrudan etkilenmektedir. Kaynak kalitesini etkileyen başlıca işlem parametreleri takım ilerleme hızı [31], takım dönme hızı [32-34], takım omuz şekli [35], karıştırıcı uç geometrisi [36, 37] ve eğim açısı [38] olarak sıralanabilir. İşlem parametreleri kaynak bölgesinde sürtünmeden kaynaklı üretilen ısı miktarı

ve malzeme akışı üzerinde önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle işlem parametrelerinin doğru belirlenmesi çok önemlidir. Hali hazırda işlem parametreleri deneme yanılma yöntemi ile belirlenmektedir. Bu yapılan çalışmada da iki farklı malzeme, üç karıştırıcı uç profili, üç takım ilerleme hızı ve üç takım dönme hızı belirlenmiştir. Kullanılan işlem parametreleri Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'teki değişkenlere göre 54 tane deney gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3. SKK işlem parametreleri

Malzeme	Uç profili	Takım ilerleme hızı (mm/dk)	Takım dönme hızı (dev/dk)
PLA-CF	Üçgen	20	1250
PLA-Wood	Kare	40	1750
	Vida	60	2250

Numunelerin SKK ile birleştirilmesi için 22 kW motor gücü, max. 12000 dev/dk, kesici takım hareket mesafesi 465x530 mm ve tabla ölçüsü ø650 mm olan Spinner U630 CNC dik işleme merkezi kullanılmıştır. Şekil 3a' da sabit alınan omuz batma derinliği (1 mm), karıştırıcı uç batma derinliği (4.5 mm), Şekil 3b'de karıştırıcı uç geometrileri ve ölçüleri verilmiştir. Şekil 3c'de karıştırıcı uç giriş-çıkış noktaları, kaynak yönü ve kaynak kalitesinin belirlenmesinde kullanılan çekme numunelerinin çıkarıldığı yerler gösterilmiştir. Çekme numuneleri EBH marka lazer kesim tezgahında (100 W güç ve 8 mm/s kesme hızında) kesilmiştir. Çekme testleri 3 tekrarlı olarak yapılmış ve ortalama değerleri alınmıştır.

2.4 YSA tabanlı tahmin metodolojisi

SKK Yapay sinir ağı (YSA), insan beyninde bilgi işleme sistemini oluşturan nöron hücrelerinin ve bunlar arasında kurulan sinaptik bağlantı yapısını esas alan öğrenme modelidir [39]. YSA, bilgi nöronlar üzerinde dağıtılır ve paralel işlem yaparak karmaşık problemleri hızlı ve verimli bir şekilde çözme yeteneğine sahiptir. Nöronlar arasındaki bağlantılar sinyalleri iletir ve her bağlantının bir ağırlık değeri vardır. Her bir nöronun ağ çıktısını elde etmek için, nöronun ağ girdisini bir aktivasyon fonksiyonundan geçirerek elde ettiği varsayılır [40, 41]. Böylece ortaya çıkan ağ, öğrenme, hafızaya alma ve veriler arasındaki ilişkiyi matematiksel bir modele dönüştürme yeteneğine sahip olur. YSA, tanımlanan girdi bağımsız değişkenleri ve çıktı bağımlı değişkeni arasında bir genelleme yaparak matematiksel model oluşturmaktadır. Genellemenin doğruluğunun kontrol edilmesi için, test amaçlı değişkenler ağa verildiğinde, modelden elde edilen çıktı değerlerinin istenilen değerler arasındaki % hata oranı kontrol edilir [42]. Şekil 4'te YSA'nın genel yapısı verilmiştir. YSA giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanı olarak üç ana bölümden oluşmaktadır. Girdi katmanı problemin doğasına göre belirlenmektedir. Yapılan çalışmada bağımsız değişken olarak malzeme, karıştırıcı uç geometrisi, takım ilerleme hızı ve takım dönme hızı seçildiğinden dolayı giriş katmanı dört nörondan oluşmaktadır. Gizli katman sayısı ve gizli katmandaki nöron sayısı deneme yanılma yoluyla belirlenmektedir [43]. Çıkış katmanı ise bağımlı değişken olan kaynak kalitesini temsil etmektedir. Veriler, giriş katmanı dışarıdan verildikten sonra rastgele ağırlıklarla çarpılarak toplama fonksiyonundan geçirilerek gizli katmana aktarılır. Aynı işlemler gizli katmanda tekrarlanarak çıkış katmanına yönlendirilir. Algoritma tahmin değeri ile deneysel sonuçları karşılaştırır. Aradaki hata oranı kabul edilebilirse algoritma sonlandırılır. Hata oranı kabul edilemez ise işlem başa dönerek tekrar ettirilir.

YSA ağ yapısı beş temel unsur içerir: girdi değerleri (Xn), ağırlıklar (Wn), sabit değer (b), toplama fonksiyonu (Σ), aktivasyon fonksiyonu (f(Σ)) ve çıktı (y). Bir yapay sinir sisteminin öğrenme kabiliyeti, seçilen algoritma dahilinde ağırlıkların uygun şekilde ayarlanmasına bağlıdır. YSA modelinin mimarisi, modelin bilgi akışını, genel yapısını ve dolayısıyla tahmin yeteneğini etkilemektedir [44]. Nöron çıktısı Denklem (1) ile hesaplanır:

$$y_j = f\left(\sum_{i=1}^{n} W_{j,i} + b_j\right) \tag{1}$$

Çok katmanlı bir perceptron modeli olan ileri beslemeli sinir ağları, bilginin girdi katmanından ağa yayılmaya başladığı ve çıktı katmanına doğru sadece tek bir yönde hareket ettiği en yaygın kullanılan YSA mimarisidir [45]. Çok katmanlı algılayıcı modelinin yaygın olarak kullanılmasının nedeni doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesinde iyi sonuçlar vermesidir [45, 46]. Yapılan çalışmada, girdi katmanında dört nöron (malzeme, karıştırıcı uç profili, takım ilerleme hızı ve takım dönme hızı) ve çıkış katmanı tek nöron (kaynak mukavemeti) bulunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan YSA modeli ileri beslemeli/çok katmanlı algılayıcı özelliğine sahip olup, hata kriteri olarak ortalama karesel hata (MSE) ve çıkış katmanı transfer fonksiyonu olarak "purelin" kullanılmıştır. YSA modelinin optimizasyonu için gizli katmandaki nöron sayısı, giriş/gizli katmandaki transfer fonksiyonu ve eğitim fonksiyonu değiştirilmiştir. YSA modelinde kullanılan algoritmalar ve fonksiyonlar Tablo 4'te ve açıklamaları Tablo 5'te verilmiştir.

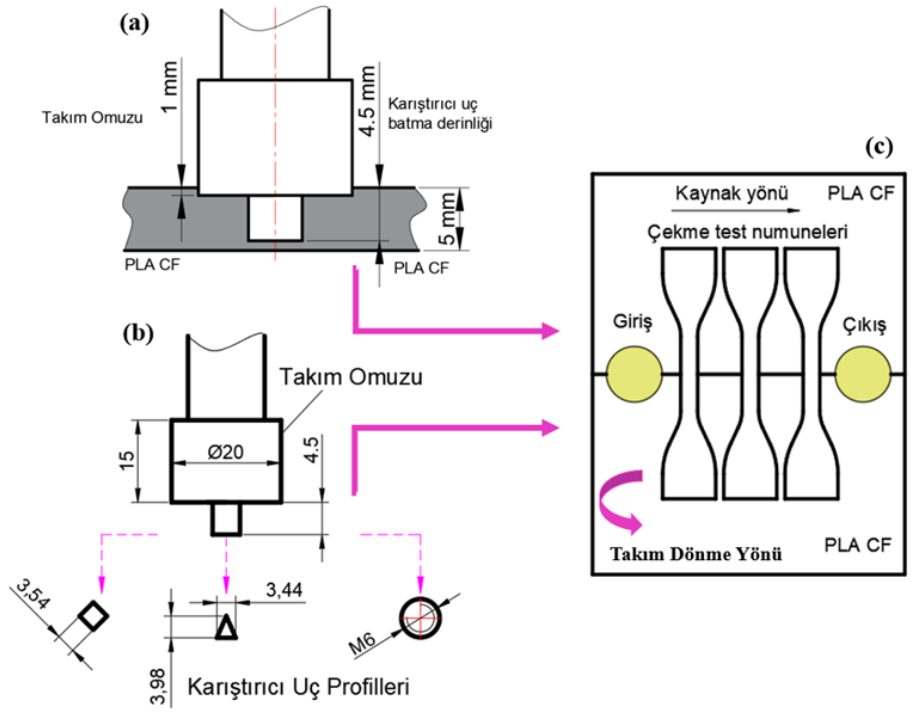
Tablo 4. YSA modelinde kullanılan değişkenler

Eğitim Algoritması	Giriş/Gizli Katman Transfer Fonksiyonu	Çıkış Katman Transfer Fonksiyonu	Gizli Katmandaki Nöron Sayısı
Trainlm Trainrp Traingda	Tansig, Logsig	Purelin	5, 8, 11, 14, 17

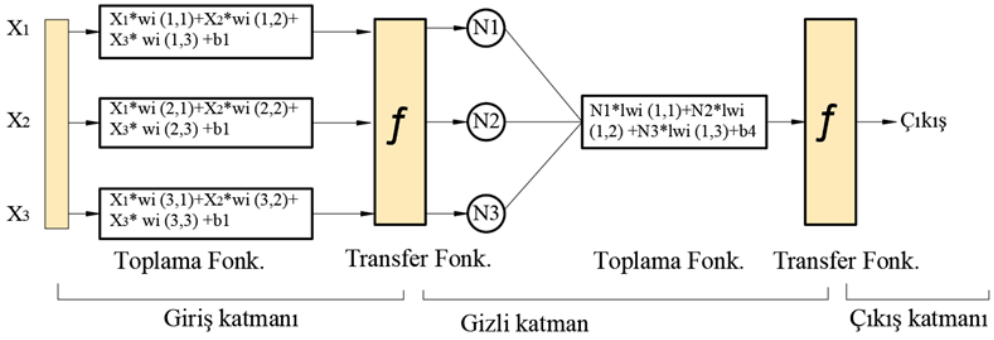
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(k_{\exp(i)} - k_{ANN(i)}\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(k_{\exp(i)}\right)^2} \tag{2}$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|k_{\exp(i)} - k_{ANN(i)}\right|^2} \tag{3}$$

Oluşturulan modellerin performansının istatistiksel olarak karşılaştırılması R-kare (R^2) ve kök ortalama kare hatası (RMSE) kullanılarak hesaplanmıştır (Denklem 2-3).

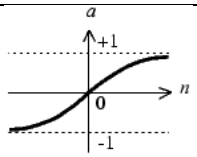
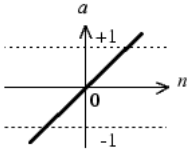
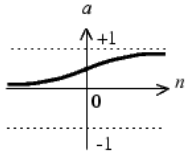


Şekil 3. SKK karıştırıcı uç ve omuz özellikleri (a-b), SKK işlem yönlerinin gösterimi (c)



Şekil 4. YSA genel yapısı

Tablo 5. YSA modelde kullanılan algoritma/fonksiyonların tanımı

Algoritma/Fonksiyon		Tanımlama	
Eğitim Fonksiyonu	Trainlm (LM)	Levenberg – Marquardt	
	Trainrp (RP)	Esnek geriye yayılım algoritması	
	Traingda (GDA)	Gradyan inişli adaptif geriye yayılım algoritması	
Transfer Fonksiyonu	Tansig	Hyperbolic tangent sigmoid transfer fonksiyonu	
	Purelin	Linear transfer fonksiyonu	
	Logsig	Log – Sigmoid transfer fonksiyonu	

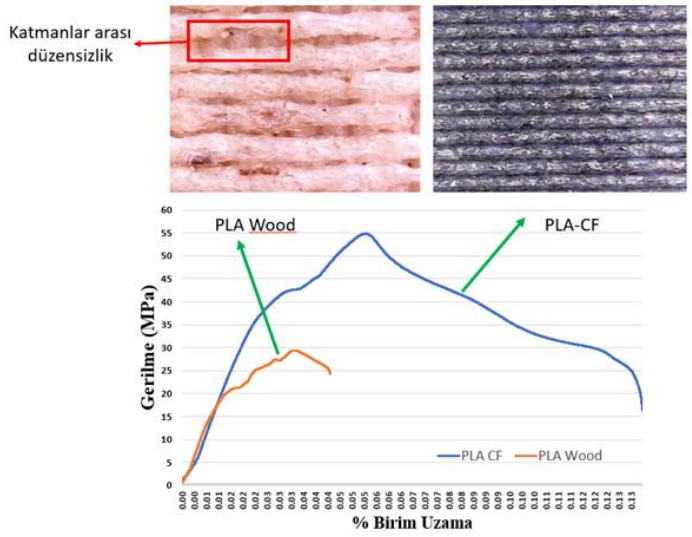
3 Bulgular ve tartışma

3.1 *Filamentlerin mekanik özellikleri*

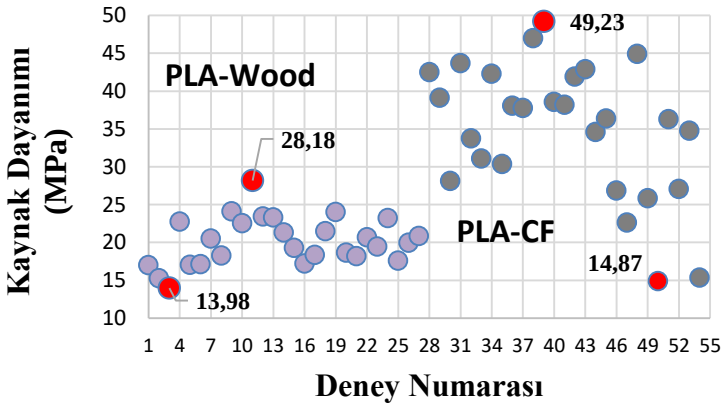
Yapılan çalışmada PLA-CF ve PLA Wood filamentlerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için oda sıcaklığında 2 mm/dk hızında çekme deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda PLA-CF için çekme mukavemetinin 54.81 MPa ve PLA Wood için çekme mukavemetinin 29.37 MPa olduğu görülmüştür. Şekil 5'te PLA-CF ve PLA Wood'un gerilme-gerinim diyagramı verilmiştir. PLA-CF'nin dolgu malzemesinin mekanik özellikleri olumlu etkilediği ve PLA Wood'a göre çekme dayanımının ve % uzama değerinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebinin karbon liflerinin ana matris içinde homojen olarak dağılması ve ekstrüzyon yönüne paralel biçimde konumlanmasından kaynaklandığı söylenebilir [47]. Ahşap katkısının polimerle bağlandığı ve yük altında mikromekanik deformasyon sürecinin geçerli olduğu belirtilmiştir. Polimerle katkı malzemesi arasında bağ oluşumunu etkileyen önemli etkenlerden birisi partiküllerin büyüklüğü ve partiküllerin mekanik özellikleridir. Polimer malzemenin içine eklenen partikülün boyutu büyüdükçe, kuvvete karşı göstermiş olduğu direnç azalmakta ve daha kolay ayrışma ile birlikte kırılma olasılıkları artmaktadır [48-50]. Ahşap katkısının ise katmanlar arasındaki yapışmayı olumsuz etkilediği ve düzensizliklere sebep olduğu için çekme dayanımını ve uzamayı olumsuz etkilediği düşünülmektedir. Şekil 5'te 3B baskı sonrasında dijital mikroskopla alınan yüzey görüntüleri verilmiştir. Yüzey görüntülerinde ahşap katkıdan dolayı meydana gelen hatalar ve düzensizlikler görülmektedir.

3.2 *Sürtünme karıştırma kaynağı işlem sonuçları*

Şekil 6'da PLA Wood ve PLA-CF'nin SKK ile birleştirme sonrasında çekme testi ile elde edilen kaynak sonrası çekme dayanımları görülmektedir. Tablo 6'da SKK sonrası en yüksek ve en düşük kaynak mukavemet değerleri ve işlem parametreleri verilmiştir. Şekil 6'da PLA Wood, üçgen uç profil 1-9, kare profil 10-18 ve vida uç profili 19-27 numaralı deneylerde, PLA Cf için üçgen uç profil 28-36, kare uç profil 37-45 ve vida uç profil 46-54 numaralı deneylerde kullanılmıştır.



Şekil 5. PLA-CF ve PLA Wood gerilme gerinim diyagramı



Şekil 6. SKK sonrası çekme dayanımı (PLA Wood ve PLA-CF)

Tablo 6. SKK en yüksek ve en düşük kaynak mukavemet değerleri

Deney No	Filament	Karıştırıcı Uç Geometrisi	Takım İlerleme Hızı (mm/dk)	Takım Dönme Hızı (dev/dk)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Verim (%)
3	PLA Wood	Üçgen	20	2250	13.98	47.60
11	PLA Wood	Kare	20	1750	28.18	95.95
39	PLA CF	Kare	20	2250	49.23	89.92
50	PLA CF	Vida	40	1750	14.87	27.13

PLA Wood için en yüksek kaynak mukavemeti kare karıştırıcı uç, 20 mm/dk ilerleme hızı ve 1750 dev/dk takım dönme hızında 28.18 MPa, PLA-CF için en yüksek kaynak mukavemeti kare karıştırıcı uç, 20 mm/dk ilerleme hızı ve 2250 dev/dk takım dönme hızında 49.23 MPa olarak elde edilmiştir. Şekil 6'da PLA-CF kaynak sonrası çekme dayanım değerlerinin PLA Wood kaynak sonrası çekme dayanım değerlerine göre daha geniş bir aralıkta dağıldığı görülmektedir. Bunun sebebi olarak PLA-CF malzemenin karbon fiber katkısından dolayı SKK işlem parametrelerindeki değişimden etkilendiği söylenebilir.

3.3 YSA sonuçlarının değerlendirilmesi

Yapılan çalışmada SKK metodunda kaynak kalitesinin tahmini için YSA kullanılabilirliği incelenmiştir. YSA modelinin optimizasyonu için farklı eğitim fonksiyonları (trainrp, trainlm ve traingda), transfer fonksiyonları (logsig ve tansig) ve gizli katmanda nöron sayıları (5, 8, 11, 14 ve 17) değiştirilerek 30 farklı model oluşturulmuştur. YSA modellerinin özellikleri Tablo 7'de verilmiştir. Malzeme çeşidi, karıştırıcı uç profili, takım ilerleme hızı ve takım dönme hızı değiştirilerek oluşturulan veri seti (54 deney), eğitim seti ve test seti olmak üzere ikiye bölünmüştür. Test seti, veri setinin %15-20 kadarı olması tavsiye edilmektedir [51]. Bu doğrultuda rastgele 10 deney verisi seçilerek ayrılmış ve modelin doğrulanması için kullanılmıştır. Test seti oluşturmak için seçilen veriler PLA Wood için 2, 6, 10, 16 ve 20 numaralı deneyler, PLA-CF için 4, 11, 16, 20 ve 26 olarak seçilmiştir. Ayrıca YSA eğitim ve test sonuçlarına göre istatistiksel değerlendirme (R^2 ve RMSE) Tablo 7'de görülmektedir. Kaynak kalitesinin tahmininde en uygun YSA modelinin belirlenmesi için R^2 değerinin 1'e yakın (ama $R^2<1$), RMSE değerinin ise sıfıra yakın olması istenmektedir.

Tablo 7'de $R^2=1$ olduğu durumlar görülmektedir. YSA'da tahmin oranının %100 olması beklenmez. Bunun birçok nedeni olmakla beraber başlangıçta nörona atanan ağırlık değerleri rastgeledir ve gerçek değerlerle tahmin değerleri arasındaki farka göre geriye dönük bu değerler değiştirilir. Burada bir yakınsama söz konusu olduğu için tahmin değerlerinin %100 doğrulukla tahmini beklenemez. İkinci sebep olarak $R^2=1$ durumu aşırı öğrenmeyi gösterir. Aşırı öğrenme, YSA modelinin verilere aşırı uyum sağladığı (ezber yaptığı) ve yeni verilerde düşük performans gösterdiği durumu ifade etmektedir. Bundan dolayı Tablo 7'de $R^2=1$ durumları değerlendirmeye alınmamıştır. Tablo 7'de yüksek performans gösteren YSA modelleri (3, 6, 19, 20, 28 ve 30) işaretlenmiştir. Yüksek performans gösteren modellerin istatiksel olarak değerlendirilmesi için Şekil 7'de R^2 ve Şekil 8'de RMSE değeri eğitim ve test sonuçları verilmiştir. İstatiksel değerlendirme sonucunda 20 numaralı modelin eğitim ve test sonuçlarında en başarılı olduğu belirlenmiştir.

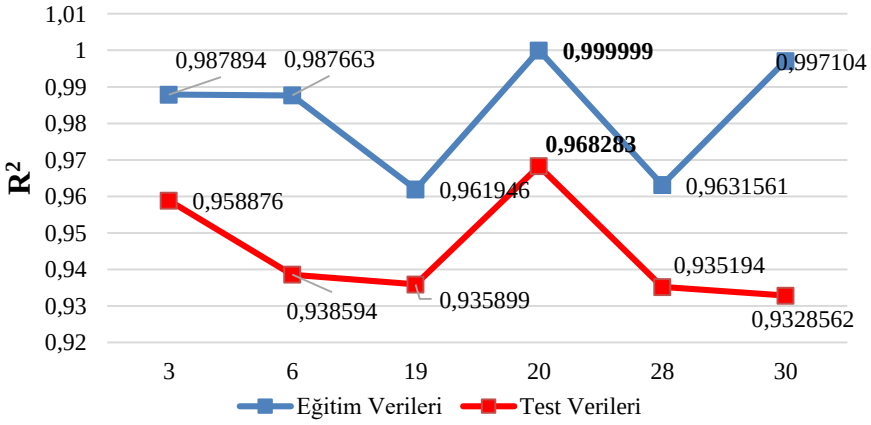
İstatiksel olarak genel bir değerlendirme yapıldığında eğitim algoritması "traingda" nın tahmin performansının düşük olduğu ve bu problemin çözümüne uyum sağlayamadığı belirlenmiştir. Ayrıca gizli katmandaki nöron sayısının artmasıyla tahmin kabiliyetinde bir iyileşme elde edilmiştir. Transfer fonksiyonlarının ise problemle yüksek uyum sağladığı ve bundan dolayı logsig ve tansig arasında çok belirgin bir fark olmadığı görülmüştür. Seçilen model karakteristik özellikleri (YSA model numarası 20): bir gizli katman sayısı, gizli katmanda 14 nöron, eğitim algoritması trainlm, gizli katmandaki transfer fonksiyonları tansig, çıkış katmanındaki transfer fonksiyonu purelin, iterasyon sayısı 5000 ve öğrenme oranı 0.001 olarak belirlenmiştir. Şekil 9'da deneysel sonuçlarla YSA tahmin sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir. Grafikler incelendiğinde deneysel sonuçlarla YSA tahmin sonuçları arasında küçük sapmalar olmasına rağmen sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir.

Literatürde SKK'ında YSA'nın kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde; Okuyucu vd. alüminyum levhaların SKK ile birleştirilmesinde takım ilerleme hızı (6.25, 10, 16 ve 20 mm/dk), takım dönme hızı (500, 800, 1000, 1250 ve 1500 rpm) işlem parametrelerini kullanarak kaynak sonrası mekanik özellikleri %99 doğrulukla tahmin etmişlerdir [52]. Diğer bir çalışmada farklı malzemelerin birleştirilmesinde mekanik özellikler ANN kullanılarak %95 doğrulukla tahmin edilmiştir [53]. Diğer bir çalışmada yüzey yanıt yöntemi ve YSA kullanılarak AA7039 Al alaşımının SKK yöntemi ile birleştirilmesinde kaynak sonrası çekme dayanımını tahmin etmişlerdir. ANN modelinin çekme dayanımın tahmininde yüzey yanıt yöntemine göre daha başarılı olduğunu belirtmişlerdir [54]. Genel bir değerlendirme yapıldığında makine öğrenmesi algoritmalarının kullanıldığı çalışmalarda oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiş olup ortalama %96 doğruluk oranına sahip olduğu belirtilmiştir. YSA ile yapılan çalışmalarda kaynak sonrası çekme mukavemeti, ITAB bölgesinin sertliği, mikroyapı veya tane boyutu gibi FSW parametre tahmininde uygulanan YSA teknikleri için ortalama hatanın yaklaşık %5 olduğu görülmüştür [55]. Sonuçlar literatürle karşılaştırıldığında YSA'nın SKK işlemi sonrası mekanik özellikleri tahmin etmede başarılı olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmada literatürden farklı olarak SKK öncesi işlem parametreleri tahmin edilmiş ve yüksek doğruluk oranı elde edilmiştir. Sonuçlar literatürle uyumlu olduğu belirlenmiştir.

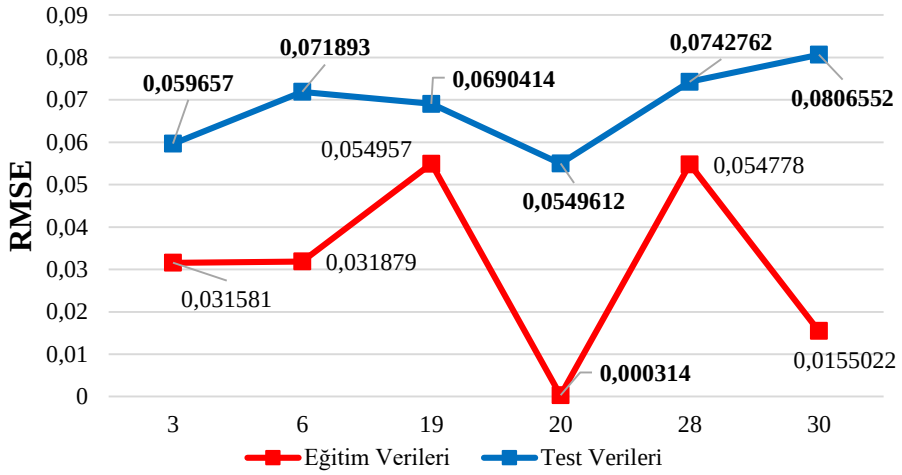
Tablo 7. YSA modellerin karakteristik özellikleri

GKNS		TF	TF (GK)	TF (ÇK)	Eğitim		Test		
					R^2	RMSE	R	R^2	RMSE
1	5	Traingda	Tansig	Purelin	0.95215	0.06131	0.76026	0.90957	0.083809
2	5	Trainlm	Tansig	Purelin	0.99746	0.014518	0.98808	0.84419	0.106803
3	5	Trainrp	Tansig	Purelin	0.987894	0.031581	0.94226	0.958876	0.059657
4	5	Traingda	Logsig	Purelin	0.928946	0.075244	0.60387	0.830979	0.110205
5	5	Trainlm	Logsig	Purelin	0.996121	0.017950	0.98162	0.909702	0.085166
6	5	Trainrp	Logsig	Purelin	0.987663	0.031879	0.94113	0.938594	0.071893
7	8	Traingda	Tansig	Purelin	0.948201	0.063158	0.74406	0.922601	0.077107
8	8	Trainlm	Tansig	Purelin	0.999993	0.000759	0.99994	0.745104	0.227640
9	8	Trainrp	Tansig	Purelin	0.993963	0.022368	0.97147	0.908136	0.086505
10	8	Traingda	Logsig	Purelin	0.929418	0.072528	0.65594	0.825520	0.112154
11	8	Trainlm	Logsig	Purelin	1	0.0000311	1	0.628529	0.178477
12	8	Trainrp	Logsig	Purelin	0.996225	0.017709	0.98222	0.892841	0.089403
13	11	Traingda	Tansig	Purelin	0.926345	0.076246	0.58948	0.865507	0.1023430
14	11	Trainlm	Tansig	Purelin	1	0.000166	1	0.791056	0.1469504
15	11	Trainrp	Tansig	Purelin	0.995500	0.019323	0.97879	0.829712	0.1263580
16	11	Traingda	Logsig	Purelin	0.955809	0.058575	0.78886	0.886184	0.0904167
17	11	Trainlm	Logsig	Purelin	1	0.0000141	1	0.887144	0.1018352
18	11	Trainrp	Logsig	Purelin	0.995467	0.019382	0.97871	0.916048	0.0853224
19	14	Traingda	Tansig	Purelin	0.961946	0.054957	0.81295	0.935899	0.0690414
20	14	Trainlm	Tansig	Purelin	0.999999	0.000314	0.99999	0.968280	0.0549612
21	14	Trainrp	Tansig	Purelin	0.994891	0.020561	0.97603	0.936934	0.0743872
22	14	Traingda	Logsig	Purelin	0.960114	0.0560123	0.8053	0.924677	0.0781520
23	14	Trainlm	Logsig	Purelin	1	0.0000037	1	0.864355	0.1075845
24	14	Trainrp	Logsig	Purelin	0.998862	0.0097285	0.99498	0.908844	0.0869771
25	17	Traingda	Tansig	Purelin	0.968691	0.0504734	0.84635	0.910368	0.083675
26	17	Trainlm	Tansig	Purelin	0.99999	0.0003125	0.9999	0.892448	0.092303
27	17	Trainrp	Tansig	Purelin	0.997425	0.0146179	0.98897	0.899960	0.099194
28	17	Traingda	Logsig	Purelin	0.9631561	0.0547780	0.81432	0.9351940	0.0742762
29	17	Trainlm	Logsig	Purelin	1	0.0000291	1	0.9030325	0.094853
30	17	Trainrp	Logsig	Purelin	0.997104	0.0155022	0.98646	0.9328562	0.0806552

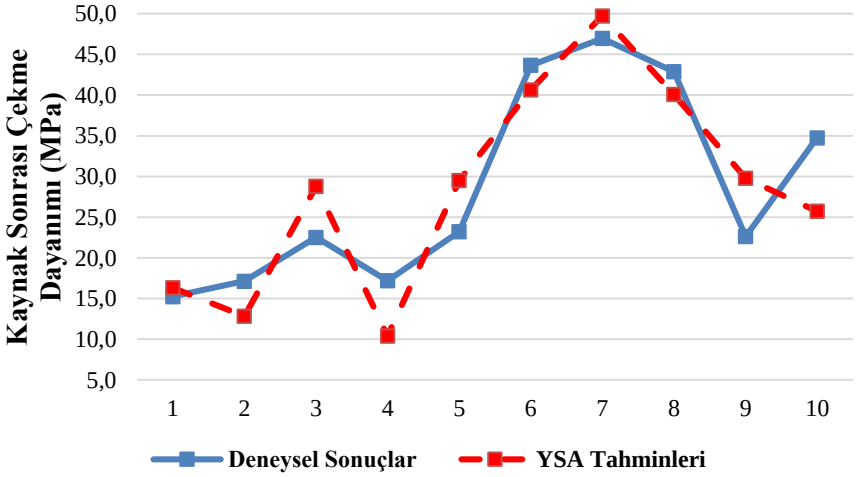
GKNS: Gizli katman nöron sayısı, TF: Transfer fonksiyonu, GK: Gizli katman, ÇK: Çıkış katmanı



Şekil 7. En iyi YSA modellerinin R^2 değerleri



Şekil 8. En iyi YSA modellerinin RMSE değerleri



Şekil 9. Deneysel sonuçlarla YSA tahmin sonuçlarının karşılaştırılması

4 Sonuçlar

Yapılan çalışmada PLA Wood ve PLA-CF plakaların SKK metodu ile birleştirilebilirliği ve YSA kullanılarak işlem parametrelerinin tahmin edilebilirliği araştırılmıştır. SKK metodunda işlem parametreleri olarak üçgen, kare ve vida karıştırıcı uç geometrisi, 20, 40 ve 60 mm/dk ilerleme hızı, 1250, 1750 ve 2250 dev/dk takım dönme hızı kullanılmıştır. YSA modelinin optimizasyonu için eğitim algoritması (trainrp, trainlm ve traingda), transfer fonksiyonu (giriş katmanındaki transfer fonksiyonu olarak logsig ve tansig) ve gizli katmandaki nöron sayısı (5, 8, 11, 14 ve 17) değiştirilerek eğitim ve test sonuçları istatiksel olarak değerlendirilmiştir. PLA Wood ve PLA-CF plakaların kaynak sonrası çekme dayanımları değerlendirildiğinde; PLA Wood için en yüksek kaynak sonrası çekme dayanımı (28.18 MPa) kare karıştırıcı uç, ilerleme hızı 20 mm/dk ve takım dönme hızı 1750 dev/dk, PLA-CF için en yüksek kaynak sonrası çekme dayanımı (49.23 MPa) kare karıştırıcı uç, ilerleme hızı 20 mm/dk ve takım dönme hızı 2250 dev/dk işlem parametrelerinde elde edilmiştir.

Elde edilen veri setleri kullanılarak YSA modeli geliştirilmiştir. YSA modelinin giriş katmanı malzeme, karıştırıcı uç geometrisi, takım ilerleme hızı ve takım dönme hızı olmak üzere dört nörondan, çıkış katmanı ise kaynak sonrası çekme dayanımı değerini temsil eden tek bir nörondan oluşmaktadır. En iyi YSA tahmin modelini bulmak için üç farklı eğitim fonksiyonu, iki farklı transfer fonksiyonu ve gizli katmandaki farklı nöron sayıları kullanılarak 30 model geliştirilmiştir. En yüksek doğruluk oranına sahip tahmin sonuçlarının "trainlm" eğitim fonksiyonu, gizli katmandaki nöron sayısı “14” ve transfer fonksiyonu olarak “tansig ve purelin” kullanılarak elde edilmiştir. İstatistiksel olarak eğitim sonuçlarında sırasıyla 0.99999 ve 0.000314, test sonuçlarında ise 0.968280 ve 0.0549612 R^2 ve RMSE değerleri elde edilmiştir.

Bazı modellerde aşırı öğrenme olduğu belirlenmiş ve değerlendirmeden çıkarılmıştır. Eğitim algoritması olarak “traingda” nın tahmin performansının düşük olduğu ve bu problemin çözümünde kullanımın uygun olmadığı belirlenmiştir. Gizli katmandaki nöron sayısının artmasıyla tahminde bir iyileşme elde edilmiştir.

SKK kaynak parametrelerinin belirlenmesinde deneme yanılma yöntemi kullanılmaktadır. Bu durum, zaman kaybına sebep olurken hurda malzeme miktarını da arttırmaktadır. YSA modelinin özellikle doğrusal olamayan problemlerin çözümündeki kabiliyeti kullanılarak SKK işlem parametrelerini tahmin kabiliyeti incelenmiştir. YSA tahmin sonuçları ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında sonuçların yüksek doğruluğa sahip olduğu belirlenmiştir. Bu da YSA'nın SKK işlem parametrelerinin tahmininde kullanılabileceğini göstermektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

[1] M. R. Hajideh, M. Farahani, S. A. D Alavi, N. M. Ramezani, Investigation on the effects of tool geometry on the microstructure and the mechanical properties of dissimilar friction stir welded polyethylene and polypropylene sheets. Journal of Manufacturing Processes, 26, 269-279, 2017. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.018

[2] S.H. Dashatan, T. Azdast, S. R. Ahmadi, A. Bagheri, Friction stir spot welding of dissimilar polymethyl methacrylate and acrylonitrile butadiene styrene sheets. Materials & Design, 45, 135-141, 2013. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.071

[3] P. J. Bates, C. Dyck, and M. Osti, Vibration welding of nylon 6 to nylon 66. Polymer Engineering & Science, 44(4), 760-771, 2004. https://doi.org/10.1002/pen.20068

[4] M. Farahani, I. S. Far, D. Akbari and R. Alderliesten, Numerical and experimental investigations of effects of residual stresses on crack behavior in Aluminum 6082-T6. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 226(9), 2178-2191, 2012. https://doi.org/10.1177/095440621143266

[5] M. Tabasi, M. Farahani, M. K. B. Givi, M. Farzami and A. Moharami, Dissimilar friction stir welding of 7075 aluminum alloy to AZ31 magnesium alloy using SiC nanoparticles. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 86, 705-715, 2016. https://doi.org/10.1007/s00170-015-8211-y

[6] H. M. Jamalian, M. Farahani, M. K. B. Givi and M. A. Vafaei, Study on the effects of friction stir welding process parameters on the microstructure and mechanical properties of 5086-H34 aluminum welded joints. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 83, p. 611-621, 2016. https://doi.org/10.1007/s00170-015-7581-5

[7] V. Jaiganesh, B. Maruthu, and E. Gopinath, Optimization of process parameters on friction stir welding of high density polypropylene plate. Procedia Engineering, 97, 1957-1965, 2014. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.350

[8] W. M. Thomas, Friction stir butt welding. International patent application No.9125978.8, 6 December 1991.

[9] W. K. Kim, B. C. Goo and S. T. Won, Optimal design of friction stir welding process to improve tensile force of the joint of A6005 extrusion. Materials and Manufacturing Processes, 25(7), 637-643, 2010. https://doi.org/10.1080/10426910903365745

[10] A. Mirjalili, S. Serajzadeh, H. J. Aval and A. H. Kokabi, Modeling and experimental study on friction stir welding of artificially aged AA2017 plates. Materials and Manufacturing Processes, 28(6), 683-688, 2013. https://doi.org/10.1080/10426914.2012.746782

[11] Y. Bozkurt, The optimization of friction stir welding process parameters to achieve maximum tensile strength in polyethylene sheets. Materials & Design, 35, 440-445, 2012. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.008

[12] S. Saeedy and M. K. B. Givi, Experimental application of friction stir welding (FSW) on thermo plastic medium density polyethylene blanks. ASME 2010 10th Biennal Conference on Engineering Systems Design and Analysis, pp. 841-844, Istanbul, Turkey, 2010. https://doi.org/10.1115/ESDA2010-25344

[13] A. K. R. Sharma, M. R. Choudhury and K. Debnath, Experimental investigation of friction stir welding of PLA. Welding in The World, 64(6), 1011-1021, 2020. https://doi.org/10.1007/s40194-020-00890-7

[14] R. Kumar, N. Ranjan, V. Kumar, J. S. Chokan, A. Yadav, N. Piyush, S. Sharma, C. Prakash, S. Singh, C. Li, Characterization of friction stir-welded polylactic acid/aluminum composite primed through fused filament fabrication. Journal of Materials Engineering and Performance, 31(3), 2391-2409, 2022. https://doi.org/10.1007/s11665-021-06329-4

[15] S. M. Senthil and M.B. Kumar, Effect of tool rotational speed and traverse speed on friction stir welding of 3d-printed polylactic acid material. Applied Science and Engineering Progress, 15(1), 2022. https://doi.org/10.14416/j.asep.2021.09.002

[16] N. Vidakis, M. Petousis, N. Mountakis and J. D. Kechagias, Material extrusion 3D printing and friction stir welding: an insight into the weldability of polylactic acid plates based on a full factorial design. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 121(5-6), 3817-3839, 2022. https://doi.org/10.1007/s00170-022-09595-1

[17] M. A. Rezgui, M. Ayadi, A. Cherouat, K. Hamrouni, A. Zghal and S. Bejaoui, Application of Taguchi approach to optimize friction stir welding parameters of polyethylene. EPJ Web of Conferences 6, 07003 pp. 1-8, Poitiers, France, 2010. http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20100607003

[18] E. Raouache, Z. Boumerzoug, S. Rajakumar and F. Khalfallah, Effect of FSW process parameters on strength and peak temperature for joining high-density polyethylene (HDPE) sheets. Revue des Composites et des Materiaux Avances, 28(2), 149, 2018. https://doi.org/10.3166/RCMA.28.149-160

[19] M. R. Hajideh, M. Farahani, S. A. D. Alavi and N. M. Ramezani, Investigation on the effects of tool geometry

on the microstructure and the mechanical properties of dissimilar friction stir welded polyethylene and polypropylene sheets. Journal of Manufacturing Processes, 26, 269-279, 2017. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.018

[20] F. Kordestani, F. A. Ghasemi and N. B. M. Arab, Effect of pin geometry on the mechanical strength of friction-stir-welded polypropylene composite plates. Mechanics of Composite Materials, 53(4), 525-532, 2017. https://doi.org/10.1007/s11029-017-9682-8

[21] Incorporated. P.S. 3 Types of Plastic Used in 3D Printing.https://www.polymersolutions.com/blog/plastic-in-3d-printing/, Accessed 12 February 2023.

[22] H. Kyutoku, N. Maeda, H. Sakamoto, H. Nishimura and K. Yamada, Effect of surface treatment of cellulose fiber (CF) on durability of PLA/CF bio-composites. Carbohydrate Polymers, 203, 95-102, 2019. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.09.033

[23] R.M. Rasal, A.V. Janorkar and D.E. Hirt, Poly (lactic acid) modifications. Progress in Polymer Science, 35(3), 338-356, 2010. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.12.003

[24] D. Garlotta, A literature review of poly (lactic acid). Journal of Polymers and The Environment, 9, 63-84, 2001. https://doi.org/10.1023/A:1020200822435

[25] L. T. Lim, R. Auras and M. Rubino, Processing technologies for poly (lactic acid). Progress in Polymer Science, 33(8), 820-852, 2008. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.05.004

[26] A. E. Magri, K. E. Mabrouk, S. Vaudreuil and M. E. Touhami, Mechanical properties of CF-reinforced PLA parts manufactured by fused deposition modeling. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 34(5), 581-595, 2021. https://doi.org/10.1177/0892705719847244

[27] N. Ayrilmis, M. Kariz, J. H. Kwon and M. K. Kuzman, Effect of printing layer thickness on water absorption and mechanical properties of 3D-printed wood/PLA composite materials. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 102, 2195-2200, 2019. https://doi.org/10.1007/s00170-019-03299-9

[28] Filameon PLA-CF 15 Filament. https://www.filameon.com/urun/filameon-pla-cf-15-filament/#%20, Accessed 6 September 2022.

[29] Filameon PLA Wood. https://www.filameon.com/urun/filameon-pla-wood-filament/, Accessed 5 November 2022.

[30] B. Erdoğan, M. Bağatur, G. Göktürk, S. O. Yavuz, T. B. Yılmaz, O. Koçar and O. Özdamar, Experimental investigation of tensile strength and thermal conductivity of nanoparticle reinforcement composite materials. Journal of Materials and Manufacturing, 1(1), 14-22, 2022. https://doi.org/10.5281/zenodo.7107345

[31] V. Devuri, M. M. Mahapatra, S. P. Harsha and N. R. Mandal, Effect of shoulder surface dimension and geometries on FSW of AA7039. Journal for Manufacturing Science and Production, 14(3), 183-194, 2014. https://doi.org/10.1515/jmsp-2014-0008

[32] N. R. J. Hynes and P. S. Velu, Effect of rotational speed on Ti-6Al-4V-AA 6061 friction welded joints. Journal of Manufacturing Processes, 32, 288-297, 2018. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.02.014

[33] H. Lombard, D. G. Hatting, A. Steuwer and M. N. James, Effect of process parameters on the residual stresses in AA5083-H321 friction stir welds. Materials Science and Engineering: A, 501(1-2), 119-124, 2009. https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.09.078

[34] S. Rajakumar, C. Muralidharan and V. Balasubramanian, Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminium alloy joints. Materials & Design, 32(2), 535-549, 2011. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.08.025

[35] T. Sun, A. P. Reynolds, M. J. Roy, P. J. Withers and P. B. Prangnell, The effect of shoulder coupling on the residual stress and hardness distribution in AA7050 friction stir butt welds. Materials Science and Engineering: A, 735, 218-227, 2018. https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.12.018

[36] N. Sharma, A. N. Siddiquee, Z. A. Khan and M. T. Mohammed, Material stirring during FSW of Al–Cu: Effect of pin profile. Materials and Manufacturing Processes, 33(7), 786-794, 2018. https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1388526

[37] P. S. Kumar and M. S. Chander, Effect of tool pin geometry on FSW dissimilar aluminum alloys-(AA5083 & AA6061). Materials Today: Proceedings, 39, 472-477, 2021. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.204

[38] A. Arici and S. Selale, Effects of tool tilt angle on tensile strength and fracture locations of friction stir welding of polyethylene. Science and Technology of Welding and Joining, 12(6), 536-539, 2007. https://doi.org/10.1179/174329307X173706

[39] J. P. Davim, V. N. Gaitonde and S. R. Karnik, Investigations into the effect of cutting conditions on surface roughness in turning of free machining steel by ANN models. Journal of Materials Processing Technology, 205(1-3), 16-23, 2008. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.082

[40] C. Hamzaçebi, Forecasting of Turkey's net electricity energy consumption on sectoral bases. Energy Policy, 35(3), 2009-2016, 2007. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.03.014

[41] C. Hamzaçebi, Improving artificial neural networks' performance in seasonal time series forecasting. Information Sciences, 178(23), 4550-4559, 2008. https://doi.org/10.1016/j.ins.2008.07.024

[42] G. Serin, M. Kahya, M. Özbayoğlu ve H. Ö. Ünver, Ti6Al4V malzemesinin tornalama işleminde özgül kesme enerjisi ve yüzey pürüzlüğünün incelenmesi ve yapay sinir ağları temelli tahmin modeli geliştirilmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 24(2), 517-536, 2019. https://doi.org/10.17482/uumfd.301128

[43] E. N. Dizdar and O. Koçar, İş sağlığı ve güvenliği yönetim sistemlerinde risklerin yapay sinir ağlarıyla değerlendirilmesi. Academic Platform-Journal of Engineering and Science, 6(3), 73-83, 2018. https://doi.org/10.21541/apjes.426502

[44] H. R. Maier, A. Jain, G. C. Dandy and K. P. Sudheer, Methods used for the development of neural networks for the prediction of water resource variables in river systems: Current status and future directions. Environmental Modelling & Software, 25(8), 891-909, 2010. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.02.003

[45] S. Razavi and B.A. Tolson, A new formulation for feedforward neural networks. IEEE Transactions on Neural Networks, 22(10), 1588-1598, 2011. doi: 10.1109/TNN.2011.2163169.

[46] A. B. Colak, Experimental study for thermal conductivity of water-based zirconium oxide nanofluid: developing optimal artificial neural network and proposing new correlation. International Journal of Energy Research, 45(2), 2912-2930, 2021. https://doi.org/10.1002/er.5988

[47] H. K. Sezer, O. Eren, ve H. R. Börklü, Ergiyik biriktirme yöntemi ile karbon fiber takviyeli plastik kompozitlerin eklemeli imalatı: İşlem parametrelerinin çekme özelliklerine etkisi. 2nd International Symposium on 3D Printing Technologies, İstanbul, Türkiye, 3-4 April 2017.

[48] G. Faludi, G. Dora, K. Renner, J. Móczó, B. Pukánszky, Improving interfacial adhesion in pla/wood biocomposites. Composites Science and Technology, 89, 77-82, 2013. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.09.009.

[49] Á. Csikós, G. Faludi, A. Domján, K. Renner, J. Móczó and B. Pukánszky, Modification of interfacial adhesion with a functionalized polymer in PLA/wood composites. European Polymer Journal, 68, 592-600, 2015. https://doi.org/ 10.1016 /j.eurpolymj.2015.03.032.

[50] Z. Liu, Q. Lei and S. Xing, Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM. Journal of Materials Research and Technology, 8 (5), 3741 - 3751, 2019. https://doi.org/ 10.1016/j.jmrt.2019.06.034.

[51] A. Abdullah ve M. Karabatak, Veri seti-sınıflandırma ilişkisinde performansa etki eden faktörlerin değerlendirilmesi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 32(2), 531-540, 2020. https://doi.org/10.35234/fumbd.738007

[52] H. Okuyucu, A. Kurt and E. Arcaklioglu, Artificial neural network application to the friction stir welding of aluminum plates. Materials & Design, 28 (1), 78-84, 2007. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.06.003.

[53] M. Krishnan, J. Maniraj, R. Deepak and K. Anganan, Prediction of optimum welding parameters for FSW of aluminium alloys AA6063 and A319 using RSM and ANN. Materials Today: Proceedings, 5 (1), 716-723, 2018. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.138.

[54] A.K. Lakshminarayanan, V. Balasubramanian, Comparison of RSM with ANN in predicting tensile strength of friction stir welded AA7039 aluminium alloy joints. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 19 (1), 9-18, 2009. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60221-6.

[55] B. Eren, M.A. Guvenc and S. Mistikoglu, Artificial Intelligence Applications for Friction Stir Welding: A Review. Metals and Materials International, 27, 193–219, 2021. https://doi.org/10.1007/s12540-020-00854-y.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 188-195
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
Araştırma makalesi / Research article
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Düzlem çerçeve modelinin hasar tespit sonuçlarının belirsizlik ölçümü

Uncertainty quantification of damage detection results for a plane frame model

Umut Yücel[1,*], Erkan Durmazgezer[2]

[1] *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 50300, Nevşehir Türkiye*
[2] *Yaşar Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 35100, İzmir Türkiye*

Öz

Bu çalışmada, hasarın kolon ve kiriş uçlarında bölgesel rijitlik azalması olarak simüle edildiği, iki katlı, tek açıklıklı düzlem çerçeve modelinin duyarlık tabanlı sonlu elemanlar modeli güncellemesi yöntemiyle elde edilen hasar tespit sonuçlarının belirsizlik ölçümüne yer verilmiştir. Kullanılan hasar tespit yöntemi, hasarlı ve hasarsız durumlara ait modal parametreler arasındaki farkların iteratif bir şekilde küçültülmesi esasına dayanmaktadır. Dinamik ölçümlerdeki gürültü varlığı, modal parametrelerin tahminini etkileyerek hasar tespit sonuçlarında belirsizliklere neden olmaktadır. Elde edilen sonuçların güvenirliği, içerdikleri belirsizlik miktarının saptanması ile mümkündür. Sunulan çalışma kapsamında hasar tespit sonuçlarının belirsizlik ölçümü, hasarlı duruma ait modal parametreler üzerine farklı varyasyon katsayıları ile ilişkili gürültü verisi eklenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Model güncelleme işlemi, hasarlı duruma ait gürültü verisi eklenmiş modal parametreler ile hasarsız durumun modal parametrelerinin kullanılması ve hasarsız durumu temsil eden sonlu elemanlar modelinin eleman rijitlik değerlerinin güncellenmesi ile yapılmıştır. Güncelleme öncesi ve sonrası belirlenen rijitlik değerleri kullanılarak elemanlara ait rijitlik azalmaları hesaplanmış, böylece hasarların yerleri ve miktarları tespit edilmiştir. Farklı gürültü koşullarına ait verilerin kullanılması ile elde edilen hasar sonuçlarının belirsizlik ölçümü varyans analizi, meta-modelleme ve hassasiyet analizi yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde, hasar tespit sonuçlarında önemli mertebede belirsizlik oluşturan etkenler belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Hasar tespiti, Belirsizlik ölçümü, Varyans analizi, Meta-modelleme, Hassasiyet analizi

Abstract

In this study, uncertainty quantification was carried out on the damage detection results obtained through the sensitivity-based finite element model updating method for a two-story, single-span plane frame model, where damage was simulated as a regional stiffness reduction at the ends of columns and beams. The damage detection method employed is based on iteratively reducing the differences in modal parameters between damaged and undamaged conditions. The presence of noise in dynamic measurements introduces uncertainties in damage detection results by affecting the estimation of modal parameters. The reliability of the obtained results is possible by quantifying the amount of uncertainty they encompass. In the presented study, uncertainty quantification of damage detection results was carried out by adding noise data associated with different coefficient of variations to modal parameters related to the damaged condition. The model updating process was performed by using modal parameters with added noise data for the damaged condition and modal parameters for the undamaged condition, as well as by updating the element stiffness values of the finite element model representing the undamaged condition. Stiffness reductions of elements were calculated using the determined stiffness values before and after updating, thus enabling the detection of the location and extent of damage. Uncertainty quantification of the damage results obtained under different noise conditions was conducted using analysis of variance, meta-modeling, and sensitivity analysis methods. In this way, factors that introduce substantial uncertainty in damage detection results have been identified.

Keywords: Damage detection, Uncertainty quantification, Analysis of variance, Meta-modeling, Sensitivity analysis

1 Giriş

Mühendislik uygulamalarında, yapısal sistemlerin davranışlarının tahmininde ve tasarımında sayısal modellerin kullanımı oldukça yaygındır. İnşaat mühendisliğinde, çeşitli yapısal limit durumlarındaki sistemlerin iç kuvvetlerinin veya şekil değişimlerinin belirlenmesinde ve rüzgâr, trafik, deprem gibi dinamik etkiler altındaki titreşim tepkilerinin analizlerinde sonlu elemanlar modellerinden sıklıkla yararlanılmaktadır. Bu modeller, yapının bütününü tasarlamak için kullanılabildiği gibi, yapının herhangi bir bileşenini temsil etmek üzere de oluşturulabilmektedir.

Sonlu elemanlar modelleri, yapısal sisteme veya onun bileşenlerine ait özelliklerin tahmininde, malzeme özellikleri, geometrik özellikler, yük durumları ve sınır şartları açısından çeşitli kabuller içerebilmektedir. Ayrıca, bilgi eksikliği ya da farklı kısıtlamalar nedeniyle de modelleme aşamasında varsayımların yapılması çoğu zaman kaçınılmaz olmaktadır. Bu gibi durumlar, oluşturulan sayısal modellerin gerçek yapısal sistem davranışını yansıtma

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: umut.yucel@nevsehir.edu.tr (U. Yücel)
Geliş / Recieved: 15.09.2023 Kabul / Accepted: 15.11.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngmuh.1361253

anlamındaki kalitesini ve doğruluğunu olumsuz biçimde etkilemektedir. Modelleme aşamasında karşılaşılan problemlerin üstesinden gelebilmek için sonlu elemanlar modeli güncellemesi tekniği kullanılabilmektedir. Belirli bir çıktıyı üreten sonlu elemanlar modelinin parametrelerini tahmin etmek üzerine kurulu olan yöntem, optimizasyon tekniklerinin kullanıldığı, çıktıların bilindiği ancak girdilerin bilinmediği tersine mühendislik uygulamaları olarak adlandırılmaktadır. Yöntem, sayısal modeldeki bilinmeyen ve/veya belirsiz model parametrelerin (kütle, elastisite modülü, kayma modülü, yay rijitliği, atalet momenti, mesnet koşulları, vb.), sistemin gerçek (ölçülebilen, deneysel) davranışını yansıtan modal parametrelere uyum gösterecek şekilde kalibre edilmesi esasına dayanmaktadır. Bu kapsamda, sayısal modeldeki model parametrelerin güncellenerek, farklı durumlara ait (hasarsız veya hasarlı) modal parametreler arasındaki uyuşmazlıkların minimize edildiği iteratif bir işlem adımı takip edilmektedir. Kalibre edilmiş sayısal model ile hasarlı durumu yansıtan deneysel verinin kullanılması ile hasar tespit uygulamaları da yapılabilmektedir [1-14].

Sonlu elemanlar modeli güncellemesi problemlerinde, modelleme ve deneysel veri belirsizliği olmak üzere iki tür belirsizlikten bahsetmek mümkündür. Modelleme aşamasındaki bilinmeyen geometrik özellikler, malzeme özellikleri, yük karakteristikleri, modellemede kullanılan basitleştirmeler ve kabuller (sınır koşulları, malzeme davranışı, fiziksel eşitlikler, vb.) modelleme belirsizliğinin kaynağını oluştururken; ölçüm hataları (veride gürültü varlığı, ölçüm sisteminin kusurları, sinyal işleme esnasında yapılan hatalar, vb.) ise deneysel veri belirsizliğinin en önemli nedenleridir. Ele alınan problemdeki belirsizlik varlığı (modelleme ve/veya deneysel veri belirsizliği), optimizasyon algoritmasının çözüme ulaşmasını ya da kararlılığını olumsuz bir biçimde etkileyebilmektedir. Dolayısıyla, bu belirsizliklerin sonlu elemanlar modeli güncellemesi uygulamalarında uygun bir şekilde yönteme dâhil edilmesi ve elde edilen bulguların içerdikleri belirsizlikler ile birlikte değerlendirilmeleri önem taşımaktadır [8, 15-19].

Son yıllarda, model güncelleme, hasar tespiti ve yapı sağlığı izleme işlemlerinin gerçekleştirilmesinde güvenilir sonuçlar elde edilmesine yönelik belirsizlik ölçümü çalışmalarına giderek daha fazla önem verilmektedir. Literatürde bu kapsamda yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Kernicky vd. [20] düzlemsel kafes sistemin artan hasar seviyeleri için hasar tespit çalışması gerçekleştirmiştir. Bu kapsamda, sonlu elemanlar modeli güncellemesi yöntemine uyarlamalar yapılarak ölçüm ve modelleme belirsizliği hesaba katılmıştır. Huang vd. [21] Bayes analizinin temel ilkelerini özetlemiştir. Çalışmada inşaat mühendisliği yapılarında Bayes yaklaşımı kullanmanın sistem tanımlama ve hasar tespiti anlamında daha güvenilir sonuçlar verdiğinin altı çizilmiştir. Silva vd. [22] tarafından yapılan çalışmada modal parametre tahminindeki belirsizliklerin daha doğru bir şekilde belirlenebilmesi için yeni bir yöntem önerilmiştir. Yöntemin performansı sayısal örnekler ve deneysel çalışmalar ile ortaya konmuştur. Yin vd. [23] sıkça kullanılan duyarlık tabanlı deterministik yöntemi geliştirerek belirsizlik ölçümünde kullanılabilen yeni bir yöntem bulmuştur. Ölçüm gürültüsünün olasılıksal bilgisinin ve geçmiş dağılımının bilinmediği koşullarda bile belirsizliği hızlı bir şekilde belirleyebilen yöntem, modelleme hataları kaynaklı belirsizlikler için de kullanılabilmektedir. Yöntemin hasar tespit sonuçlarının belirsizlik ölçümündeki etkinliği sayısal örnekler ve deneysel çalışmalarla desteklenmiştir. Xie vd. [24] hasar tespiti ve belirsizlik ölçümü için daha az veri kümesi talebi olan daha verimli bir yaklaşım önermiştir. Yöntemin etkinliği, doğruluğu ve verimliliği sayısal çalışmaların yanında deneysel olarak da araştırılmıştır. Silionis ve Anyfantis [25] model tahmin hatasının istatistiksel yapısını ve hasar tespiti üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada olasılıksal statik yüklemeye maruz kalan bir kiriş referans yapı olarak ve şekil değiştirme ölçümleri de hasara duyarlı parametreler olarak kullanılmıştır. Model tahmin hatası, mevcut laboratuvar gözlemleri ve nümerik veriler aracılığıyla hassas bir şekilde ölçülmüştür.

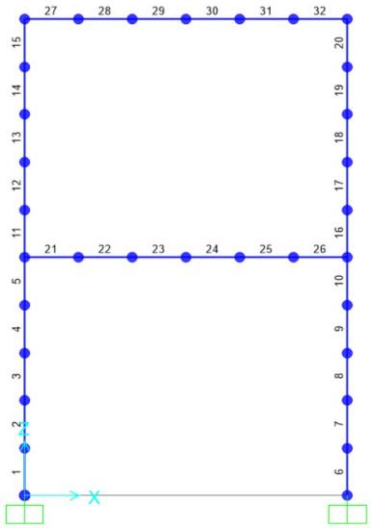
Sunulan çalışmada, hasar tespit sonuçlarının belirsizlik ölçümüne yer verilmiştir. Bu kapsamda, iki katlı, tek açıklıklı düzlem bir çerçeve modeli ele alınmıştır. Hasarlı çerçeve durumu kolon ve kiriş uçlarında bölgesel rijitlik azalması olarak simüle edilmiş, hasar tespiti için duyarlık tabanlı sonlu elemanlar modeli güncellemesi yöntemi kullanılmıştır. Hasar tespit sonuçlarının belirsizlik ölçümü, hasarlı durumu yansıtan modele ait modal parametreler üzerine dört farklı varyasyon katsayısıyla (%0.50, %1.00, %1.50 ve %2.00) ilişkili gürültü verisi eklenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Hasarsız durumu temsil eden sonlu elemanlar modelinin eleman rijitlik değerleri güncellenerek, hasarlı (gürültü verisi eklenmiş) ve hasarsız durumların modal parametreleri arasındaki farklar minimize edilmiştir. Bu kapsamda çerçeve modelinin ilk üç modu dikkate alınmıştır. Güncelleme öncesi ve sonrası belirlenen rijitlik değerleri kullanılarak elemanlara ait rijitlik azalmaları (hasar miktarları) hesaplanmış, böylece hasarların yerleri ve miktarları tespit edilmiştir. Farklı gürültü koşullarına ait verilerin kullanılması ile elde edilen hasar sonuçlarının belirsizlik ölçümü varyans analizi, meta-modelleme ve hassasiyet analizi yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir.

2 Materyal ve metot

2.1 Sonlu elemanlar modeli, hasar senaryosu ve problem tanımı

Çalışmada kullanılan iki katlı, tek açıklıklı düzlem çerçevenin sonlu elemanlar modeli Şekil 1'de verilmiştir. Toplam 32 eleman ve 32 düğüm noktasından oluşan çerçevenin kat yüksekliği 3 m, kat açıklığı ise 4 m'dir. Kolon ve kirişler dikdörtgen kesitli olup, boyutları sırasıyla 0.60 x 0.30 m ve 0.60 x 0.25 m'dir. Kullanılan malzemenin elastisite modülü değeri 32 GPa olarak alınmış olup, modelin mesnet koşulları tam ankastre olacak şekilde kabul edilmiştir. Hasarlı durumu temsil etmek üzere modelde üç farklı hasar bölgesi belirlenmiştir (Şekil 1). Buna göre, 1. kat kolonlarının alt uçlarına (1 ve 6 numaralı elemanlar), 1. kat kolon–kiriş birleşim bölgelerine (5, 10, 11, 16, 21 ve 26 numaralı elemanlar) ve 2. kat kolon–kiriş birleşim

bölgelerine (15, 20, 27 ve 32 numaralı elemanlar) sırasıyla %40, %25 ve %10 eğilme rijitliği azalmaları (hasar değerleri) tanımlanmıştır.



Hasar Bölgeleri	
Eleman No	Hasar Miktarı [%]
1, 6	40
5, 10, 11, 16, 21, 26	25
15, 20, 27, 32	10

Şekil 1. Çalışmada kullanılan sonlu elemanlar modeli

Hasar bölgelerine atanan hasarların tahmini, çalışmanın ilerleyen bölümlerinde açıklanacak olan farklı gürültü senaryoları için, MATLAB [26] tabanlı FEDEASLab [27] ortamında programlanan duyarlık tabanlı sonlu elemanlar modeli güncellemesi algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, hasarsız ve hasarlı modellerin ilk üç moduna ait modal parametreler (titreşim frekansları ve modal deplasman vektörleri) kullanılmıştır. Modal deplasman vektörleri, Şekil 1'de gösterilen 30 adet serbest düğüm noktasının ötelenme serbestlik dereceleri kullanılarak oluşturulmuştur. Buna göre, ele alınan her bir mod için 3 doğrultu (düzlem içi, düzlem dışı ve düşey) x 30 serbest düğüm noktası = 90 modal deplasman bileşeni ve 1 adet titreşim frekansı değeri kullanılmıştır. Modelin hasarsız ve hasarlı durumlarına ait titreşim frekansı değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Kullanılan model güncelleme yönteminin ve oluşturulan algoritmanın detayları, yazarların önceki çalışmalarında bulunmaktadır [28-30].

Tablo 1. Modelin hasarsız ve hasarlı durumlarına ait titreşim frekansı değerleri

Mod	Hasarsız Durum Frekansları [Hz]	Hasarlı Durum Frekansları [Hz]
1) Düzlem dışı	3.20	2.86
2) Burulma	8.68	7.94
3) Düzlem içi	14.27	12.61

Çalışmada, modal parametrelerdeki muhtemel tahmin hatalarına (belirsizliklere) bağlı olarak oluşan hasar tespit sonuçlarındaki belirsizliklerin araştırılması, hasarlı duruma ait modal parametrelere dört farklı seviyede varyasyon katsayısı (%0.50, %1.00, %1.50 ve %2.00) ile ilişkili gürültü verisi eklenerek gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde elde edilen modal parametre girdi faktörleri (M1, M2 ve M3), seviyeleri ile birlikte Tablo 2'de özetlenmiştir. Örneğin; M1 girdi faktörü 1. moda ait modal parametrelerdeki belirsizliği temsil etmekte olup, dört farklı belirsizlik seviyesine (%0.50, %1.00, %1.50 ve %2.00) sahiptir. Böylece, toplamda $4^3 = 64$ (4 belirsizlik seviyesi, 3 dikkate alınan mod sayısı) farklı modal parametre girdi faktörü kombinasyonu elde edilmiştir. Her bir kombinasyon seti için ise, Gauss dağılımına uygun olacak şekilde 20 gürültü gerçeklemesi (realizasyonu) üretilmiştir. Bir başka deyişle, 64 kombinasyonun her biri için, aynı karakteristiğe sahip olacak şekilde Gauss dağılımına uygun olarak 20 farklı gürültü verisi oluşturulmuştur. Sonuç olarak toplamda 64 x 20 = 1280 farklı senaryo elde edilmiş olup, hasar tespit algoritmasının toplamda 1280 kez çalıştırılması sağlanmıştır.

Tablo 2. Modal parametre girdi faktörlerinin seviyeleri ile birlikte tanımları

Faktör	Tanım	Seviyeler
M1	1. moda ait modal parametrelerdeki belirsizlik	4 Seviye (%0.50, %1.00, %1.50, %2.00)
M2	2. moda ait modal parametrelerdeki belirsizlik	4 Seviye (%0.50, %1.00, %1.50, %2.00)
M3	3. moda ait modal parametrelerdeki belirsizlik	4 Seviye (%0.50, %1.00, %1.50, %2.00)

2.2 Model güncelleme ve belirsizlik ölçümü algoritmaları

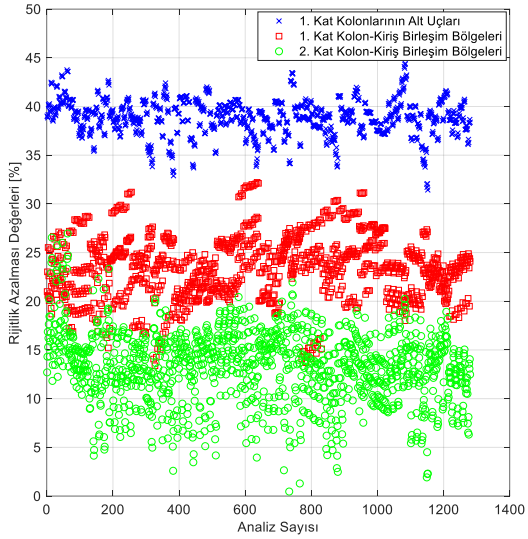
Kullanılan model güncelleme algoritmasında hasarsız ve hasarlı modellerin modal parametrelerinin farkları dikkate alınıp bir artık vektörü hesaplanır. Artık vektöründen oluşturulan amaç fonksiyonu ile doğrusal olmayan en küçük kareler (EKK) problemi tanımlanır. Artık vektörünün her bir bileşeninin eleman rijitlik ifadelerine göre hassasiyetleri (türevleri) hesaplanarak hassasiyet matrisi elde edilir. EKK probleminin minimizasyonu, artık vektörünün, amaç fonksiyonunun ve hassasiyet matrisinin bir optimizasyon algoritmasına dâhil edilmesiyle gerçekleştirilir. Sunulan çalışmada bu amaç için MATLAB'de yer alan "fmincon" komutu kullanılmıştır. Optimizasyon iteratif bir işlem olduğundan, her adımda yenilenen eleman rijitlik değerleri ile modal analiz tekrarlanır ve yeni bir artık vektörü, amaç fonksiyonu ve hassasiyet matrisi hesabı yapılır. Amaç fonksiyonunda yeteri kadar küçülme sağlanması ile model güncelleme işlemi tamamlanır ve nihai eleman rijitlikleri, dolayısıyla da hasar miktarları, hesaplanır.

Belirsizlik ölçümü için oluşturulan algoritma model güncelleme algoritmasından bağımsızdır. Farklı gürültü koşulları altında gerçekleştirilen model güncelleme çalışmalarının sonuçları belirsizlik ölçümü algoritmasının girdilerini oluşturmaktadır. Sunulan çalışmada, hasarlı durumu yansıtan modele ait modal parametrelere farklı nitelikte gürültü verisi eklenerek toplamda 1280 farklı model güncelleme problemi oluşturulmuştur. Buradan elde edilen 1280 hasar sonucu ise belirsizlik ölçümüne tabi tutulmuştur. Gauss dağılımına uygun gürültü verisi MATLAB'de "random" komutuyla üretilmiştir. Burada, ilgili modal parametre bileşeninin ortalama (titreşim frekansının kendisi, modal deplasman vektörü bileşenlerinin ortalaması) ve standart sapma (ortalama ve varyasyon katsayısının çarpımı) değerleri kullanılmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Hasar tespit sonuçlarının belirsizlik ölçümü

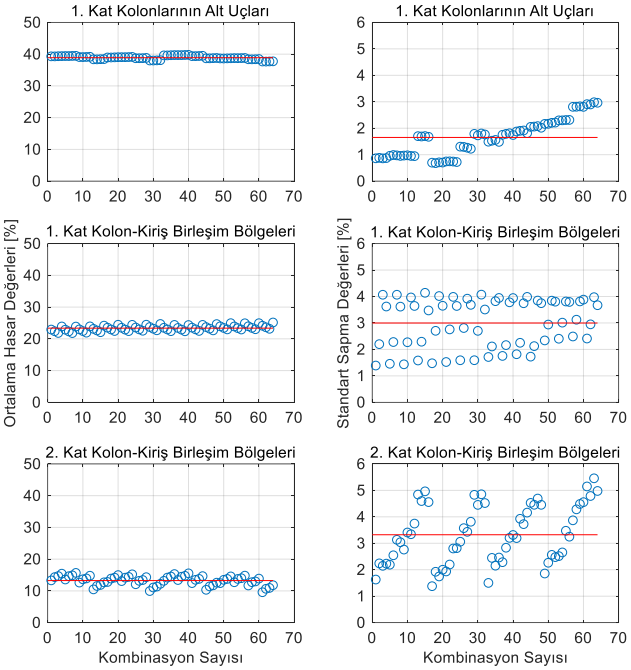
Önceki bölümde belirtildiği gibi, 1280 farklı durum için hasar tespit işlemi yapılmıştır. Elde edilen hasar tespit sonuçlarının (hasar bölgelerindeki rijitlik azalması değerlerinin) tamamı Şekil 2'de, 20 gürültü gerçeklemesinin hasar sonuçlarının ortalamaları alınarak elde edilen 64 girdi faktörü kombinasyonun ortalama ve standart sapma değerleri ise Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 3'te her bir daire 20 gürültü gerçeklemesinin ortalamasını, kırmızı yatay çizgiler ise tüm verilerin ortalamasını temsil etmektedir. Sonuçlara ait istatistiki değerler de Tablo 3'te sunulmuştur.



Şekil 2. Model güncelleme algoritmasının 1280 kez çalıştırılması ile elde edilen hasar tespit sonuçları (hasar bölgelerindeki rijitlik azalması değerleri)

Şekil 2-3 ve Tablo 3 incelenecek olursa, hasar tespit sonuçlarına ait ortalama değerlerin, her bir hasar bölgesi için tanımlanan gerçek hasar değerlerine yakın olduğu görülebilir. Standart sapma değerlerinin büyük olması, gerçek değerler etrafında saçılımın fazla oluşunun göstergesidir. Bu durum, optimizasyon probleminde kullanılan modal parametrelerin ilgili hasar bölgelerine daha az duyarlı olduğunu belirtmektedir. Bir başka deyişle, modal parametreler üzerindeki gürültü varlığı optimizasyon algoritmasının gerçek hasar değerine ulaşmasını zorlaştırmaktadır.

Şekil 2-3 ve Tablo 3, sonuçlar hakkında genel bir fikir verse de, hangi modal parametre girdi faktörünün (modal parametre üzerindeki gürültü verisinin) hangi hasar bölgesi üzerinde daha fazla (ya da daha az) etkili olduğu bilgisini sağlayamaz. Bir başka ifadeyle, bu bilgilerin tek başına kullanılması ile belirsizlik ölçümü yapılması mümkün değildir. Bu çalışma kapsamda, varyans analizi, meta-modelleme ve hassasiyet analizi yöntemleri kullanılarak hasar tespit sonuçlarının belirsizlik ölçümü yapılmıştır [31-36]. Böylece, bağımsız değişkenlerin (M1, M2, M3) bağımlı değişkenler üzerindeki (hasar bölgelerindeki rijitlik azalmaları) etkileri ayrıklaştırılmış ve hangi modal parametreler üzerindeki gürültü varlığının hangi hasar bölgesi sonuçları üzerinde daha etkili olduğu saptanmıştır.



Şekil 3. 20 gürültü gerçeklemesinin hasar sonuçlarının ortalamaları alınarak elde edilen 64 girdi faktörü kombinasyonunun ortalama ve standart sapma değerleri

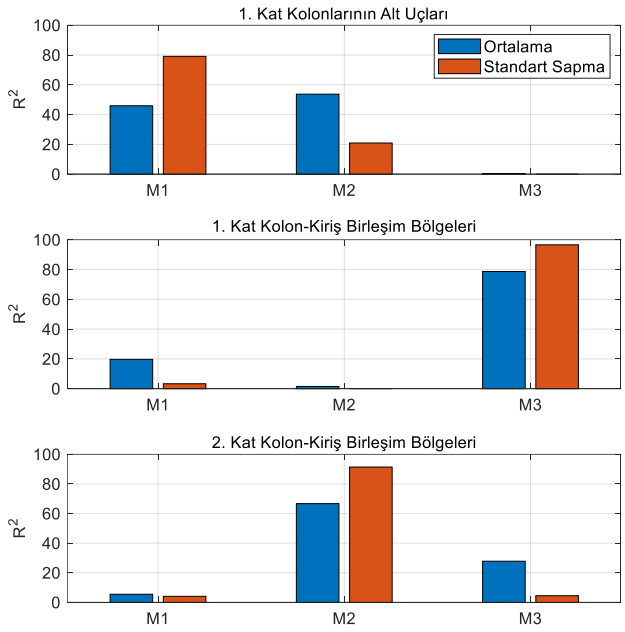
Tablo 3. Model güncelleme algoritmasının 1280 kez çalıştırılması ile elde edilen hasar tespit sonuçlarının istatistiki değerlendirmesi

Hasar Bölgesi	Gerçek Hasar [%]	Ortalama Değer [%]	Standart Sapma [%]
1. kat kolonlarının alt uçları	40	39.9	1.7
1. kat kolon–kiriş birleşim bölgeleri	25	23.4	3.0
2. kat kolon–kiriş birleşim bölgeleri	10	13.3	3.3

3.1.1 Varyans analizi çalışmaları

Şekil 3'teki veriler kullanılarak gerçekleştirilen varyans analizi çalışmalarının sonuçları Şekil 4'te sunulmuştur. Analizler MATLAB ortamında ''anovan'' komutu kullanılarak yapılmış olup, hesaplanan R^2 değerleri her bir hasar bölgesi için toplamları 100 olacak şekilde normalize edilmiştir. Sonuçlarda R^2 değerinin büyük olması, sözü geçen modal parametre girdi faktörünün, yani modal parametredeki gürültünün, ilgili hasar bölgesinin ortalama veya standart sapması üzerinde yarattığı belirsizlik etkisini büyük kılmaktadır. Bu durum, ilgili modal parametredeki gürültü varlığının hasar tespit sonuçları üzerinde etkili olarak belirsizlik oluşturduğunun göstergesidir. Şekil 4'e göre, düzlem dışı (M1) ve burulma (M2) modları üzerindeki gürültü varlığının, 1. kat kolonlarının alt uçları için hesaplanan hasar sonuçlarının ortalamaları ve standart sapmaları üzerinde önemli mertebede etkili olduğunu (büyük

R^2 değerleri) söylemek mümkündür. Bu, elde edilen hasar sonuçlarının güvenirliğini sarsan bir durumdur. Benzer yaklaşımla, diğer hasar bölgelerinin sonuçları üzerinde önemli mertebede belirsizlik oluşturan modal parametre girdi faktörleri belirlenmiş ve Tablo 4'te özetlenmiştir. Buna göre; düzlem dışı modun gürültüye bağlı olarak etkilenmesinin (M1) 1. kat kolonlarının alt uçlarında, burulma modunun gürültüye bağlı olarak etkilenmesinin (M2) 1. kat kolonlarının alt uçlarında ve 2. kat kolon–kiriş birleşim bölgelerinde, düzlem içi modun gürültüye bağlı olarak etkilenmesinin (M3) ise 1. kat kolon–kiriş birleşim bölgelerinde elde edilen hasar tespit sonuçlarında önemli mertebede belirsizlik oluşturduğu söylenebilir.



Şekil 4. Varyans analizi çalışmalarının sonuçları

Tablo 4. Hasar bölgelerindeki yüksek belirsizlik etkenleri (varyans analizi)

Hasar Bölgesi	Yüksek Belirsizlik Etkeni
1. kat kolonlarının alt uçları	Düzlem Dışı (M1) Burulma (M2)
1. kat kolon–kiriş birleşim bölgeleri	Düzlem İçi (M3)
2. kat kolon–kiriş birleşim bölgeleri	Burulma (M2)

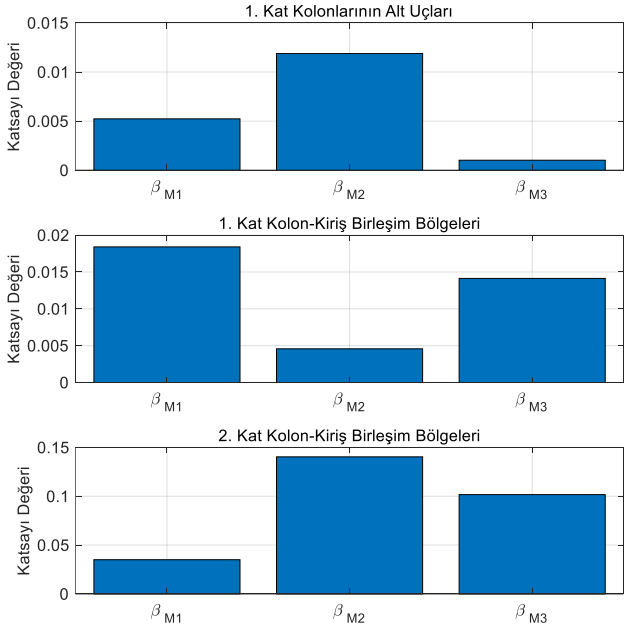
3.1.2 Meta-modelleme çalışmaları

Meta-modelleri, sistemlerin girdi ve çıktı parametreleri arasındaki ilişkiyi yansıtan yapılar olarak tanımlamak mümkündür. Meta-modelleme çalışmalarında, sistemlerin herhangi bir fiziksel karakteristiğine ihtiyaç duyulmaz, sadece sisteme ait girdi ve çıktı parametrelerinin bilinmesi yeterlidir. Meta-modeller, bu yönüyle kara-kutu modellere benzerlik gösterir ve uygulamada büyük kolaylıklar sağlamaktadır [31, 33].

Sunulan çalışmada, hasar bölgelerindeki hasar değerleri ve modal parametre girdi faktörleri ile birlikte Denklem (1)'de verilen doğrusal polinom model kullanılmıştır. Burada, Y hasar bölgesindeki ortalama hasar değerini, j hasar bölgesi indeksini (numarasını), M (M1, M2 ve M3) modal parametre girdi faktörlerini, β (β_{M1}, β_{M2} ve β_{M3}) ise modal parametre girdi faktörleri ile ilişkili meta-model katsayılarını göstermektedir. Bu katsayılarının belirlenmesi ile belirsizlik ölçümü tamamlanmış olmaktadır. Özel olarak, β_0'ın tüm hasar sonuçlarının ortalama değerine eşit olduğunu belirtmekte fayda vardır. Meta-modelleme sonuçlarında β değerinin büyük olması, ilgili olduğu modal parametre girdi faktörünün belirsizlik etkisini büyük kılmaktadır.

$$Y^j = \beta_0^j + \beta_{M1}^j M1 + \beta_{M2}^j M2 + \beta_{M3}^j M3 \quad (1)$$

Denklem (1) kullanılırken modal parametre girdi faktörleri –1 (en küçük değere karşılık gelen) ve 1 (en büyük değere karşılık gelen) aralığında değer alacak şekilde ölçeklendirilmiş, hasar değerleri ise gerçek değerleri ile normalize edilerek boyutsuzlaştırılmıştır. Analizler MATLAB ortamında ''fitlm'' ve ''regress'' komutları kullanılarak iki farklı şekilde yapılmış ve aynı katsayı değerleri (β) bulunmuştur. Elde edilen katsayıların mutlak değerleri alınarak Şekil 5'te gösterilmiştir. Ayrıca, β_0 değerlerinin de Tablo 3'te verilen ortalama değerler ile benzer olduğu gözlenmiştir. Şekil 5'in kullanılması ile hasar bölgelerinde önemli mertebede belirsizlik oluşturan modal parametre girdi faktörleri (büyük β değerine sahip olan) belirlenmiş ve Tablo 5'te özet olarak sunulmuştur. Buna göre; düzlem dışı modun gürültüye bağlı olarak etkilenmesinin (M1) 1. kat kolonlarının alt uçlarında ve 1. kat kolon–kiriş birleşim bölgelerinde, burulma modunun gürültüye bağlı olarak etkilenmesinin (M2) 1. kat kolonlarının alt uçlarında ve 2. kat kolon–kiriş birleşim bölgelerinde, düzlem içi modun gürültüye bağlı olarak etkilenmesinin (M3) ise 1. kat kolon– kiriş birleşim bölgelerinde ve 2. kat kolon–kiriş birleşim bölgelerinde elde edilen hasar tespit sonuçlarında önemli mertebede belirsizlik oluşturduğu sonucuna varılabilir.



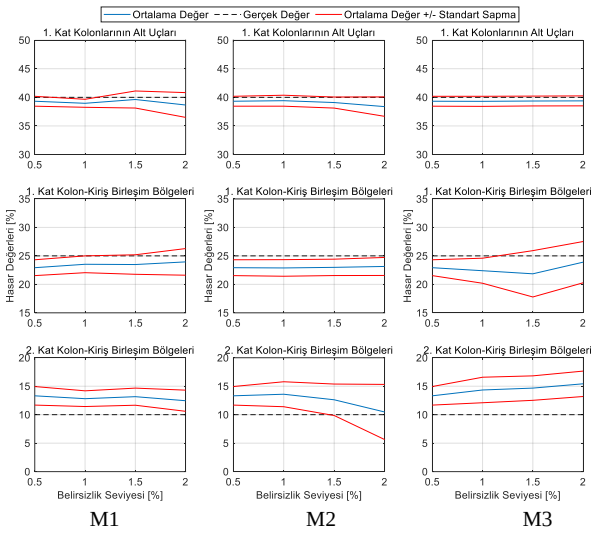
Şekil 5. Meta-modelleme çalışmalarının sonuçları

Tablo 5. Hasar bölgelerindeki yüksek belirsizlik etkenleri (meta-modelleme)

Hasar Bölgesi	Yüksek Belirsizlik Etkeni
1. kat kolonlarının alt uçları	Düzlem Dışı (M1) Burulma (M2)
1. kat kolon–kiriş birleşim bölgeleri	Düzlem Dışı (M1) Düzlem İçi (M3)
2. kat kolon–kiriş birleşim bölgeleri	Burulma (M2) Düzlem İçi (M3)

3.1.3 Hassasiyet analizi çalışmaları

Sunulan çalışmada, varyans analizi ve meta-modelleme çalışmalarının yanında, tespit edilen hasarların modal parametrelerdeki belirsizliğe (gürültü seviyesine) olan hassasiyetleri de araştırılmıştır. Bu kapsamda, sadece inceleme konusu olan girdi faktörünün belirsizlik seviyesi değiştirilmiş (%0.50, %1.00, %1.50 ve %2.00), diğer girdi faktörleri ise en küçük belirsizlik seviyesinde (%0.50) sabit tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar Şekil 6'da sunulmuş ve hasar bölgelerinin duyarlı olduğu modal parametre girdi faktörleri ise Tablo 6'da özetlenmiştir. Buna göre; 1. kat kolonlarının alt uçlarına ait hasar sonuçlarının modlardaki gürültü seviyelerine daha az duyarlı olduğu görülmektedir. 1. kat kolon–kiriş birleşim bölgelerinin hasar sonuçları düzlem içi modundaki gürültü seviyelerine (M3), 2. kat kolon–kiriş birleşim bölgelerindeki hasar sonuçları ise burulma ve düzlem içi modlarındaki gürültü seviyelerine (M2 ve M3) daha fazla duyarlıdır. Buna ek olarak, elde edilen hasar sonuçlarının burulma ve düzlem içi modlarındaki gürültü seviyelerine (M2 ve M3) daha fazla duyarlı olduğunu, düzlem dışı modundaki gürültü seviyelerine ise daha az duyarlı olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 6. Hassasiyet analizi çalışmalarının sonuçları

Tablo 6. Hasar bölgelerinin duyarlı olduğu modal parametre girdi faktörleri

Hasar Bölgesi	Yüksek Duyarlık Etkeni
1. kat kolonlarının alt uçları	-
1. kat kolon–kiriş birleşim bölgeleri	Düzlem İçi (M3)
2. kat kolon–kiriş birleşim bölgeleri	Burulma (M2) Düzlem İçi (M3)

Dikkat edilecek olursa, farklı yöntemler (varyans analizi, meta-modelleme ve hassasiyet analizi) kullanılarak gerçekleştirilen belirsizlik ölçümü çalışmaları tutarlı olmakla birlikte farklı sonuçlar da verebilmektedir (Tablo 4-6). Bunun nedeni, yöntemlerin probleme farklı açıdan yaklaşmasından kaynaklanmaktadır. Şöyle ki; varyans analizinde bağımsız grupların ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı fark olup olmadığını belirlenir, meta-modellemede girdi ve çıktı parametreleri arasındaki ilişkiler çoklu regresyon analizi ile matematiksel bir modele uydurulur, hassasiyet analizinde ise tek bir girdi faktörünün gürültü seviyesinin değiştirilmesi ile inceleme yapılır. Bu kapsamda önemli olan, farklı yöntemler ile elde edilen sonuçların değişkenlik gösterebileceğinin bilincinde olmak ve sonuçları kullanılan yönteme göre değerlendirmektir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada iki katlı, tek açıklıklı düzlem bir çerçeve modelinin hasar tespit sonuçlarının belirsizlik ölçümüne yer verilmiştir. Hasarlı durumu temsil etmek üzere 1. kat kolonlarının alt uçlarına, 1. kat kolon–kiriş birleşim bölgelerine ve 2. kat kolon–kiriş birleşim bölgelerine sırasıyla %40, %25 ve %10 eğilme rijitliği azalmaları tanımlanmış, bu hasarların tespiti için ise duyarlık tabanlı sonlu elemanlar modeli güncellemesi yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen hasar sonuçlarının belirsizlik ölçümü, hasarlı durumu yansıtan modele ait ilk üç modun modal parametreleri üzerine dört farklı varyasyon katsayısıyla (%0.50, %1.00, %1.50 ve %2.00) ilişkili gürültü verisi eklenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Böylece, toplamda 64 faklı belirsizlik kombinasyonu oluşturulmuştur. Her bir kombinasyon seti için ise, Gauss dağılımına uygun olacak şekilde 20 farklı gürültü gerçeklemesi üretilmiştir. Sonuç olarak, toplamda 1280 farklı durum elde edilmiş olup, hasar tespit işlemi 1280 kez tekrarlanmıştır. Farklı gürültü koşullarına ait hasar sonuçlarının istatistiksel değerlendirmesi yapılmış; varyans analizi, meta-modelleme ve hassasiyet analizi yöntemleri ile de sonuçların belirsizlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, belirli modlardaki gürültü etkilerinin yalnızca belirli hasar sonuçları üzerinde etkili olduğu gösterilmiş ve hasar sonuçlarında önemli mertebede belirsizlik oluşturan modlar belirlenmiştir. Şöyle ki:

– Varyans analizi çalışmalarının sonuçlarına göre;

(i) 1. kat kolonlarının alt uçlarında elde edilen hasar sonuçlarında düzlem dışı ve burulma modlarının,

(ii) 1. kat kolon–kiriş birleşim bölgelerinde elde edilen hasar sonuçlarında düzlem içi modunun,

(iii) 2. kat kolon–kiriş birleşim bölgelerinde elde edilen hasar sonuçlarında burulma modunun gürültüye bağlı olarak etkilenmesi önemli mertebede belirsizlik oluşturmaktadır.

– Meta-modelleme çalışmalarının sonuçlarına göre;

(i) 1. kat kolonlarının alt uçlarında elde edilen hasar sonuçlarında düzlem dışı ve burulma modlarının,

(ii) 1. kat kolon–kiriş birleşim bölgelerinde elde edilen hasar sonuçlarında düzlem dışı ve düzlem içi modlarının,

(iii) 2. kat kolon–kiriş birleşim bölgelerinde elde edilen hasar sonuçlarında burulma ve düzlem içi modlarının

gürültüye bağlı olarak etkilenmesi önemli mertebede belirsizlik oluşturmaktadır.

– Hassasiyet analizi çalışmalarının sonuçlarına göre;

(i) 1. kat kolonlarının alt uçlarında elde edilen hasar sonuçları modlardaki gürültü seviyelerine daha az duyarlıdır.

(ii) 1. kat kolon–kiriş birleşim bölgelerinde elde edilen hasar sonuçları düzlem içi modundaki,

(iii) 2. kat kolon–kiriş birleşim bölgelerinde elde edilen hasar sonuçları burulma ve düzlem içi modlarındaki gürültü seviyelerine daha fazla duyarlıdır.

(iv) Elde edilen hasar sonuçları burulma ve düzlem içi modlarındaki gürültü seviyelerine daha fazla duyarlı olup, düzlem dışı modundaki gürültü seviyelerine daha az duyarlıdır.

Sunulan çalışmada ele alınan belirsizlik ölçümü yaklaşımı, elde edilen hasar tespit sonuçlarının içerdikleri belirsizliklerin saptanabilmesini sağlar. Böylece, sonuçların ne kadar güvenilir olduklarına karar verilebilir. Özellikle yapı sağlığı izleme alanında güvenilir sonuçların elde edilmesi, gelecekte yapılması planlanan çalışma ve analizler açısından son derece önemlidir. Yaklaşım yapı tipinden, ölçeğinden, yükleme koşullarından ve yapıda meydana gelen hasar mekanizmalarından bağımsızdır. Bu sebeple de, farklı türden mühendislik yapıları üzerinde gerçekleştirilen hasar tespiti çalışmalarının sonuçlarının belirsizlik ölçümü için kullanılmasının önünde herhangi bir engel bulunmamaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

[1] M. I. Friswell and J. E. Mottershead, Finite Element Model Updating in Structural Dynamics. Springer Science+Business Media, Dordrecht, 1995.

[2] J. Nocedal and S. J. Wright, Numerical Optimization. Springer, New York, 1999.

[3] A. Teughels, Inverse modelling of civil engineering structures based on operational modal data. Ph.D. Thesis, Katholieke University, Leuven, Belgium, 2003.

[4] H. Sohn, C. R. Farrar, F. M. Hemez, D. D. Shunk, D. W. Stinemates, B. R. Nadler, and J. J. Czarnecki, A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001. Los Alamos National Laboratory, New Mexico, USA, Technical Report LA-13976-MS, 2003.

[5] A. Teughels and G. De Roeck, Structural damage identification of the highway bridge Z24 by FE model updating. Journal of Sound and Vibration, 278 (3), 589-610, 2004. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2003.10.041

[6] E. P. Carden and P. Fanning, Vibration based condition monitoring: a review. Structural Health Monitoring, 3 (4), 355-377, 2004. https://doi.org/10.1177/1475921704047500

[7] J. M. Brownjohn, Structural health monitoring of civil infrastructure. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 365 (1851), 589-622, 2007. https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1925

[8] B. Moaveni, J. P. Conte, and F. M. Hemez, Uncertainty and sensitivity analysis of damage identification results obtained using finite element model updating. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 24 (5), 320-334, 2009. https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2008.00589.x

[9] C. Boller, F. K. Chang, and Y. Fujino, Encyclopedia of Structural Health Monitoring. Wiley, West Sussex, 2009.

[10] T. Marwala, Finite Element Model Updating Using Computational Intelligence Techniques: Applications to Structural Dynamics. Springer, London, 2010.

[11] J. E. Mottershead, M. Link, and M. I. Friswell, The sensitivity method in finite element model updating: a tutorial. Mechanical Systems and Signal Processing, 25 (7), 2275-2296, 2011. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.10.012

[12] W. Fan and P. Qiao, Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study. Structural Health Monitoring, 10 (1), 83-111, 2011. https://doi.org/10.1177/1475921710365419

[13] E. Simoen, B. Moaveni, J. P. Conte, and G. Lombaert, Uncertainty quantification in the assessment of progressive damage in a 7-story full-scale building slice. Journal of Engineering Mechanics, 139 (12), 1818-1830, 2013. https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.19437889.0000610

[14] A. Nozari, I. Behmanesh, S. Yousefianmoghadam, B. Moaveni, and A. Stavridis, Effects of variability in ambient vibration data on model updating and damage identification of a 10-story building. Engineering Structures, 151, 540-553, 2017. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.044

[15] M. C. Kennedy and A. O'Hagan, Bayesian calibration of computer models. Journal of the Royal Statistical Society: Series B, 63 (3), 425-464, 2001. https://doi.org/10.1111/1467-9868.00294

[16] W. E. Walker, P. Harremoës, J. Rotmans, J. P. Van Der Sluijs, M. B. Van Asselt, P. Janssen, and M. P. Krayer von Krauss, Defining uncertainty: a conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support. Integrated assessment, 4 (1), 5-17, 2003. https://doi.org/10.1076/iaij.4.1.5.16466

[17] A. Der Kiureghian and O. Ditlevsen, Aleatory or epistemic? Does it matter?. Structural Safety, 31 (2), 105-112, 2009. https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2008.06.020

[18] C. Soize, Generalized probabilistic approach of uncertainties in computational dynamics using random matrices and polynomial chaos decompositions. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 81 (8), 939-970, 2010. https://doi.org/10.1002/nme.2712

[19] E. Simoen, G. De Roeck, and G. Lombaert, Dealing with uncertainty in model updating for damage assessment: a review. Mechanical Systems and Signal Processing, 56-57, 123-149, 2015. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.11.001

[20] T. Kernicky, M. Whelan, and E. Al-Shaer, Vibration-based damage detection with uncertainty quantification by structural identification using nonlinear constraint satisfaction with interval arithmetic. Structural Health Monitoring, 18 (5-6), 1569-1589, 2019. https://doi.org/10.1177/1475921718806476

[21] Y. Huang, C. Shao, B. Wu, J. L. Beck, and H. Li, State-of-the-art review on Bayesian inference in structural system identification and damage assessment. Advances in Structural Engineering, 22 (6), 1329-1351, 2019. https://doi.org/10.1177/1369433218811540

[22] E. Silva, C. Magluta, N. Roitman, and L. Aragoa Filho, Development of a structural identification methodology with uncertainty quantification through the SSI and bootstrap techniques. Mechanical Systems and Signal Processing,165, 108290, 2022. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108290

[23] Z. Yin, Z. R. Lu, J. Liu, and L. Wang, Quantifying uncertainty for structural damage identification in the presence of model errors from a deterministic sensitivity-based regime. Engineering Structures, 267, 114685, 2022. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114685

[24] D. Xie, Z. R. Lu, G. Li, J. Liu, and L. Wang, Efficient Laplace prior-based sparse Bayesian learning for structural damage identification and uncertainty quantification. Mechanical Systems and Signal Processing, 188, 110000, 2023. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.110000

[25] N. E. Silionis and K. N. Anyfantis, Data-driven probabilistic quantification and assessment of the prediction error model in damage detection applications. Probabilistic Engineering Mechanics, 71, 103412, 2023. https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2023.103412

[26] MATLAB. The MathWorks Inc., Massachusetts, USA, 2023.

[27] F. C. Filippou and M. Constantinides, FEDEASLab getting started guide and simulation examples. http://www.neesgrid.org/news/documents.php, Accessed 31 August 2004.

[28] E. Durmazgezer, Modal parameter estimation and damage identification on progressively damaged r/c frames. Ph.D. Thesis, Dokuz Eylül University, İzmir, Turkey, 2019.

[29] E. Durmazgezer, U. Yucel, and O. Ozcelik, Damage identification of a reinforced concrete frame at increasing damage levels by sensitivity-based finite element model updating. Bulletin of Earthquake Engineering, 17 (11), 6041-6060, 2019. https://doi.org/10.1007/s10518-019-00690-5

[30] U. Yucel, Finite element model updating and damage identification of reinforced concrete frames with different infills and unreinforced masonry walls. Ph.D. Thesis, Dokuz Eylül University, İzmir, Turkey, 2020.

[31] R. H. Myers and D. C. Montgomery, Response Surface Methodology. John Wiley & Sons, New York, 1995.

[32] A. Saltelli, K. Chan, and E. M. Scott, Sensitivity Analysis. John Wiley & Sons, New York, 2000.

[33] C. F. J. Wu and M. Hamada, Experiments: Planning, Analysis, and Parameter Design Optimization. John Wiley & Sons, New York, 2000.

[34] R. E. Walpole, R. H. Myers, S. L. Myers, and K. Ye, Probability and Statistics for Engineers and Scientists. Prentice Hall, Upper Saddle River, 2006

[35] D. C. Montgomery and G. C. Runger, Applied Statistics and Probability for Engineers. Wiley and Sons, New York, 2007.

[36] W. C. Navidi, Statistics for Engineers and Scientists. McGraw-Hill, Boston, 2007.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 196-204

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

An unconditional generative model with self-attention module for single image generation

Tek görüntü üretimi için öz-dikkat modüllü koşulsuz üretken bir model

Eyyüp Yıldız[1,*], Mehmet Erkan Yüksel[2], Selçuk Sevgen[3]

[1] *Erzincan Binali Yıldırım University, Computer Engineering Department, 24002, Erzincan Türkiye*
[2] *Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Computer Engineering Department, 15200, Burdur, Türkiye*
[3] *İstanbul University-Cerrahpaşa, Computer Engineering Department, 34320, İstanbul, Türkiye*

Abstract

Generative Adversarial Networks (GANs) have revolutionized the field of deep learning by enabling the production of high-quality synthetic data. However, the effectiveness of GANs largely depends on the size and quality of training data. In many real-world applications, collecting large amounts of high-quality training data is time-consuming, and expensive. Accordingly, in recent years, GAN models that use limited data have begun to be developed. In this study, we propose a GAN model that can learn from a single training image. Our model is based on the principle of multiple GANs operating sequentially at different scales, where each GAN learns the features of the training image and transfers them to the next GAN, ultimately generating examples with different realistic structures at the final scale. In our model, we utilized a self-attention and new scaling method to increase the realism and quality of the generated images. The experimental results show that our model performs image generation successfully. In addition, we demonstrated the robustness of our model by testing it in different image manipulation applications. As a result, our model can successfully produce realistic, high-quality, diverse images from a single training image, providing short training time and good training stability.

Keywords: Generative adversarial networks, single image generation, self-attention, image manipulation

Özet

Üretken Çekişmeli Ağlar (GANs), yüksek kaliteli sentetik verilerin üretilmesini sağlayarak derin öğrenme alanında devrim yaratmıştır. Bununla birlikte, GAN'ların etkinliği büyük ölçüde eğitim verilerinin boyutuna ve kalitesine bağlıdır. Birçok gerçek dünya uygulamasında, büyük miktarda yüksek kaliteli eğitim verisi toplamak zaman alıcı ve pahalı bir süreçtir. Buna bağlı olarak, son yıllarda, az veri kullanan GAN modelleri geliştirilmeye başlanmıştır. Bu çalışmada tek bir eğitim görüntüsünden öğrenebilen üretken çekişmeli ağ model önermekteyiz. Modelimiz, farklı ölçeklerde sıralı olarak çalışan birden fazla GAN'ın, eğitim görüntüsünün özelliklerini öğrenip son ölçekte farklı gerçekçi yapılarla örnekler ürettiği bir prensibe dayanmaktadır. Modelimizde, üretilen görüntülerin gerçekçiliğini ve kalitesini artırmak amacıyla bir öz-dikkat ve yeni ölçeklendirme yöntemi kullandık. Deneysel sonuçlar, modelimizin başarılı bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Buna ilaveten, modelimizi farklı görüntü manipülasyonu uygulamalarında test ederek model sağlamlığını ortaya koyduk. Sonuç olarak, geliştirdiğimiz GAN modeli; tek bir eğitim görüntüsünden faklı, gerçekçi ve kaliteli görüntü örneklerini başarılı bir şekilde üretebilmekte, kısa eğitim süresi ve iyi eğitim kararlılığı sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Üretken çekişmeli ağlar, tek görüntü üretimi, öz-dikkat, görüntü manipülasyonu

1 Introduction

Recent advances in deep learning techniques have contributed significantly to the growth of artificial intelligence. However, the acquisition of consistently structured datasets that conform to specified criteria poses a remarkable challenge confronting researchers and developers in the field of artificial intelligence. Creating large problem-specific datasets and performing the necessary pre-processing operations is challenging and time-consuming; in some cases, the dataset may not exist at all. Therefore, developing successful models for learning from small amounts of data has emerged as a significant research area. Recent works have focused on developing methods to learn effectively from limited data, such as transfer learning [1], meta-learning [2], and data augmentation [3]. Besides, several studies have explored the use of generative models to learn from low data regimes. For example, Variational Autoencoders (VAEs) have been utilized in natural language processing to produce new samples [4]. Few-shot learning generates more samples for under-represented classes using Generative Adversarial Networks (GANs) [5].

GANs [6], stand out as a powerful method in machine learning to generate synthetic data that can be used for various applications. However, training GANs with limited data has some challenges. One of these challenges is overfitting. GANs can lead to memorization of training data rather than learning specific features that generate new data. Hence, they are highly susceptible to overfitting when trained on small datasets. The other challenge is the mode collapsing which is a limited set of outputs, drawn by the

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: eyyup.yildiz@erzincan.edu.tr (E. Yıldız)
Geliş / Recieved: 27.09.2023 Kabul / Accepted: 15.10.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1367602

generator, that do not reflect the exact distribution of the training data. Mode collapse occurs more frequently when the generator network does not have enough samples to learn all the features in the data. Another challenge is training instability. GANs can be highly sensitive to hyperparameter selection, such as learning rates and batch sizes, and require a significant amount of fine-tuning to achieve stable training [7-9].

This study aims to propose an enhanced generative model that addresses the aforementioned issues by utilizing a single training image to generate new samples. Our model follows Single Image Generative Adversarial Network (SinGAN) [10], which is trained on a single natural image and produces diverse and visually plausible samples. SinGAN relies on a pyramid structure comprising fully convolutional GANs, wherein each level corresponds to a different scale of the input image. The key breakthrough of SinGAN lies in its utilization of a generative model at each pyramid level, enabling the transformation of feature maps from the previous level into the corresponding feature maps of the current level. However, despite the impressive outcomes, images generated by SinGAN often encounter challenges in preserving the intended overall structure or semantic content of the original image. In our model, we employed the self-attention module [11] to capture pixel dependencies within a single image, resulting in the generation of highly realistic images. Self-attention is a valuable tool as it enables the model to selectively emphasize different parts of the data that are most relevant for rendering the image. Additionally, we introduced a new scaling method for image resizing in our model. This method specifically focuses on enhancing the realistic representation of medium-sized objects in training images. Moreover, this approach facilitates a seamless transition from global dependencies to local dependencies during the image generation phase, thereby improving the overall coherence of the generated results. Consequently, our model aims to improve the quality and fidelity of produced images, addressing the specific challenges related to realism and object consistency.

The contributions of our study are summarized as follows:

- Using the self-attention module: To enhance the realism of generated images and improve the coherence of depicted objects.
- Introducing a new scaling method: To focus on medium-sized images generated in coarse scales of the training.

The rest of the paper is organized as follows. Section 2 presents a related work. Section 3 introduces our generative model using the self-attention module for the single image generation problem. Section 4 provides experimental results. Section 5 presents some image manipulation tasks such as paint-to-image and harmonization. Finally, Section 6 summarizes and concludes the paper.

2 Related Work

Developing GAN models that effectively operate with a limited amount of data poses an intriguing yet challenging task. Zakharov et al. [12] introduced an innovative solution in the form of a few-shot learning approach, which enables the creation of high-quality videos featuring individuals speaking, even when only a small number of images of the target person are available. The proposed model leverages a GAN architecture that operates specifically based on these target person images. Moreover, to improve the generated images' quality and maintain consistency with the target person's appearance, the GAN architecture is combined with a meta-learning approach. The results obtained from both training and test datasets demonstrated that the method is capable of producing impressive talking head videos. These videos exhibit realistic lip synchronization and facial expressions, even when trained on a small number of images. Lucic et al. [13] presented a model aimed at generating high-quality images when confronted with a scarcity of training data. Their approach involved the development of a GAN model incorporating both self-supervised learning and semi-supervised learning techniques. Self-supervised learning is used for extracting semantic features and guiding the training of the learnable GAN. Semi-supervised learning is used for selectively removing labels from a small subset of labelled training images and utilizing this modified dataset as conditional information during GAN training. By using self-supervised learning and semi-supervised learning together, the authors overcame the challenges associated with limited training data and achieved the generation of high-quality images. Noguchi and Harada [14] focused on the challenge of generating high-quality images when working with small datasets. They introduced a method that processes the batch statistics of a pre-trained GAN to adapt the characteristics of the limited dataset. By tailoring the aggregated statistics, their approach enables the model to generate high-quality images that align with the distribution of the small dataset. This adaptation process ensures that the generated images maintain consistency and fidelity with limited data, resulting in improved image quality.

Generating high-quality, diverse images from only a single training image has long been a challenging task in the field of deep learning. In response to this challenge, Shocher et al. [15] proposed the Internal GAN (InGAN) model, which stands as the pioneering generative model designed to operate exclusively on a single training image. Unlike traditional GAN models, InGAN specifically focuses on capturing and manipulating the internal structure of a single natural image, encompassing both low-level and high-level feature representations. By emphasizing the internal structure, InGAN produces diverse samples from a single training image. Shaham et al. [10] introduced SinGAN, which is an unconditional GAN model trained on a single natural image. SinGAN distinguishes itself from InGAN by becoming the first generative model capable of learning and producing new samples from a single training image. The model is structured around a hierarchical arrangement of fully convolutional GANs, with each level corresponding to a different scale of the training image. By training each sample using the input image progressively scaled from small to large, the top-level generative network generates the final output image. SinGAN's main innovation lies in its implementation of a generative model at each hierarchical

level, enabling the transformation of feature maps from the previous level to align with the corresponding feature maps at the current level. In addition, the integration of the patch discriminator [16] effectively reduces the memorization, allowing for training on the entire image. This significantly increases SinGAN's performance and image generation capabilities. Hinz et al. [17] presented Concurrent Single Image Generative Adversarial Network (ConSinGAN), which is based on the pyramid structure of SinGAN. However, ConSinGAN distinguishes itself in training method. Instead of networks operating at a single scale, it enables multiple scales to be trained concurrently with different learning rates,

The remarkable success of deep learning-based models in various domains has intensified the interest in this field. Alongside their achievements, researchers have proposed numerous methods to further optimize the performance of these models. Among these methods, attention has emerged as a prominent technique for enabling models to identify both local and global dependencies within datasets. The attention mechanism addresses a limitation in convolutional neural networks, where the filters that underpin their success excel at capturing local dependencies but struggle to detect global dependencies due to their limited receptive fields. By incorporating attention, models can selectively focus on different parts of the data, allowing them to capture and utilize both local and global information effectively. This advancement has proven instrumental in enhancing the capabilities of deep learning models, enabling them to handle a wider range of complex tasks by appropriately addressing both local and global dependencies within the data. The initial version of the attention mechanism was introduced by Bahdanau et al. [18]. The authors applied their model to the machine translation problem [18]. Subsequently, Vaswani et al. [19] proposed an attention mechanism for machine translation, which achieved remarkable success. This breakthrough paved the way for the widespread adoption of attention mechanisms beyond text-based models, extending their application to tasks such as image recognition [20], image classification [21], and image segmentation [22]. The introduction of the self-attention mechanism in the context of image generation was accomplished by H. Zhang et al. with Self-Attention Generative Adversarial Network (SAGAN) [11]. This study demonstrated the successful utilization of self-attention, showcasing its effectiveness in image-generation tasks with fewer iterations. In terms of detecting dependencies within images and producing high-quality results, SAGAN stands out as a pioneering and original approach among GAN models. Its incorporation of self-attention has significantly advanced the field of image generation and demonstrated its potential for generating visually compelling outputs.

3 Material and method

Our model is an unconditional GAN that generates diverse images. It performs image generation by employing a sequential approach with multiple GANs that cater to various image sizes. The overall architecture of our model is showed in Figure 1. We followed a similar image generation procedure with SinGAN [10]. Training across all sizes follows the conventional principles of GAN training, maintaining consistency throughout. In each dimension, the training process remains consistent. Specifically, for the smallest scale, the generating network receives input in the form of noise-only data. However, as we move through sequential scales, the generative networks take as input the sum of the image generated at the preceding scale and the noise data. This iterative process ensures a progressive generation of images with increasing levels of complexity and detail, resulting in high-quality outputs. Let's denote the scaled image set of x with K = $\{x_0, x_1, \cdots, x_s\}$, although the image used for training is x, the number of scales is s. For each scale, we denote generator and discriminator pairs as $\{(G_0, D_0), (G_1, D_1), \cdots, (G_s, D_s)\}$. According to this, the model operates starting from the initial network (G_0, D_0) and continues training until the completion of network (G_s, D_s). Once the training of (G_i, D_i) is completed, the parameter values are frozen, and the training transitions to (G_{i+1}, D_{i+1}). For ith scale, to generate the image $\tilde{x}_{i+1}$ produced by (G_i), upsampling is applied to the image using interpolation, and noise data is added. This resulting image is then fed into the generator network G_{i+1} of (G_{i+1}, D_{i+1}) for training.

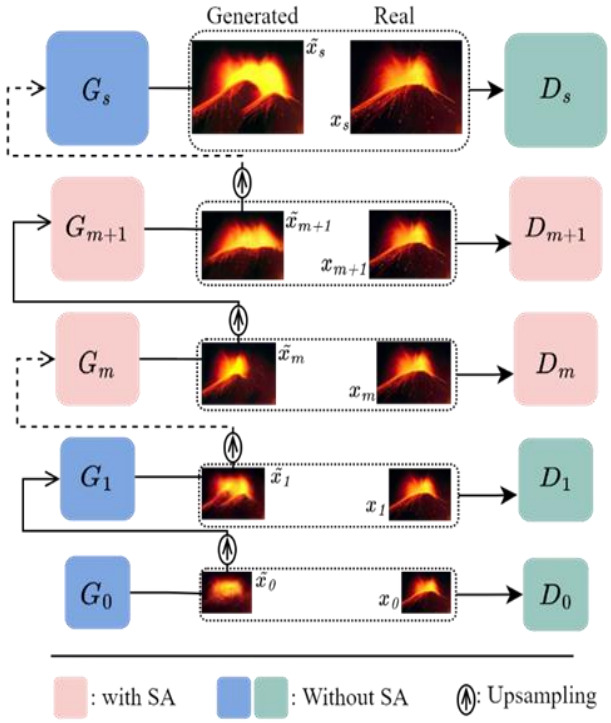


Figure 1. The system architecture of our model.

For model training, we employed a combination of adversarial and reconstruction loss functions, as specified in Equation (1). The patch discriminator was utilized as the means to split the image into patches for evaluation. Unlike evaluating the entire training image, the patch discriminator focuses on assessing individual patches within the image, enabling more targeted analysis. The reconstruction loss function was employed to ensure that specific (fixed) noise

values converge to the training image within the infinite noise space. To implement this, we utilized the $\mathcal{L}2$ quadratic difference function described in Equation (2). As for the adversarial loss function, we adopted the Wasserstein Generative Adversarial Network Gradient Penalty (WGAN-GP) [23] formulation, which has proven to be effective in promoting adversarial learning and generating high-quality results. WGAN-GP stands as a variant of the traditional GAN framework and offers significant improvements by introducing the Wasserstein distance metric and the gradient penalty technique. These additions address several limitations commonly encountered in traditional GANs, such as training instability and mode collapsing. The Wasserstein distance metric serves to quantify the dissimilarity between the distributions of real and generated data, offering a more informative and easier-to-optimize measure compared to conventional Jensen-Shannon or Kullback-Leibler deviations. By leveraging the Wasserstein distance, the model gains valuable insights into the quality of the generated samples.

The parameter values of the model were used based on [10]. However, we determined the iteration and filter number parameters as a result of our experiments. In our model, both the generator and discriminator networks are trained for 2000 iterations at each scale. We employ a 3x3 convolution-Batch Normalization- Leaky Rectified Linear Unit (Leaky ReLU) layer in both networks. The Tanh activation function is used solely in the last layer of the generator network for each scale. Our networks consist of 6 convolution blocks, with 32 filters used for images up to half of the training image scale and 64 filters used for larger images at other scales. In networks without self-attention, we substitute self-attention with a convolution layer. In cases where the same number of filters are used, we set the initial parameters of the networks to the final values obtained in the previous scale. However, for other scenarios, we initialize the networks with random parameter values. The learning rate employed is set at 5e-4. We used Adam optimizer [24] with $\beta_1 = 0.5, \beta_2 = 0.9$. We determined the coefficient of reconstruction loss values as α=10 [10]. The average run time of our model on the NVIDIA TITAN X PASCAL GPU is 35 minutes.

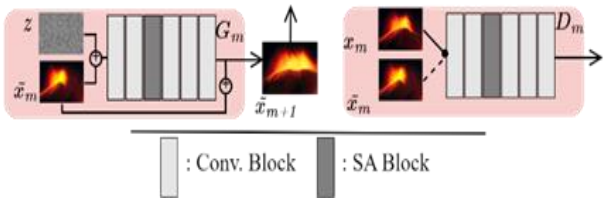


Figure 2. The self-attention module in the generator and discriminator.

$$\min_{G_s} \max_{D_s} \mathcal{L}_{adv}(G_s, D_s) + \alpha \mathcal{L}_{rec}(G_s) \quad (1)$$

$$\mathcal{L}_{rec} = \|G(z_i) - x_i\|_2^2 \quad (2)$$

The success of our work depends on the number of scales needed for training and the size of the educational image at each scale. In addition to enhancing the model structure, we focused on improving the scaling method. Generally, the receptive fields of convolution filters in the generator and discriminator networks match the size of medium-sized objects in the image. Hence, during the image scaling process, our objective was to generate a greater number of scales that aligned with the sizes of the targeted objects within the processing areas. This approach allows us to achieve improved results and a better representation of objects at various scales. In SinGAN, the scaling factor for an image with size x_S to obtain an image with size x_m in dimension m is given by r^m, where r is the scaling factor. Therefore, the scaling operation in SinGAN can be expressed as $x_m = x_S \times r^m$. obtain scales with a higher representation of medium-sized images, we determined the scale coefficient using the piecewise function outlined in Equation (3). This approach enables our model to effectively transfer global features learned from small-scale images to large-scale local features. In our proposed model, we utilized a minimum image size of 25 pixels and a maximum image size of 250 pixels for the scaling process. Figure 3 illustrates a comparison between the scaling methods employed by SinGAN and our model. Through experimentation, we determined the scaling factor ($r_0 = 0.7$ and the scale add-on $\varepsilon = 0.1$ in the scaling method based on the fundamental base. These parameters were identified as a result of rigorous testing and analysis.

$$r^m = \begin{cases} (1+\varepsilon) \times {r_0}^m, 0 \le m \le 2 \\ (1-\varepsilon) \times {r_0}^m, 3 \le m \le 5 \\ {r_0}^m, m > 5 \end{cases} \quad (3)$$

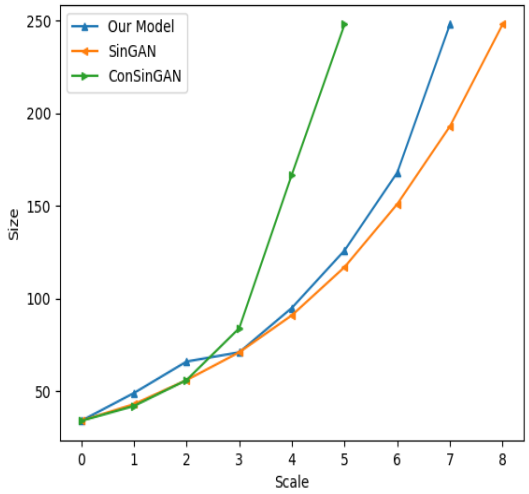


Figure 3. Comparison of the scaling methods.

In our model, we incorporated the self-attention block to create medium-sized networks (G_i, D_i). Figure 2 represents internal structure of each (G_i, D_i) network pair. Every G_i has a residual connection that aggregates input image $(\tilde{x}_i)$ with output image. Each network contains the self-attention block, which was implemented with reference to [11]. This block establishes a connection between each element of the

input array, such as individual pixels of the image, and a vector representation within the self-attention mechanism. By utilizing these vector representations, we assess the significance of each element by calculating attention weights. The self-attention mechanism provides a crucial advantage: the ability to selectively focus on different components of the input array. This selective focus is especially valuable when certain regions of the image have varying importance in generating specific outputs. With the aid of self-attention, our model concentrates on the most critical areas of the image for generating each pixel, resulting in higher-quality images with enhanced levels of detail. In the scaling method we use, our model focuses more on medium-sized images. Using a self-attention block at all scales reduces the variety of images produced and requires excessive processing power. For this reason, we used the self-attention block only in medium-sized networks.

4 Results and discussions

To evaluate the performance of our model, we utilized a dataset of 50 images selected from the Places dataset [25], as well as additional training images obtained from the Internet. Figure 4 shows several image samples generated by our model by using the training images in [25-27]. The results demonstrate that our model can produce diverse and realistic images, maintaining high variability while being situated in the same space as the training images. For instance, upon examining the waterfall image in the first row, our model successfully generates realistic patterns with varying structures and locations. Similarly, in the second row featuring the colosseum image, the generated samples showcase the model's ability to maintain the structure and position of the Colosseum while producing distinct and realistic variations. This highlights the model's capability to capture pixel dependencies effectively. Additionally, we evaluated our model's performance by feeding inputs of different sizes to the generator network, consisting of convolutional layers. We randomly selected and presented some of the resulting outputs in Figure 4. These demonstrate how our proposed model successfully generates diverse and realistic images while preserving pixel dependencies, even for inputs of variable sizes.

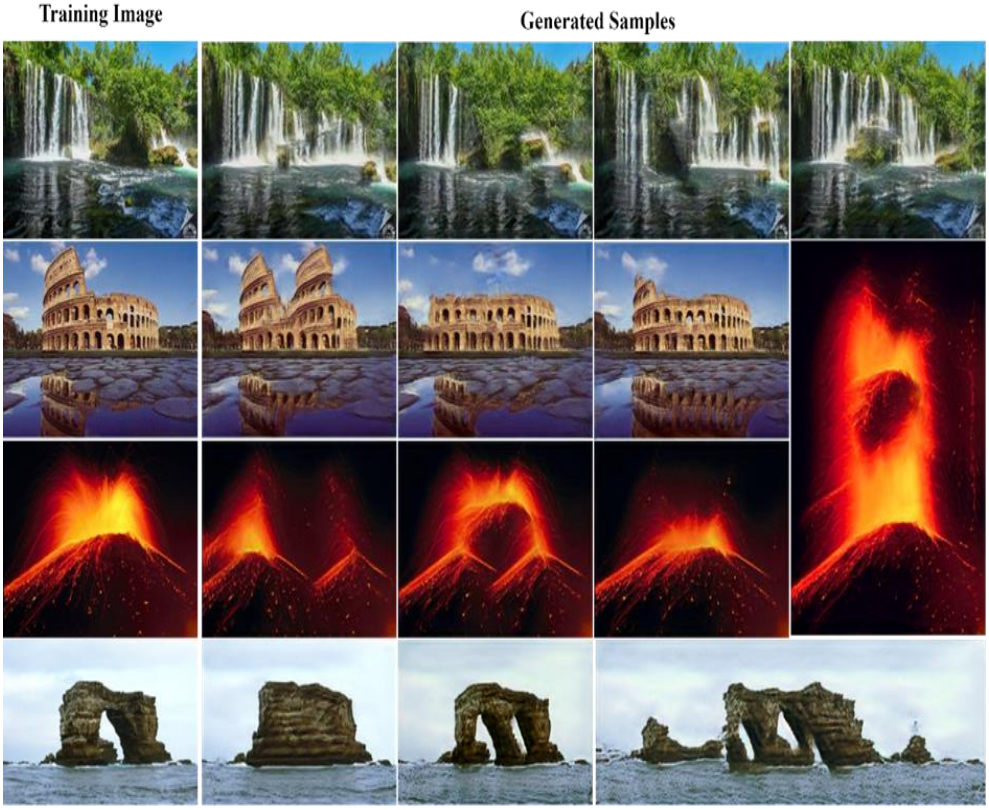


Figure 4. Images samples generated by our model.

Table 1. Quantitative results for Places dataset.

	SinGAN [10]	ConSinGAN [17]	Our Model
SIFID(↓)	0.09	0.06	0.08
SSIM(↓)	0.46	0.44	0.47
# Scale	~8-9	~5-6	~7-8
Training Time	~50 dk.	~25 dk.	~35 dk.
# Parameter	~1.350.000	~650.000	~1.050.000

To quantitatively evaluate the images produced by our model, we employed the Single Image Fréchet Inception Distance (SIFID) method [10]. SIFID is an adaptation of the Fréchet Inception Distance [29] specifically tailored for single images. By utilizing feature maps extracted from intermediate layers of a pre-trained Inception network, SIFID compares the real and generated images. A lower SIFID value suggests that the generated images are more realistic. Additionally, to assess diversity, we employed the Structural Similarity Index Metric (SSIM) [30]. SSIM serves as a metric for measuring the similarity between two images, taking into account structural information, brightness, and contrast. It achieves this by dividing the images into small pixel windows and calculating their respective means, variances, and covariances. The mean represents the average brightness within the window, the variance reflects the contrast level, and the covariance measures the correlation between windows in the two images, indicating how well the images align in terms of structure.

Table 1 presents the results obtained for the Places dataset, providing insights into the performance of our proposed model. Notably, our model achieved 0.08 SIFID value, outperforming SinGAN. Furthermore, when examining the diversity values, all models achieved similar levels of SSIM value. These findings highlight the ability of our model to effectively learn global dependencies in real images, resulting in the generation of highly realistic images. Notably, our proposed model also boasts a reduced parameter count and requires less training time, showcasing its superiority over SinGAN in terms of both performance and efficiency.

5 Applications

We tested our model on two different applications: paint-to-image and harmonization. For training images [27, 28] used in these applications, we conducted unconditional image generation training. Once the training phase was completed, each application went through the inference phase without any modifications or adjustments made to the model. The inference stage of the applications was carried out using the trained model as is, without any changes or fine-tuning.

5.1 Paint-to-image

Figure 5 presents the visual outcomes acquired for the paint-to-image application. Through the employing of a trained model, the objective of this application is to generate realistic drawings. A drawing is created that possesses the same textural and structural features as the training image. The generative model is trained on a single image. Once the model training is complete (i.e., in the test time), the drawing is provided to the model as input at a specified scale. The model's task is to generate a realistic version of the input drawing, progressing from the initial scale to the final scale. Notably, this application does not prescribe a specific input scale level. In the case of drawing, all available scales are consecutively employed as the input scale, and the model generates corresponding outputs. The choice of the input scale depends on the scale at which the model yields the most realistic output. In the domain of the paint-to-image application, the input scales range between 2 and 4. The selection of the input scale significantly influences the resulting output.

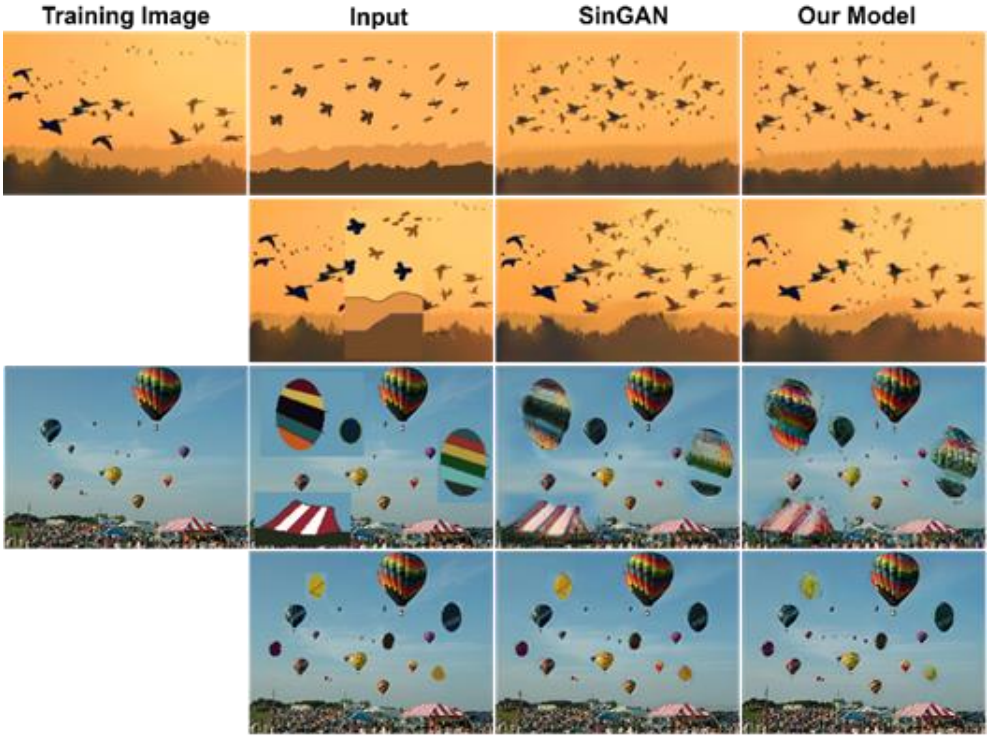


Figure 5. Paint-to-image.

Table 2. Quantitative results for paint-to-image.

	SinGAN [10]	Our Model
SIFID(↓)	3.2	3.1
SSIM(↑)	0.55	0.57

Two different implementations have been utilized to carry out this application. In the first implementation, the model receives the complete drawing as its input and produces the transformation of this drawing into highly plausible and visually coherent images. This approach showcases the model's ability to process the essential textural and structural features of the drawing.

In the second implementation, drawing patches are meticulously embedded within the training images. With this hybrid input, the trained mode attempts to generate more integrative and contextualized images. Figure 5 shows the visual outcomes of paint-to-images for two single training images. Successful outputs of different types of input images underscores the model's versatility and adaptability in handling different input scenarios, further underscoring its potential applicability across a range of use cases within the realm of computer vision and image generation. Table 2 indicates our model achieves similar SIFID and SSIM values with SinGAN for these images.

5.2 Harmonization

Harmonization is the process of modifying an inserted object within an image to match the image's visual structure. The application image is created by placing an object within the training image. In this context, the training image can be considered a background image. The application image is given as input at a certain scale to the model trained on the training image. The core objective of the model is to orchestrate a harmonious fusion of the inserted object with the background image, all while faithfully adhering to the characteristic traits inherent in the training image.

The degree to which the added object carries the characteristics of this background image indicates the level of realism achieved. Similar to the paint-to-image application, the scale at which the harmonized image is introduced to the model during the inference stage plays a pivotal role in shaping the outcome.

Figure 6 unfolds a comparative exposition of harmonization outcomes of our model in comparison to SinGAN and ConSinGAN. These results unveil the resounding success of our model in striking a balance that heightens the realism and naturalness of the inserted objects within the image. SIFID and SSIM values for harmonization reveals that our model Works successfully as other models, in Table 3.



Figure 6. Harmonization.

Table 3. Quantitative results for harmonization.

	SinGAN [10]	ConSinGAN [17]	Our Model
SIFID(↓)	4.6	3.4	4.2
SSIM(↑)	0.24	0.26	0.24

6 Conclusions

In this study, we proposed a GAN model that operates on a training dataset. Our model is based on the SinGAN architecture but incorporates significant modifications. While SinGAN may struggle to capture global dependencies and semantic coherence in training images, our aim was to address this limitation. To achieve this, we introduced self-attention blocks in the intermediate layers of both the generator and discriminator networks. This approach facilitates a smoother transition between the global features learned at smaller scales to the local features learned at larger scales. As a result, our model becomes more capable of accurately detecting both local and global features in images. Furthermore, we employed a scaling function that ensures the dimensions of training images at intermediate scales are closer to each other. This approach allows the convolution filters, which remain fixed in size, to operate more effectively in capturing the details of objects at intermediate scales. The improved structure and scaling method of our model enable it to learn the structure, position, and realism of objects more effectively. We demonstrated through measurement results that having similar dimensions for intermediate-scale images and the use of self-attention blocks in these scales contribute to the enhanced performance of our model. Additionally, ability of our model to produce high-quality outputs in both paint-to-image and harmonization applications demonstrates its suitability for image manipulation tasks in addition to unconditional image generation. In conclusion, our proposed model exhibits potential for applications in various domains with limited or single data availability.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 3%

References

[1] S. J. Pan, Q. Yang, A survey on transfer learning. IEEE Transactions on knowledge and data engineering, 22(10), 1345-1359, 2010. 10.1109/TKDE.2009.191

[2] C. Finn, P. Abbeel, and S. Levine, Model-agnostic meta-learning for fast adaptation of deep networks. International conference on machine learning PMLR, pp. 1126-1135, Sydney, Australia 6-11 August 2017.

[3] C. Shorten and T. M. Khoshgoftaar, A survey on image data augmentation for deep learning. Journal of big data, 6(1), 1-48, 2019. https://doi.org/10.1186/s40537-019-0197-0

[4] S. R. Bowman, L. Vilnis, O. Vinyals, A. M. Dai, R. Jozefowicz and S. Bengio, Generating sentences from a continuous space. 20th SIGNLL conference on computational natural language learning, CoNLL 2016. Association for computational linguistics (ACL), pp. 10-21, Berlin, Germany, 11-12 August 2016.

[5] F. Sung, Y. Yang, L. Zhang, T. Xiang, P. H. Torr and T. M. Hospedales, Learning to compare: relation network for few-shot learning. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pp. 1199-1208, Salt Lake City, USA, 18-23 June 2018.

[6] I.J. Goodfellow, J. Pouget-Abadie, M. Mirza, B. Xu, D. Warde-Farley, S. Ozair, A.C. Courville and Y. Bengio, Generative adversarial networks. Communications of the ACM, 63(11), 139-144, 2020. https://doi.org/10.1145/3422622

[7] T. Salimans, I. Goodfellow, W. Zaremba, V. Cheung, A. Radford and X. Chen, Improved techniques for training gans. Advances in neural information processing systems, Barcelona, Spain, 5-10 December, 2016.

[8] M. Arjovsky and L. Bottou, Towards principled methods for training generative adversarial networks. Advances in neural Information Processing Systems, Barcelona, Spain, 5-10 December, 2016.

[9] Z. Zhang, M. Li and J. Yu, On the convergence and mode collapse of GAN. SIGGRAPH asia 2018 technical briefs, pp. 1-4, Tokyo, Japan, 4-8 December 2018.

[10] T.R. Shaham, T. Dekel and T. Michaeli, SinGAN: Learning a generative model from a single natural ımage. Proceedings of the IEEE/CVF ınternational conference on computer vision, pp. 4570-4580, Seoul, Korea (South), 27 October-2 November, 2019.

[11] H. Zhang, I. Goodfellow, D. Metaxas and A. Odena. Self-attention generative adversarial networks. 36th international conference on machine learning PMLR, pp. 7354-7363, Long Beach, California, USA, 9-15 June 2019.

[12] E. Zakharov, A. Shysheya, E. Burkov and V. Lempitsky, Few-shot adversarial learning of realistic neural talking head models. Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision, pp. 9459-9468, Seoul, Korea (South), 27 October-2 November, 2019.

[13] M. Lučić, M. Tschannen, M. Ritter, X. Zhai, O. Bachem and S. Gelly, High-fidelity image generation with fewer labels. 36th international conference on machine learning PMLR, pp. 4183-4192, California, USA, 9-15 June 2019.

[14] A. Noguchi and T. Harada, Image generation from small datasets via batch statistics adaptation. Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision, pp. 2750-2758, Seoul, Korea (South), 27 October-2 November, 2019.

[15] A. Shocher, S. Bagon, P. Isola and M. Irani, InGAN: capturing and retargeting the 'DNA' of a natural ımage. Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision, pp. 4492-4501, Seoul, Korea (South), 27 October-2 November, 2019.

[16] P. Isola, J.Y. Zhu, T. Zhou and A.A. Efros, Image-to-image translation with conditional adversarial networks. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. pp. 1125-1134, Honolulu, HI, USA, 21-26 July, 2017.

[17] T. Hinz, M. Fisher, O. Wang and S. Wermter, Improved techniques for training single-ımage gans. Proceedings of the IEEE/CVF winter conference on applications of computer vision (WACV), pp. 1300–1309, January 5 – 9, 2021.
[18] D. Bahdanau, K. Cho and Y. Bengio, Neural machine translation by jointly learning to align and translate. Proceedings of the 3rd ınternational conference on learning representations, San Diego, CA, USA, 7-9 May, 2015.
[19] A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar, J. Uszkoreit, L. Jones, A.N. Gomez, Ł. Kaiser and I. Polosukhin, Attention is all you need. Advances neural information processing systems 30, pp. 6000–6010, Long Beach, CA, USA, 4-9 December, 2017.
[20] H. Zhao, J. Jia and V. Koltun, Exploring self-attention for ımage recognition. Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition, pp. 10076-10085, Seattle, WA, USA, 13-19 June, 2020.
[21] I. Bello, B. Zoph, A. Vaswani, J. Shlens and Q.V. Le, Attention augmented convolutional networks. Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision, pp. 3286-3295, Seoul, Korea (South), 27 October-2 November, 2019.
[22] J. Fu, J. Liu, H. Tian, Y. Li, Y. Bao, Z. Fang and H. Lu, Dual attention network for scene segmentation. Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition, pp. 3146-3154, Long Beach, CA, USA, 15-20 June 2019.
[23] I. Gulrajani, F. Ahmed, M. Arjovsky, V. Dumoulin and A.C. Courville, Improved training of wasserstein gans. Advances in neural information processing systems 30, pp. 5769-5779, Long Beach, CA, USA, 4-9 December, 2017.
[24] D.P. Kingma and J. Ba, Adam: a method for stochastic optimization. Proceedings of the 3rd international conference on learning representations, San Diego, CA, USA, 7-9 May, 2015.
[25] B. Zhou, A. Lapedriza, J. Xiao, A. Torralba and A. Oliva, Learning deep features for scene recognition using places database. Advances in neural information processing systems, pp. 487–495 Montreal, Quebec, Canada, 8-13 December, 2014.
[26] Düden şelalesi. https://www.kulturportali.gov.tr/contents/images/Yukar%c4%b1%20D%c3%bcden_Servet%20Uygun%20logolu.jpg, Accessed 10 September 2023.
[27] SinGAN github web site. https://github.com/tamarott/SinGAN/tree/master/Input/Images, Accessed 1 September 2023.
[28] ConSinGAN github web site. https://github.com/tohinz/ConSinGAN/tree/master/Images/Harmonization, Accessed 1 September 2023.
[29] M. Heusel, H. Ramsauer, T. Unterthiner, B. Nessler and S. Hochreiter, GANs trained by a two time-scale update rule converge to a local nash equilibrium. Advances in neural information processing systems 30, pp. 6629–6640, Long Beach, CA, USA, 4-9 December, 2017.
[30] Z. Wang, A.C. Bovik, H.R. Sheikh and E.P. Simoncelli, Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. IEEE Transactions on image processing, 13(4), 600-612, 2004. 10.1109/TIP.2003.819861

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 205-215
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
Araştırma makalesi / Research article
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Fotovoltaik termal güneş kolektörlü soğutma sisteminin yaşam döngüsü iklim performansı (LCCP) analizi

Life cycle climate performance (LCCP) analysis of photovoltaic thermal solar collector refrigerating system

Burak Aktekeli[1,*], Mustafa Aktaş[2], Süleyman Erten[3], Melis Öder[4], Fatma Nur Erdoğmuş[5], Yaren Güven[6]

[1] *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü 06560, Ankara, Türkiye*
[1] *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Osmaneli Meslek Yüksekokulu, İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Programı, 11500, Bilecik, Türkiye*
[2,6] *Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü 06560, Ankara, Türkiye*
[3,4,5] *Nurdil Teknik Soğutma A.Ş., Ahi Evran Organize Sanayi Bölgesi, 06935, Ankara, Türkiye*

Öz

Günümüzde teknolojik gelişmeler, iklim değişikliği ve nüfus artış hızına bağlı olarak verimli ve sürdürülebilir enerji sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle dünyadaki enerji talebi ile arzı arasındaki boşluğu giderebilmek için alternatif (yenilenebilir) enerji kaynaklarına yönelme, var olan enerjiyi depolama ve enerjiyi verimli bir şekilde kullanma yollarına gidilmektedir. Enerjinin sürekliliği ve güvenilirliği açısından yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanan, enerji verimliliğini arttıran ve fazla-atık olan enerjiyi depolayan teknolojilerin önemi her zamankinden daha fazla artmaktadır. Endüstri uygulamalarındaki yüksek enerji maliyetleri, enerji depolamalı sürdürülebilir güneş enerjili alternatif uygulamalara olan talebin artmasındaki en büyük etkenlerden biridir. Bu çalışmada, sürdürülebilir yeni bir tip fotovoltaik termal güneş kolektörlü soğutma sisteminin tasarlanması ve Yaşam Döngüsü İklim Performansı (LCCP) analizi yapılması hedeflenmiştir. LCCP analizi sonucunda doğrudan emisyonlar 0.81 $kgCO_{2e}$, dolaylı emisyonlar 119235.5 $kgCO_{2e}$ ve toplam LCCP emisyonu 119236.3 $kgCO_{2e}$ olarak hesaplanmıştır. Bu sistem sayesinde ısıtma, enerji depolama ve soğutma işleminin birlikte gerçekleştirildiği sürdürülebilir bir sistem tasarlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Isı pompası, PV/T sistem, Isı depolama, Soğutma, LCCP

Abstract

Today, there is need for efficient and sustainable energy systems due to technological developments, climate change and population growth. For this reason, in order to eliminate the gap between energy demand and supply in the world, alternative (renewable) energy sources, storage of existing energy and efficient usage of energy are being used. The importance of technologies that utilize renewable energy sources, increase energy efficiency and store excess-waste energy is increasing more than ever in terms of energy continuity and reliability. The high cost of energy in industrial applications is one of the major factors for the growing demand for sustainable solar alternative applications with energy storage. In this study, it is aimed to design a new type of sustainable photovoltaic thermal solar collector refrigerating system and to perform Life Cycle Climate Performance (LCCP) analysis. Result of the LCCP analysis, direct emissions were calculated as 0,81 $kgCO_{2e}$, indirect emissions as 119235.5 $kgCO_{2e}$ and total LCCP emission as 119236.3 $kgCO_{2e}$. Thanks to this system, a sustainable system has been designed where heating, energy storage and refrigerating are carried out together.

Keywords: Heat pump, PV/T system, Heat storage, Refrigerating, LCCP

1 Giriş

Enerji verimliliği son zamanlarda popüler bir konu haline gelmeye başlamış olup dünyada enerji verimliliği alanında çalışılması gereken konulardan biri de soğuk odalardır. Soğuk odalar yüksek oranda enerji tüketmekte ve bu durum enerji maliyetini önemli derecede etkilemektedir. Soğuk odaların bir diğer önemi ise, depolanan gıdaların soğuk zincirin son halkasındaki tüketiciler tarafından satın alınmadan önce bozulmadan sağlıklı bir şekilde muhafaza edilmesidir. Soğuk odaların tasarımı ve performansı, gıdaların güvenli bir şekilde depolanması ve ekonomik olarak iyileştirilmesi amacıyla yaşam döngüsü iklim performansı açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle enerji tasarruflu, çevre dostu soğutma sistemlerinin geliştirilmesine ve yüksek performans katsayısına (COP) sahip sürdürülebilir soğutma sistemlerine ihtiyaç vardır.

Choi vd. [1], Güney Kore'de soğutma ve ısıtma sistemlerinin yaşam döngüsü iklim performansını değerlendirmişlerdir. Güney Kore'de mevcut sistem alan soğutma için kullanılmakta olup alan ısıtması için gaz kazanı kullanılmaktadır. Ortalama ısıtma saati 5.183, ortalama soğutma saati 3.583 saat olan bu çalışmada alan ısıtması için

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: burak.aktekeli@bilecik.edu.tr (B. Aktekeli)
Geliş / Recieved: 15.09.2023 Kabul / Accepted: 22.11.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngmuh.1360957

gaz kazanı yerine ısı pompası kullanıldığında CO_2 emisyonlarının %11-17 oranında, enerji maliyetinin ise sırasıyla %12.5-24.3 oranında azaltılabileceğini bulmuşlardır. Bu nedenle ısı pompası kullanımının sadece çevre dostu değil, aynı zamanda ekonomik olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca düşük küresel ısınma potansiyeline sahip soğutucu akışkan kullanıldığında şarj miktarı ve emisyonlar azalmaktadır. R32 ya da R290 soğutucu akışkanı kullanılması durumunda toplam CO_2 emisyonlarının azalacağını belirtmişlerdir. Wan vd. [2], bir klima kullanarak 11 şehirde beş farklı soğutucu akışkan için yaşam döngüsü iklim performansı hesaplama sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda R290 en iyi performansa sahipken R410A en kötü performansa sahip soğutucu akışkan olmuştur. R32, R452B ve R466A'nın yaşam döngüsü iklim performansı değerlerinin birbirine yakın olduğunu ve ortam sıcaklığının artmasıyla bu üç soğutucu akışkanın performansının daha da yaklaştığını bulmuşlardır. Sonuç olarak R290, R32, R452B, R466A'nın R410A için uygun alternatifler olduğu sonucuna vararak düşük emisyon faktörlü ülkelerde R290 kullanılmasıyla yaşam döngüsü iklim performansının %60'a kadar azaltılabileceğini belirtmişlerdir.

Wang ve You [3], R134a, R152a, R1234yf, R1234ze(E) ve R290 soğutucu akışkanlarını kullanan bir toprak kaynaklı ısı pompası sistemini farklı iklim bölgelerinde çevresel performansını incelemişlerdir. İnceleme sonucunda R152a ve R1234ze(E)'nin dört farklı iklim bölgesinde de düşük küresel ısınma potansiyeline sahip soğutucu akışkanlar olduğunu bulmuşlardır. Soğutucu sızıntısı oranı, yüksek küresel ısınma potansiyeline sahip soğutucu akışkanlar üzerinde büyük bir etkiye sahipken, soğutucu akışkan şarjı ise en az etkiye sahiptir. Yüksek küresel ısınma potansiyeline sahip R134a'nın toplam emisyonları üzerinde soğutucu sızıntısı oranının etkisi büyük olurken; R152a, R1234yf, R1234ze(E) ve R290 soğutucu akışkanlarının üzerinde önemsiz bir etkiye sahip olmuştur. Choi vd. [4], yaptıkları çalışmada buzdolabı döngü seçeneklerini, yalıtım kaynaklarını ve buzdolabı malzemesini araştırarak buzdolaplarının yaşam döngüsü iklim performansı değerlendirmesini yapmışlardır. Çalışmada R134a'dan daha düşük küresel ısınma potansiyeline ve şarj miktarına sahip olan R600a soğutucu akışkanını kullanmışlardır. Seri, baypas ve paralel devre döngüleri gibi ikili evaporatör döngüleri, gelişmiş enerji tüketimleri sayesinde temel döngüden sırasıyla %2.0, %3.8 ve %7.9 daha düşük CO_2 emisyonları yaratmıştır. Seri çevrimin yıllık enerji tüketimi %2.2, baypas çevrimininki %4.3 ve paralel çevriminki ise %8.9 azalmıştır. Buzdolabının yanlarına, arkasına, üstüne, altına ve kapılarına uyguladıkları vakum yalıtım panelleri ile toplam CO_2 emisyonları %7.7; spiral çelik kondenser yerine spiral alüminyum kondenser kullanılmasıyla toplam CO_2 emisyonları %2-2.5 oranında azalmıştır. Akyüz vd. [5], güneş enerjisi kullanılan bir klima sisteminin yaşam döngüsü değerlendirmesini yapmışlardır. Bu amaçla konut iklimlendirmesinde kullanılan klimaların güneş enerjisiyle desteklenmesi durumunda klimaların enerji tüketimini azaltmaya olan etkisini incelemişlerdir. Ağustos ayında Antalya'da güneş enerjisiyle çalışan bir klima sisteminin performansını geleneksel klima sistemiyle karşılaştırmışlardır. Aynı hacme ve yalıtım özelliklerine sahip iki oda yapmışlardır. Odalardan birinde klima sisteminde güneş enerjisi desteği kullanılmış, diğerinde ise güneş enerjisi kullanılmamıştır. Soğutucu akışkan olarak R410A kullanmışlardır. Soğutucu akışkan, basınç ve sıcaklık sensörlerini ısıtmak için klima sisteminin kompresör girişine güneş enerjisi ile çalışan bir ısıtıcı eklemişlerdir. Kompresörün giriş sıcaklığının arttırılması sayesinde enerji tüketimi %8-28 oranında azalmıştır. Ayrıca konut yapılarında yaz dönemi için önerilen sistemden sağlanan enerji tasarrufunun çevresel etkilerini yaşam döngüsü değerlendirmesi ile incelemişler ve enerji tüketimindeki azalmaya bağlı olarak emisyon değerlerinde %7.74 ile %28.27 arasında azalma gözlemlemişlerdir. İlerideki çalışmalarda kompresör giriş sıcaklığının hangi derecelere yükseltilebileceğinin deneysel ve sayısal olarak çalışılması gerektiğini belirtmişlerdir. Yang vd. [6], ev tipi ısı pompalarında R410A yerine kullanılabilecek düşük küresel ısınma potansiyeline sahip soğutucu akışkanların yaşam döngüsü iklim performansı değerlendirmesini yapmışlardır. Küresel ısınma potansiyelleri sırasıyla 300, 200 ve 150 olan R32, R32 ve R1234yf'nin ikili karışımları ile; küresel ısınma potansiyeli değerleri sırasıyla 300 ve 200 olan R32 ve R1234ze(E)'yi R410A ile karşılaştırmışlardır. R32/R1234ze(E) ikili karışımı en düşük yaşam döngüsü iklim performansı değerine sahip olmuştur. Küresel ısınma potansiyeli 300 olan R32/R1234yf ve R32/R1234ze(E) karışımlarının ev tipi ısı pompaları için uygun alternatifler olduğu sonucuna varmışlardır.

Wan vd. [7], iklimlendirme sistemlerinin yaşam döngüsü iklim performansını incelemişlerdir. İnceleme sonucunda bazı bilgilere ulaşmışlardır. Yaşam döngüsü iklim performansı hesaplamaları doğrudan ve dolaylı emisyonların toplamı olup, farklı soğutucu akışkanları kıyaslayarak düşük küresel ısınma potansiyeline sahip soğutucu akışkanı belirlemek ve tasarımın çevresel performansını optimize etmek amacıyla kullanılmaktadır. Doğrudan emisyonlar yıllık soğutucu akışkan sızıntısından, sistemin ömrünün sonundaki soğutucu akışkan salımından, servis süreci ve kazalardan kaynaklı emisyonlardan oluşur. Dolaylı emisyonlar ise klima sisteminin çalışması, malzeme imalatı, soğutucu akışkan üretimi ve sistemin geri dönüşümü sırasındaki enerji tüketiminden kaynaklanan emisyonlardır. Enerji tüketiminden kaynaklanan CO_2 emisyonlarının toplam yaşam döngüsü iklim performansı hesaplamalarının %70-80'ini oluşturmaktadır. Soğutucu akışkanın üretim sürecinden kaynaklanan emisyonlar yaşam döngüsü iklim performansının %1-5'ini oluşturmakta olup bu değer yıllık enerji tüketimi ve yıllık sızıntıyla kıyaslandığında küçük bir etkendir. Soğutucu akışkan imalatındaki sera gazı emisyonları genelde ihmal edilebilir seviyededir. Li [8], gıda taşımacılığı soğutması için yaşam döngüsü iklim performansı araştırması yapmıştır. R404A soğutucu akışkanı yerine küresel ısınma potansiyeli daha düşük olan R452A soğutucu akışkanının kullanılmasıyla gıda taşıma soğutma sisteminde emisyonların %5-15 oranında azalabileceğini bulmuştur. Ortam sıcaklığı 32°C'den 15.5°C'ye düşürüldüğünde ise emisyonların taze ürün kasasında %60'a,

dondurulmuş ürün kasasında %39'a kadar azalabileceğini hesaplamıştır. Sızıntı oranının %25'ten %10'a düşürülmesi durumunda ise emisyonların taze ürün kasasında %13, dondurulmuş ürün kasasında %4 azalabileceğini belirtmiştir. Wu vd. [9], elektrikli araçlarda R134a'nın yerini alabilecek soğutucu akışkanları incelemişlerdir. Bu kapsamda hem klima hem de ısı pompası işlemlerinden kaynaklanan emisyonları belirlemek için R134a, R1234yf, R152a, R290, R410A, R32 ve R744 için toplam eşdeğer ısınma etkisi yöntemi analizi yapmışlardır. Analiz sonuçlarına göre R744 ve R410A kullanımı, R134a'ya göre sırasıyla %14.6 ve %3.7 daha fazla eşdeğer CO_2 emisyonuna neden olmuştur. R744, daha yüksek enerji tüketimi ve daha yüksek dolaylı emisyonla sonuçlanan çok düşük bir etkinlik katsayısına sahiptir. R410A ise çok yüksek bir küresel ısınma potansiyeli değerine sahiptir. Küresel ısınma etkisi açısından R744 ve R410A soğutucu akışkanlarının R134a'nın yerini almaya uygun alternatifler olmadığı sonucuna varmışlardır. R290, hem soğutma hem de ısıtma modlarında yüksek etkinlik katsayısı nedeniyle tüm soğutucu akışkanlar arasında toplam eşdeğer CO_2 emisyonunu azaltmada en iyi performansı göstermiştir. Ancak tutuşabilirlik riski, otomotiv sistemlerindeki uygulamalar için büyük endişe arz etmektedir. Benzer zorluklar R152a için de mevcut olup R152a ve R1234yf'nin her ikisi de kışın çok düşük ısıtma kapasitesine sahiptir ve bu da elektrikli araçlarda ilave ısıtma gerektirmektedir. Bu durum sistemin enerji verimliliğini azaltmakla kalmayacak, aynı zamanda maliyetini de önemli ölçüde artıracaktır. R32'nin küresel ısınma potansiyeli değeri R134a'nın yarısı; toplam eşdeğer ısınma etkisi emisyonu ise R134a'dan %11 daha düşüktür. Sonuç olarak, R32'nin elektrikli araç ısı pompası ve iklimlendirme uygulamaları için güvenli, enerji verimli, uygun maliyetli ve çevre dostu bir soğutucu olduğu kanısına varmışlardır. Suerdem vd. [10], çatı tipi klima soğutucu akışkanlarının gösterdikleri performansı ve çevreyi nasıl etkilediklerini araştırmışlardır. Klimanın soğutma kapasitesini ve enerji tüketimini sayısal olarak analiz etmek için bir çatı tipi klima modellenmiştir. Çalışmada R410A, R22, R454B, R1234yf, R32, R404A soğutucu akışkanlarını kullanmışlardır. Yaşam döngüsü iklim performansı karşılaştırmasından elde ettikleri sonuca göre R1234yf 51,30 kg CO_2-eşdeğer ile en düşük karbon emisyonuna sahip akışkan olmuştur. En yüksek soğutma kapasitesi 154760.34 W ile R454B kullanılan sistemden, en düşük soğutma kapasitesi ise 76949.94 W ile R1234yf kullanılan sistemden elde edilmiştir. En yüksek soğutucu şarj miktarı 40.8 kg ile R1234yf kullanılan sistemde görülürken, minimum soğutucu şarj miktarı 11.22 kg ile R32 kullanılan sistemden elde edilmiştir. En yüksek enerji verimlilik oranı değeri 3.018 ile R454B'de görülürken, en düşük değer 2.257 R22'de görülmüştür. Soğutucu akışkanların analizinde küresel ısınma potansiyeli değeri yüksek olan R404A ve R410A soğutucu akışkanların diğer soğutucu akışkanlara göre daha fazla çevresel etkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir.

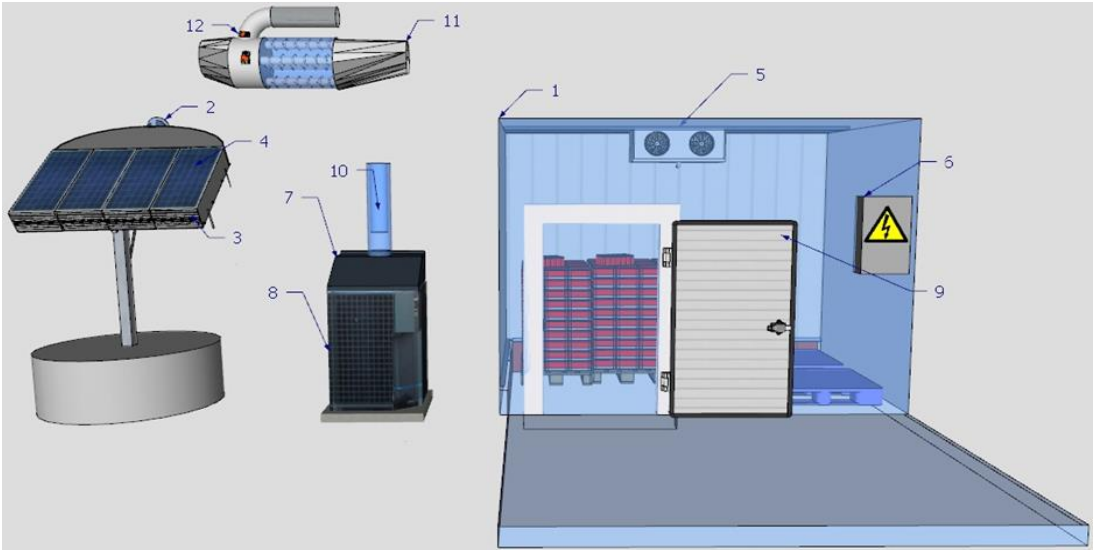
Bu çalışmanın amacı, yüksek COP'ye sahip sürdürülebilir yeni bir tip fotovoltaik termal (PV/T) güneş kolektörlü soğutma sisteminin tasarımının yapılarak analiz edilmesidir. Bu çalışma ile;

- Yeni tip çevre dostu hava soğutmalı PV/T destekli soğutma sistemi tasarımının yapılması,
- Güneş enerjisi sistemi ile bütünleşik soğutma ve ısıtma uygulamasının entegrasyonu,
- Enerji sistemlerinde enerji maliyetlerinin ve küresel ısınmanın etkilerinin azaltılması açısından katkı sağlayacak güneş enerjili yeni bir modelin LCCP analizi ile birlikte ortaya konması,

amaçlanmıştır.

2 Materyal ve metot

Bu çalışmadaki sistem bileşenleri PV/T sistemi, ısı depolama ünitesi, mikrokanal kondenser ve çift evaporatör kullanılan soğutma sisteminden oluşmaktadır. Sistemin tasarımı Şekil 1'de gösterilmiştir.



1:Soğuk Oda, 2:PV/T Evaporatör Fan (Sıcak Hava Çıkış), 3:Difüzör Flap (Hava Giriş), 4:PV/T Panel, 5:Evaporatör (Soğuk Oda), 6:Kontrol Panosu, 7:Kondenser, 8:Kompresör, 9:Soğuk Oda Kapısı, 10:Kondenser (Sıcak Hava Çıkış), 11:Isı Depolama Ünitesi, 12:Damper ve Damper Motoru

Şekil 1. Sistem tasarımı

Tablo 1. Sistemde kullanılan ekipmanların özellikleri

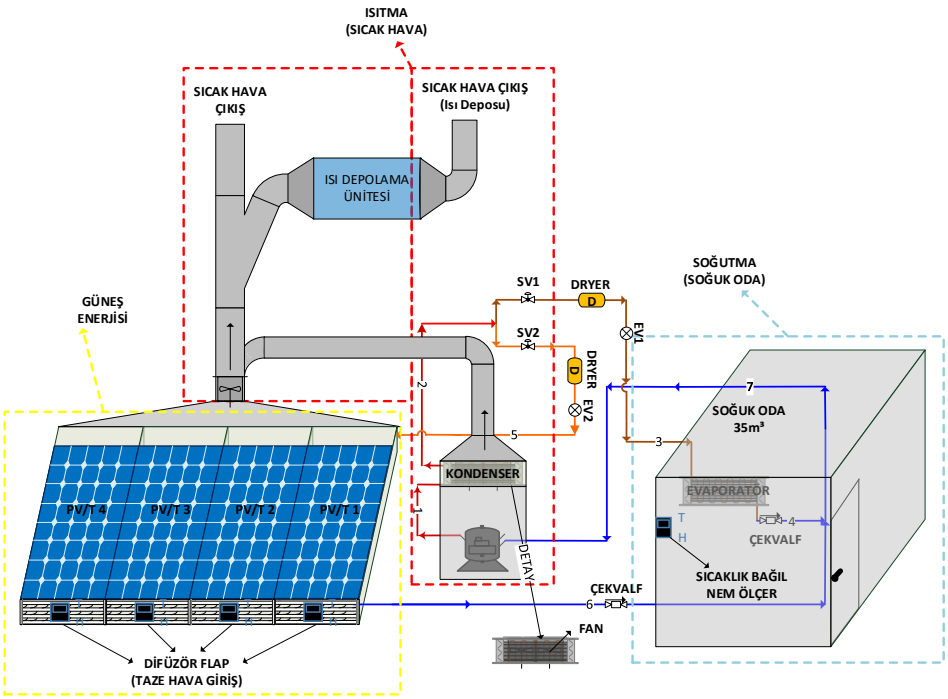
Kullanılan Ekipman	Özellikleri
Kondenser Kapasitesi	5 kW
Kondenser Tipi	Mikrokanal Kondenser
Evaporatör (Soğuk Oda) Kapasitesi	3.5 kW
Evaporatör (Soğuk Oda) Tipi	Bakır Borulu Alüminyum Kanatçıklı
Kompresör Gücü	1.5 kW
Kompresör Tipi	Hermetik/Pistonlu/CSCR
Kompresör Deplasman	32.67 cm^3
PV/T Evaporatör Kapasitesi	0.875kW*4 Adet=3.5kW
PV/T Arka Yüzey Kapama / Yalıtımlı Sac Panel	$2m^2$×4Adet=$8m^2$
PV/T	1669mm×1002mm×75mm, 600W×4=2400W
Soğuk Oda Hacmi	$35m^3$
Toplam Fan Gücü	50W×2Adet=100W
Soğutucu Akışkan	R449A
Akümülatör	160Ah×3=480Ah

Tasarım çalışmasında, hava kaynaklı PV/T sistemi tasarımı arka yüzeyinde 44 m uzunluğunda yivli bakır borulara sahip evaporatör yapısı bulunmaktadır. PV/T sisteminin arka yüzeyinin yalıtılmış ve sızdırmaz hale getirilmesi de önemlidir. Taze hava, PV/T sisteminin altından akmakta ve bakır borulara temas ederek PV/T sisteminin çıkışındaki mikrokanal yapıdaki kondensere gönderilir. Bu bölümde sistem için gerekli havayı sağlamak amacıyla toplam 100 W gücünde iki adet yüksek verimli fan kullanılmaktadır. Uygulama aşamasında sistemde kullanılacak fanların basınç kaybı ve debi değerlerine göre fan seçimi yapılmalıdır. PV/T'nin arka yüzeyinde akan hava ısınarak ısıtma sistemlerine enerji kaynağı olabilecektir.

Sistemdeki soğuk oda 2°C set değerine ulaştığında, soğutucu akışkan PV/T sisteminin arka yüzeyine konumlandırılmış evaporatöre yönlendirilecektir. Sistemde güç tüketen kompresör ve fanlar için gerekli enerji birbirine seri olarak bağlanmış 4 adet 600 W PV/T panel ve 3 adet 160 Ah akülerden sağlanacaktır. Sistem ekipmanlarında enerji tüketimi olmadığı zaman PV/T panellerden elde edilen elektrik enerjisine ihtiyaç olduğunda kullanılmak üzere akülerde depolanacaktır. Böylece enerji verimli ve sürdürülebilir bir tasarım çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımda kullanılan ekipmanların özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

2.1 Soğutma sistemi detay

Yapılan çalışmada, soğuk oda ve PV/T arka yüzeyine yapıştırılmış çift evaporatörlü sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. PV/T sisteminden elde edilen elektrik ve ısı enerjisi ile ısı pompası sisteminden elde edilen atık ısı sayesinde tasarımı yapılan sistem ekipmanlarının verimli çalışmalarına ve ekipmanların karbon salımının azaltılmasına yönelik yaşam döngüsü iklim performans değeri açısından da çevreci bir tasarım gerçekleştirilmiştir. PV/T sisteminden elde edilecek elektrik enerjisi ile ısı pompası sisteminin enerji ihtiyacı karşılanacaktır. Sistemin ilk önceliği soğuk odanın set edilen sıcaklık değerinde tutulmasını sağlamaktır.



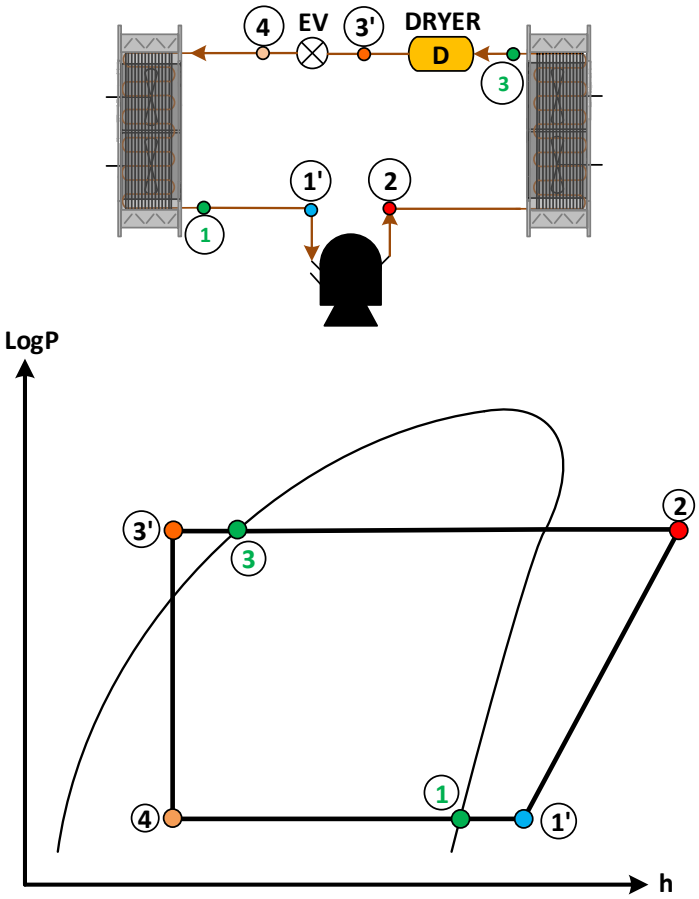
Şekil 2. Isı pompalı enerji depolamalı PV/T sistem şeması

Soğuk oda set edilen sıcaklık değerine ulaştığında bununla beraber akülerin şarj ihtiyacı varsa kompresör kapalı konuma geçerek akülerin doldurulması sağlanacaktır. Böylelikle sistem tasarımı akülerin dolmasına imkan sağlayarak güneş enerjisinin olmadığı saatlerde sistem ekipmanlarının çalışması için gerekli olan enerji ihtiyacı akülerden sağlanmış olacaktır. Sistemde soğuk odanın set değerine gelmesi ve akülerin dolu olması durumunda PV/T evaporatörün devreye girerek PV/T yüzeyinin soğutularak elektriksel verimin arttırılması sağlanmış olacaktır. Ayrıca sistemden elde edilen ısı enerjisi gerektiğinde kullanılmak üzere ısı depolama ünitesinde depolanmaktadır. Soğutma sistemi ve sıcak hava akış şeması Şekil 2'de verilmiştir.

Yapılan çalışmada soğutma sisteminin buharlaşma sıcaklığı -10°C, kondenzasyon sıcaklığı +45°C, aşırı ısıtma +8°C, aşırı soğutma +5°C ve kompresör verimi %75 olarak kabul edilmiştir. Bu şartlar altında soğutma sisteminin etkinlik katsayısı 2.33 ve II. yasa verimi de %48 olarak hesaplanmıştır. Tüm değerler verilen çalışma koşulları baz alınarak hesaplanmıştır. Bağlantı yerlerinde meydana gelen herhangi bir kütlesel debi artışı ya da azalışı dikkate alınmamış olup Şekil 3'te soğutma çevrimine ait logP-h diyagramı, Tablo 2'de ise soğutma sisteminin çalışma parametreleri verilmiştir.

2.2 *Sistem enerji şeması*

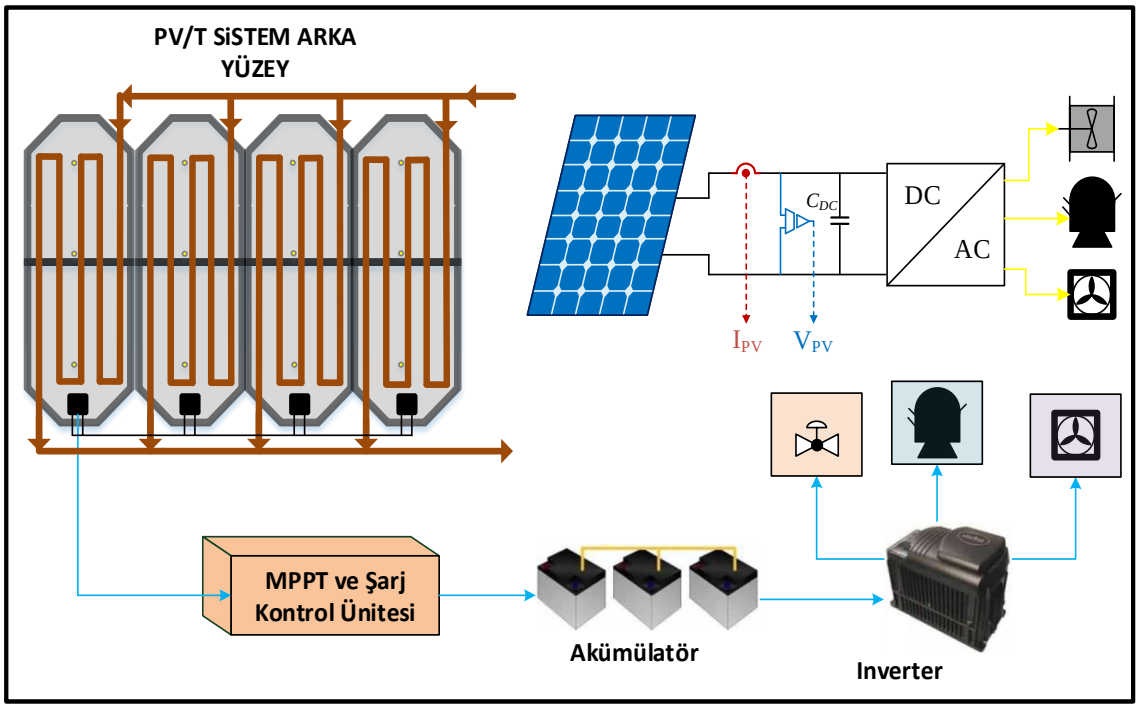
Bu çalışmada 600W'lık 4 adet PV/T sistem birbirine paralel bağlanmıştır. Elektriksel sistemin bir diğer parçası olan akü grubunun da birbirlerine paralel bağlanmak kaydıyla invertöre bağlantısı yapılmıştır. Sistem ekipmanlarının çalışma şartları ve ortam koşullarına göre invertörden elektriksel sistemler için çıkış gerilimi alınarak sistem ekipmanları için gerekli elektriksel çıkış sağlanmıştır. Sistemin elektriksel bağlantısı Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 3. Soğutma çevriminin logP-h diyagramı

Tablo 2. Soğutma sisteminin çalışma parametreleri

Nokta	Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)	Entalpi (kJ/kg)	Entropi (kJ/kgK)	COP	COP_{Carnot}	II. yasa verimliliği (%)
1	-10	3.613	393.7	1.746			
1'	-2	3.613	401	1.774			
2	85.8	20.87	461.5	1.822	2.33	4.78	0.48
3	45	20.87	269.2	1.229			
3'	40	20.87	260.6	1.202			
4	-10	3.613	260.6	1.237			



Şekil 4. Sistem elektrik şeması

3 Teorik analiz

3.1 Enerji analizi

Enerji ve ekserji analizi, termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarını birlikte ele alan ve enerjinin maksimum kullanılabilirliğini ifade eden bir analiz şeklidir. Özellikle birinci yasa enerji analizi için kullanılırken, ikinci yasa tersinir ve tersinmezliği belirlediği için ekserji analizi yapılmasını sağlar [11]. Enerji analizi, ısı ve iş arasındaki farkı dikkate almadan tüketilen enerji miktarını hesaplayan bir analizdir ve mühendislik sistemlerinin tasarım ve analizinde yeterli değildir [12,13]:

$$\sum \dot{m}_g - \sum \dot{m}_ç = {}^{dm}/_{dt} \tag{1}$$

$$\sum \dot{E} - \sum \dot{W} = \sum (\dot{m}h)_ç - \sum (\dot{m}h)_g \tag{2}$$

$$\sum \dot{E}_{x,ısı} - \sum \dot{E}_{x,iş} = \sum \dot{E}_{x,ç} - \sum \dot{E}_{x,g} + \sum \dot{E}_{x,yıkımı} \tag{3}$$

Yeni tip bir fotovoltaik termal güneş kolektörü soğutma sisteminin analizi için gerekli enerji ve ekserji denklemleri aşağıda Denklem (4), (5), (6), (7) ve (8)'de özetlenmiştir [14,15].

$$\dot{E}_{\text{güneş kolektörü}} = \dot{m}_{hava} c_{p,hava} (T_{hava,ç} - T_{hava,g}) \tag{4}$$

$$\dot{W}_{komp} = \dot{m}_s (h_{kon,g} - h_{evap,ç})/\eta_i \tag{5}$$

$$\dot{Q}_{kon} = \dot{m}_s (h_{kon,g} - h_{kon,ç}) = \dot{m}_{hava} c_{p,hava} (T_{kon,ç} - T_{kon,g}) \tag{6}$$

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{Q}_{kon} - \dot{W}_{komp} = \dot{m}_s (h_{evap,g} - h_{evap,ç}) \tag{7}$$

$$COP_{GDIP} = \frac{\dot{Q}_{kon}}{\dot{W}_{komp}} \tag{8}$$

Enerji ve ekserji denklemleri, tasarlanan sistemin termodinamik analizinde kullanılmıştır. Bu analizler tasarlanan sistem ile güneşten ne kadar enerji elde edildiği, kompresör ve fanlarda ne kadar enerji tüketildiği, enerji depolama ünitesinde ne kadar enerji depolandığı ve bu enerjinin ne kadarının faydalı olup olmadığı hakkında bilgi verecektir.

3.2 Yaşam döngüsü iklim performansı analizi

Enerjinin korunumundan hareketle, sistem tarafından tüketilen enerjinin toplamı (E_T) aşağıda Denklem (9)'da verilmiştir:

$$E_T = \dot{E}_f \cdot t_f + \dot{W}_{komp} \cdot t_{komp} + \dot{E}_{diğer} \cdot t_{diğer} \tag{9}$$

Evaporatör kapasitesi ($\dot{Q}_e$) [16]:

$$\dot{Q}_e = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) \tag{10}$$

Isı pompası sisteminin kompresörü tarafından tüketilen güç şu şekilde ifade edilir [16]:

$$\dot{W}_{komp} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \tag{11}$$

Sistemin COP'si, COP_{Carnot} ve sistemin ikinci yasa verimliliği aşağıdaki gibi bulunur [16]:

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}_{komp}} \tag{12}$$

$$COP_{carnot} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad (13)$$

$$\eta = \frac{COP}{COP_{carnot}} \quad (14)$$

Yıllık enerji tüketiminin (AEC) standart yıllık enerji tüketimine (SAEC) oranı enerji verimliliği endeksi (EEI) değerini verir [17]:

$$EEI = \frac{AEC}{SAEC} \quad (15)$$

Bu denklemdeki günlük enerji tüketim miktarı aşağıdaki gibi hesaplanır [17]:

$$AEC = E_{günlük} \,.365 \quad (16)$$

$$E_{günlük} = \left[\left(\dot{W}_{komp} \cdot t_{komp}\right) + \left(\dot{W}_f \cdot t_f\right) + \left(\dot{W}_{komp} \cdot t_{komp,hg}\right) + \left(\dot{W}_{diğer} \cdot t_{diğer}\right)\right] \quad (17)$$

Denklem (17)'ye göre SAEC aşağıdaki gibi hesaplanır [17]:

$$SAEC = 365 \cdot P \cdot (M + N \cdot Y) \cdot C \quad (18)$$

Denklem (18)'deki SAEC değerini bulmak için M=9.1, N=9.1, C=1.15 ve P=1.1 olarak kabul edilmiştir. Y değeri, soğutma cihazının m^2 cinsinden toplam alan olarak hesaplanmalıdır [17].

LCCP, cihazın çalışma ömrü boyunca meydana gelen soğutucu akışkan sızıntılarının (doğrudan emisyon) ve cihazın çalışma ömrü boyunca tükettiği elektrik enerjisinin üretim aşamasında meydana gelen CO_2 emisyonlarının (dolaylı emisyon) bir sonucudur.

Çevresel analiz LCCP değerlendirmesine dayanmaktadır. LCCP değeri iki ana parametre değeri ile hesaplanır. Bu parametreler Denklem (19)'da gösterildiği gibi doğrudan ve dolaylı emisyonlardan oluşmaktadır [18].

$$LCCP = Doğrudan\ Emisyonlar + Dolaylı\ Emisyonlar \quad (19)$$

Doğrudan Emisyonlar (DE), sistemin kullanım ömrü boyunca soğutucu akışkan sızıntısını dikkate alır ve aşağıdaki şekilde hesaplanır [18]:

$$\text{Doğrudan Emisyonlar} = \mathrm{C} \times (\mathrm{L} \times \mathrm{ALR} + \mathrm{EOL}) \times (\mathrm{GWP} + \mathrm{Adp.\,GWP}) \quad (20)$$

Burada C, sistemdeki soğutucu akışkan şarj miktarı (kg); L, ekipmanın ortalama ömrü (yıl); ALR, yıllık sızıntı oranı (%); EOL, ömrünü tamamlamış soğutucu akışkan sızıntısı (%); GWP, küresel ısınma potansiyeli ($kgCO_{2e}$/kg); Adp. GWP, soğutucu akışkanın atmosferik ayrışma ürününün küresel ısınma potansiyeli değeridir ($kgCO_{2e}$/kg). Dolaylı emisyonlar sistemin ömür boyu kullanımından oluşur ve aşağıdakileri dikkate alır [18]:

- Elektrik üretiminden kaynaklanan emisyonlar
- Malzeme üretiminden kaynaklanan emisyonlar
- Soğutucu akışkan üretiminden kaynaklanan emisyonlar
- Ünitenin bertarafından kaynaklanan emisyonlar

Matematiksel olarak, sistemden kaynaklanan Dolaylı Emisyonlar (IE) aşağıdaki gibi ifade edilir [18]:

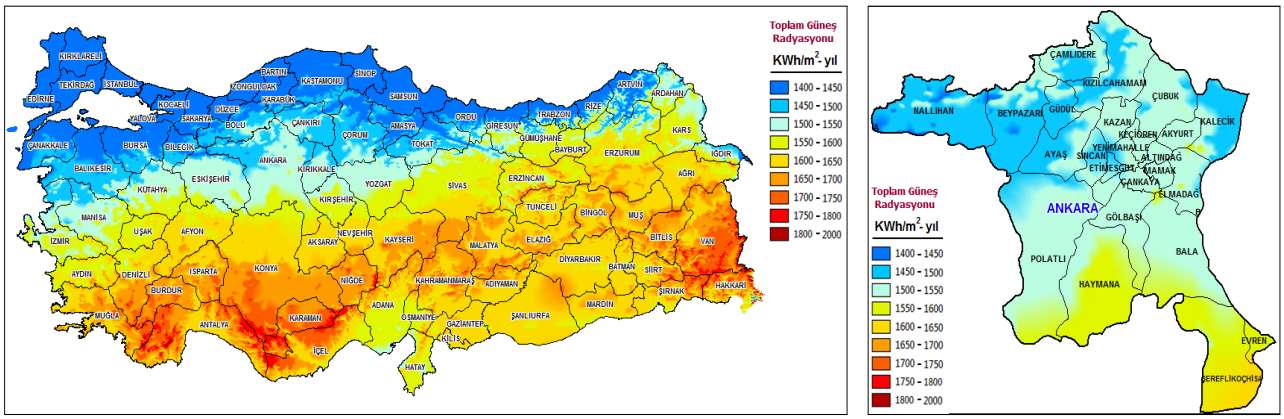
$$\text{Dolaylı Emisyonlar} = \mathrm{L} \times \mathrm{AEC} \times \mathrm{EM} + \sum(\mathrm{m} \times \mathrm{MM}) + \sum(\mathrm{mr\ x\ RM}) + \mathrm{C} \times (1 + \mathrm{L} \times \mathrm{ALR}) \times \mathrm{RFM} + \mathrm{C} \times (1 - \mathrm{EOL}) \times \mathrm{RFD} \quad (21)$$

Burada AEC, yıllık enerji tüketimi (kWh); EM, üretilen CO_2 emisyonu ($kgCO_{2e}$/kWh); m, soğutucu kütlesi (kg); MM, malzemenin CO_2 üretim emisyonu ($kgCO_{2e}$/kg); mr, geri dönüştürülmüş malzeme kütlesi (kg); RM, geri dönüştürülmüş malzemenin CO_2 emisyonu ($kgCO_{2e}$/kg); RFM, soğutucu akışkan üretim emisyonları ($kgCO_{2e}$/kg); RFD, soğutucu akışkan bertaraf emisyonlarıdır ($kgCO_{2e}$/kg). Parametrelerin değerleri LCCP kılavuzuna göre alınmıştır [19].

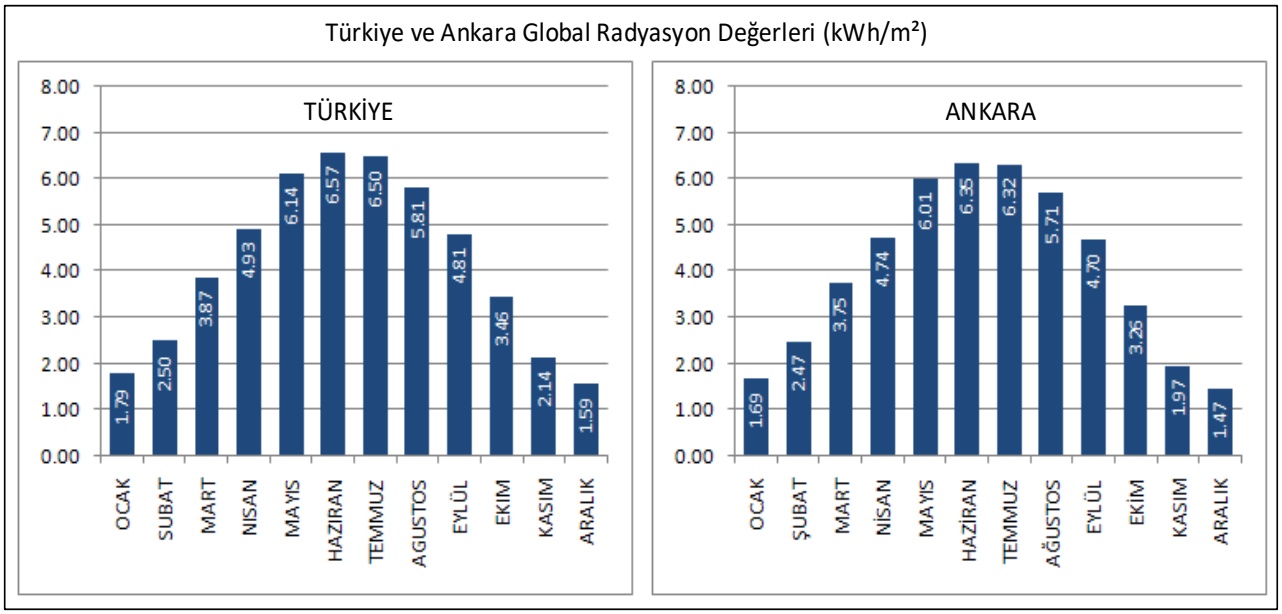
Kullanılan mekanik buhar sıkıştırmalı soğutma sistemlerinin LCCP emisyonlarının yaklaşık %80'inden fazlasını dolaylı emisyonlar oluşturur [1]. 2023 yılı Haziran ayı sonu itibarıyla kurulu gücümüzün kaynaklara göre dağılımı; %30.1'i hidroelektrik enerji, %24.2'si doğalgaz, %20.8'i kömür, %11'i rüzgar, %9.7'si güneş, %1.6'sı jeotermal ve %2.6'sı ise diğer kaynaklar şeklindedir [20]. Bu verilere bakıldığında kömür ve doğalgaz gibi fosil yakıtların oranının güneş enerjisine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Güneş enerjisi kullanımını teşvik etmek ve fosil yakıt kullanımını azaltmak amacıyla bu çalışma gerçekleştirilmiştir.

4 Bulgular

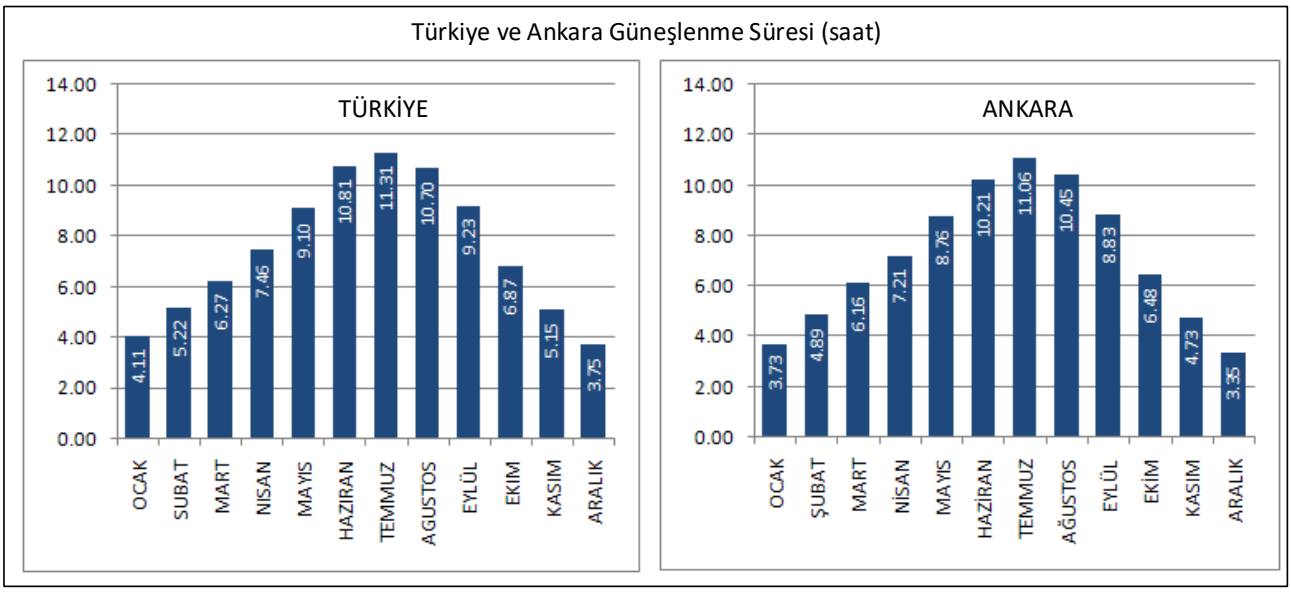
Türkiye Avrupa'ya göre güneşlenme potansiyeli açısından daha elverişlidir. Şekil 5'te Türkiye ve Ankara için güneş enerjisi potansiyel atlası (GEPA) ve güneş radyasyonu dağılımları verilmiştir. Ankara ilinin yıllık ortalama güneşlenme süresi 2.506 saat ve yıllık ortalama güneş ışınımı 1.389 kWh/m^2'dir [21]. Şekil 6'da Türkiye ve Ankara ili için güneşlenme süresi değerleri (saat), Şekil 7'de Türkiye ve Ankara ili için global radyasyon değerleri (kWh/m^2-gün) ve Şekil 8'de PV tipi ve alanına göre yıllık üretilebilecek enerji miktarı (kWh-yıl) verilmektedir. Şekillerde verilen Türkiye'ye ve Ankara'ya ait güneş radyasyonu değerleri, güneşlenme süreleri ve PV türlerine göre üretilebilen enerji miktarlarına bakıldığında iyi konumda olduğu görülmüştür. Güneş radyasyon değerleri güneyden doğuya gidildikçe ve aylara göre değişiklik göstermektedir. Ayrıca Temmuz ve Ağustos aylarında güneş radyasyonunda artış gözlendiği görülmektedir [22].



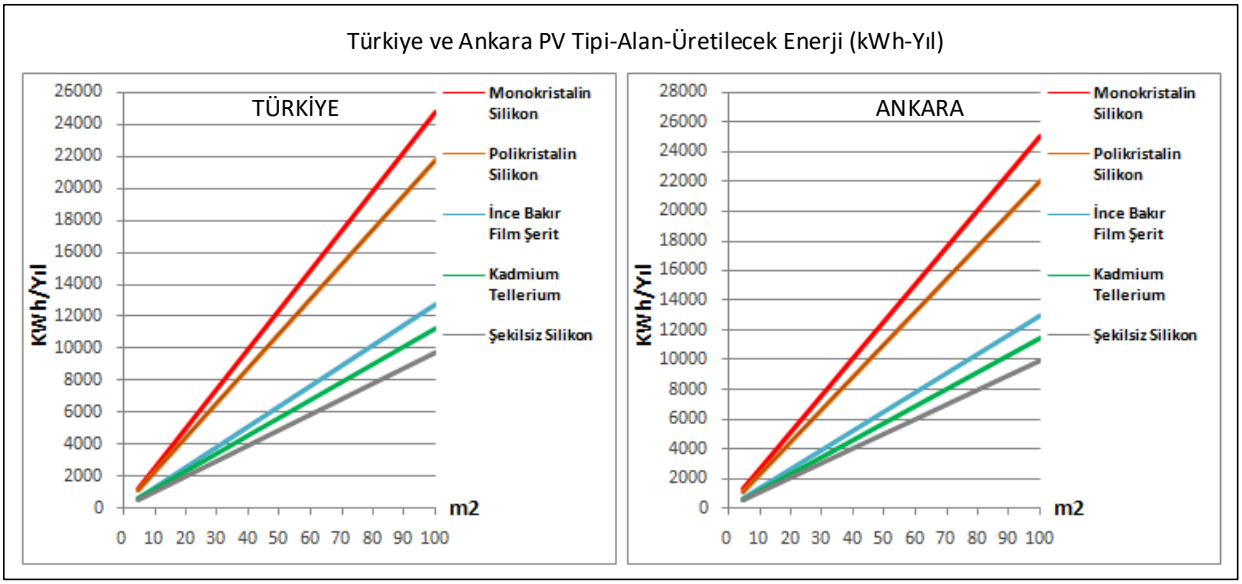
Şekil 5. Türkiye - Ankara ilinin global güneş radyasyonu dağılımı [23]



Şekil 6. Türkiye ve Ankara ili için global radyasyon değerleri (kWh/m^2) [23]



Şekil 7. Türkiye ve Ankara ili için güneşlenme süresi değerleri (Saat) [23]



Şekil 8. Türkiye ve Ankara ili için PV tiplerine göre yıllık enerji miktarı (kWh-yıl) [23]

Bu bilgiler ışığında çalışma kapsamında; yeni tip hava soğutmalı yüksek verimli bir PV/T sistemi, yeni tip bütünleşik atık ısı depolamalı soğutma sistemi, aynı anda tek bir sistem ile depolama (elektrik ve ısı enerjisi) – soğutma sistemi tasarlanmış ve okuyuculara sunulmuştur.

LCCP sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. R449A soğutucu akışkanı kullanan bir soğuk oda için doğrudan emisyon Denklem (20) kullanılarak 1.362,1 $kgCO_{2e}$, dolaylı emisyon değeri Denklem (21) kullanılarak 18.401,3 $kgCO_{2e}$, toplam LCCP emisyon değeri ise Denklem (19) kullanılarak 19.763,4 $kgCO_{2e}$ olarak hesaplanmıştır. Soğuk oda için (toplam hacmi 35 m^3) yıllık salımı gerçekleşen CO_2 miktarı ise m^3 başına 564,7 $kgCO_2$ olarak bulunmuştur.

Tablo 3'teki sonuçlara bakıldığında sürdürülebilir bir sistemin LCCP analizi görülmektedir. PV/T destekli sürdürülebilir sistem ile sıfır emisyonlu güneş enerjisi kaynaklı yeni bir yapı ortaya koyulmuştur. Soğuk odanın yapımında kullanılan panellerin ve aynı zamanda dış ünitenin üretiminden kaynaklı dolaylı emisyonlar enerji verimliliği çalışmaları ile iyileştirilebilir.

Tablo 3. LCCP sonuçları

LCCP Sonuçları	
Soğutucu akışkan	R449A
Toplam yaşam boyu emisyon ($kgCO_{2e}$)	19763.4
Toplam doğrudan emisyon ($kgCO_{2e}$)	1362.1
Adp. GWP ($kgCO_{2e}$)	-
Toplam dolaylı emisyonlar ($kgCO_{2e}$)	18401.3
m^3 başına CO_2 emisyonu ($kgCO_{2e}/m^3$)	564.7

Soğutma sistemlerinin toplam emisyonlarının azaltılabilmesi için sadece düşük KIP ve ODP değerlerine sahip soğutucu akışkanlar ve düşük soğutucu akışkan şarj miktarına sahip sistemlerin kullanılması yeterli olmamaktadır. LCCP analizi sonucunda sistemin dolaylı emisyon değerlerinin yüksek olmasındaki en fazla pay sahibi parametrelerinden biri soğutma sisteminin yıllık enerji tüketimidir. Bu emisyonların azaltılabilmesi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ile mümkün olabilmektedir. Bu çalışmada, gerekli enerjiyi şebekeden bağımsız olarak güneş enerjisinden üreten hibrit yapıdaki soğutma sistemi ile çevreye salınan emisyon miktarı azaltılarak sürdürülebilir bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak kendi enerjisini kendi üreten soğutma sistemlerinin yaygınlaştırılması ayrıca üretilen enerjinin akülerde depolanması, atık ısı kullanımı, hibrit sistem sayesinde panellerin soğutularak verimlerinin artırılması ile sürdürülebilir bir geleceğe katkı sağlayacaktır.

5 Sonuçlar

İlerleyen zamanlarda dünyada enerji talebindeki artışın yanı sıra enerjinin verimli kullanımı ve enerji arzı açısından sıkıntı yaratması beklenen çevresel faktörler de enerjinin kullanımı ve sürdürülebilirliğinde önemli bir etken olacaktır. Dolayısıyla iklimlendirme ve soğutma sistemlerinin tasarımı yapılırken alternatif enerji kaynaklarının kullanılmasının yanında enerjinin en verimli şekilde kullanılması ve atık ısının depolanarak değerlendirilmesi sistem tasarımlarında ana hedef olmalıdır. Bu kapsamda sistem tasarımında kullanılacak ekipmanların optimum sistem parametrelerinin belirlenmesi bir zorunluluk haline gelmiştir. Fotovoltaik güneş kolektörlü soğutma sisteminde kullanılabilecek ekipmanlar ve soğutucu akışkanın seçiminde, sistemin çalışma yükü ve soğutma etkinlik katsayısı dikkate alınmalıdır.

Literatürde LCCP analizi ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Yıldız ve Yıldırım [24], R134a'nın LCCP emisyon değerini 21438.32 $kgCO_2$, R513A'nın LCCP emisyon değerini 21761.14 $kgCO_2$ olarak bulmuşlardır. Yıldırım vd. [25], R404A'nın LCCP emisyon değerinin 24740 $kgCO_2$ ile 12370 $kgCO_2$ arasında değişirken, R454C'nin LCCP emisyon değerinin 24053 $kgCO_2$ ile 12370 $kgCO_2$ arasında değiştiğini bulmuşlardır. Yıldız ve Yıldırım [26], yaptıkları başka bir çalışmada R134a, R1234yf ve R513A'nın bir ısı pompasında soğutucu akışkan

olarak kullanılmasını araştırmışlar ve R134a'nın LCCP emisyon değerini 46061 $kgCO_2$, R513A'nın LCCP emisyon değerini 39412 $kgCO_2$, R1234yf'nin LCCP emisyon değerini ise 38166 $kgCO_2$ olarak bulmuşlardır.

Bu tasarımda sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Tasarımın alternatif enerji kaynaklarının ülkemizdeki en yüksek potansiyellerinden biri olan güneş enerjisi ile çalışması ve bununla beraber kontrol sistemlerinin oluşturulması, sistemin sürdürülebilir olmasını sağlamıştır. Bunun yanı sıra sistemden elde edilen atık ısının depolanıp sistem ihtiyaçlarına uygun kullanılması sistemin daha verimli çalışmasını sağlayacaktır.
- PV/T sistemde gerçekleştirilen tasarım sayesinde PV/T optimum çalışma şartlarına yaklaştırılarak sistemin güneşten elde edeceği enerji miktarı arttırılacaktır.
- Soğutma sistemlerinde en önemli önceliklerden bir tanesi sistemin sürekliliğinin sağlanarak soğuk oda depolarında saklanan ürünlerin soğuk zincirlerinin bozulmamasını sağlamaktır. Kendi enerjisini üretebilen ve dış ortam şartlarının ısı pompası sistemi üzerindeki etkilerini ortadan kaldırabilecek bir tasarım yapılmıştır.
- R449A soğutucu akışkanı kullanan bir soğuk oda için doğrudan emisyon 1.362,1 $kgCO_{2e}$, dolaylı emisyon değeri 18.401,3 $kgCO_{2e}$, toplam LCCP emisyon değeri ise 19.763,4 $kgCO_{2e}$ olarak hesaplanmıştır. Bu sayede büyük oranda CO_2 salımının önüne geçilebilecektir.
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımıyla beraber, hibrit çevreci sistemlerin arttırılması ve geleceğe daha temiz bir dünya bırakılması bu çalışmanın temelini oluşturarak tasarımın LCCP analizi de ortaya konmuştur. Soğutma endüstrisinde soğuk odaların yüksek enerji tüketmesinden dolayı enerji tasarruflu sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışma sayesinde soğutma endüstrisine yenilenebilir enerji kaynaklı ve enerji depolamalı sürdürülebilir bir soğuk oda tasarımı sunulmuştur.
- LCCP analizi kapsamında R290 soğutucu akışkanı için de hesaplamalar yapılmıştır. Soğuk oda tasarımında doğal soğutucu akışkanlar arasında en yaygın olarak kullanılan R290 soğutucu akışkanının kullanılması durumunda; doğrudan emisyon 0,6 $kgCO_{2e}$, dolaylı emisyon 18.400,3 $kgCO_{2e}$, toplam LCCP emisyon değeri ise 18.400,8 $kgCO_{2e}$ olarak hesaplanmıştır. R449A yerine R290 soğutucu akışkanı kullanıldığında %6,9 oranında CO_2 salımının önüne geçileceği öngörülmüştür. Soğuk oda için R290 soğutucu akışkanı kullanılması durumunda da (toplam hacmi 35 m^3) yıllık salımı gerçekleşen CO_2 miktarı ise m^3 başına 525,7 $kgCO_2$ olarak bulunmuştur.

Teşekkür

Çalışmaya verdikleri katkılardan dolayı Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (Proje Kodu: FDK-2022-7868) teşekkür ederiz. Ayrıca Nurdil Teknik Soğutma A.Ş.'ye de çalışmaya verdikleri katkılardan dolayı teşekkür ederiz.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

[1] S. Choi, J. Oh, Y. Hwang and H. Lee, Life Cycle Climate Performance Evaluation (LCCP) on Cooling and Heating Systems in South Korea, Applied Thermal Engineering, 120, 88-98, 2017. https://doi.org/-10.1016/j.applthermaleng.2017.03.105

[2] H. Wan, T. Cao, Y. Hwang, R. Radermacher and S. Chin, Comprehensive Investigations on Life Cycle Climate Performance of Unitary Air-Conditioners, International Journal of Refrigeration, 129, 332-341, 2021. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.-2021.04.033

[3] F. Wang and T. You, Comparative Analysis on the Life Cycle Climate Performance of Ground Source Heat Pump Using Alternative Refrigerant, Case Studies in Thermal Engineering, 42, 102761, 2023. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4263765

[4] S. Choi, Y. Jung, Y. Kim, H. Lee and Y. Hwang, Environmental Effect Evaluation of Refrigerator Cycle With Life Cycle Climate Performance. International Journal of Refrigeration, 122, 134-146, 2021. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig-.2020.10.032

[5] A. Akyüz, R. Yıldırım, A. Güngör, A. D. Tuncer, Experimental Investigation of a Solar-Assisted Air Conditioning System: Energy and Life Cycle Climate Performance Analysis, Thermal Science and Engineering Progress, 43, 101960, 2023. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101960

[6] C. Yang, S. Seo, N. Takata, K. Thu and T. Miyazaki, The Life Cycle Climate Performance Evaluation of Low-GWP Refrigerants for Domestic Heat Pumps, International Journal of Refrigeration, 121, 33-42, 2021. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.09.-020

[7] H. Wan, T. Cao, Y. Hwang, R. Radermacher, S. O. Andersen and S. Chin, A Comprehensive Review of Life Cycle Climate Performance (LCCP) for Air Conditioning Systems, International Journal of Refrigeration, 130, 187-198, 2021. http://dx.doi.-org/10.1016/j.ijrefrig.2021.06.026

[8] G. Li, Comprehensive Investigation of Transport Refrigeration Life Cycle Climate Performance, Sustainable Energy Technologies and Assessments, 21, 33-49, 2017. https://doi.org/10.1016/j.seta.-2017.04.002

[9] J. Wu, G. Zhou and M. Wang, A Comprehensive Assessment of Refrigerants for Cabin Heating and Cooling on Electric Vehicles, Applied Thermal Engineering, 174, 115258, 2020. https://doi.-org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115258

[10] K. Suerdem, T. Taner, Ö. Açıkgöz, A. S. Dalkılıç and H. Panchal, Performance of Refrigerants Employed in Rooftop Air-Conditioners, Journal of Building

Engineering, 70, 106301, 2023. https://doi.org/-10.1016/j.jobe.2023.106301

[11] M. Sardarabadi, M. Hosseinzadeh, A. Kazemian and M. P. Fard, Experimental investigation of the effects of using metal-oxides/water nanofluids on a photovoltaic thermal system (PVT) from energy and exergy viewpoints, Energy, 138, 682-695, 2017. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.046

[12] Y. A. Çengel ve M. A. Boles, Termodinamik Mühendislik Yaklaşımıyla, Güven Kitabevi, İzmir, 2008.

[13] F. P. Incropera and D. P. Dewitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley Sons, New York, 303-577, 2003.

[14] M. Mohanraja, Y. Belyayevb, S. Jayarajc and A. Kaltayev, Research and Developments on Solar Assisted Compression Heat Pump Systems-A Comprehensive Review (Part A: Modeling and Modifications), Renewable and Sustainable Energy Reviews, 83, 90-123, 2018. https://doi.org/10.-1016/j.rser.2017.08.022

[15] M. Aktaş, M. Koşan, E. Arslan and A. D. Tuncer, Designing a Novel Solar-Assisted Heat Pump System with Modification of A Thermal Energy Storage Unit, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 233, 588-603, 2019. https://doi.org/10.1177/09576-50919847934

[16] M. Aktaş, S. Erten, E. Demirci, E. Kılıç and F. N. Erdoğmuş, Studies on Increasing Energy Efficiency and Reducing Environmental Impacts in Industrial Cooling Systems with Direct Sales Function, Iksad Publications, Ankara, 49-99, 2021.

[17] M. Koşan, E. Arslan, S. Erten, F. N. Erdoğmuş and M. Aktaş, Determination of Defrost Efficiency and Energy Efficiency Index Value Using Different Defrost Methods and Refrigerants: An Experimental Study, Science and Technology for the Built Environment 28, 1012-1023, 2022. https://doi.org-/10.1080/23744731.2022.2076504

[18] H. Lee, S. Troch, Y. Hwang and R. Radermacher, LCCP Evaluation on Various Vapor Compression Cycle Options and Low GWP Refrigerants, International Journal of Refrigeration 70, 128-137, 2016. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.07.003

[19] International Institute of Refrigeration. Guideline for Life Cycle Climate Performance, International Institute of Refrigeration, 3-25, 2016.

[20] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Elektrik, https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik, (Erişim Tarihi: 31.07.2023).

[21] S. Şensoy, Y. Ulupınar, M. Demircan, I. Alan and P. A. Bostan, Modeling Solar Energy Potential in Turkey, BALWOIS 2010, Ohri, Republic of Macedonia, 1-10, 25-29 May 2010.

[22] S. Şevik, Isı Pompası ve Güneş Kolektörünün Birlikte Kullanıldığı, Isıtma ve Kurutma Amaçlı Sıcak Hava Üretim Sisteminin Tasarımı, İmalatı ve Deneysel İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2011.

[23] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası, https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes (Erişim Tarihi: 11.08.2023).

[24] A. Yıldız ve R. Yıldırım, R134a'ya Alternatif Bir Soğutucu Akışkan (R513A) Kullanan Buhar Sıkıştırmalı Soğutma Sistemlerinin Enerji ve Çevresel Analizi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8, 1817-1828, 2020. https://doi.org/10.29130/dubited.690197

[25] R. Yıldırım, K. Kumaş ve A. Ö. Akyüz, Soğutma Sisteminde R404A Yerine R454C Soğutucu Akışkanın Kullanılmasının İncelenmesi: Enerji ve Çevresel Analizi, Teknik Bilimler Dergisi, 11, 47-51, 2021. https://doi.org/10.35354/tbed.951070

[26] A. Yıldız and R. Yıldırım, Investigation of Using R134a, R1234yf and R513A as Refrigerant in A Heat Pump, International Journal of Environmental Science and Technology, 18, 1201-1210, 2020. https://doi.org/10.1007/s13762-020-02857-z

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 216-222

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

2023 Maraş depremleri ve Niğde'deki yer hareketliliği

2023 Maras earthquakes and ground motion in Nigde

Hakan Karaca[1,*]

[1] *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, 51240, Niğde Türkiye*

Öz

6 Şubat 2023 tarihinde gerçekleşen Pazarcık (M_w=7.7) ve Elbistan depremleri (M_w=7.6) başta Malatya'dan Hatay'a kadar Doğu Anadolu Fay Hattı ve yakın çevresini etkilemiştir. Etkilenen illerden bir tanesi de Niğde'dir. Can kaybının yaşanmadığı ve deprem nedeniyle yıkılan bina olmayan il merkezinde, birçok yapı hasar görmüş ve ekonomik kayıplar meydana gelmiştir. Niğde il merkezinin (34.70E,37.90N) Pazarcık depreminin merkez üssüne (37.04E,37.29N) uzaklığı 217.3 km ve Elbistan depreminin merkez üssüne (37.24E,38.09N) uzaklığı ise 223.2 km olmakla birlikte depremler çok şiddetli hissedilmiştir. Bu çalışmada bu iki depremin yer hareketliliği açısından Niğde ilindeki etkisi incelenmiş, Niğde il merkezinde bulunan ivmeölçer tarafından kaydedilen kayıtlar çözümlenmiş ve tasarım ivmeleri ile ölçülen ivme değerleri karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Niğde, 6 Şubat Maraş Depremleri, Deprem Tehlikesi, İvme Spektrumları

Abstract

The February 6th, 2023 earthquakes of Pazarcık (M_w=7.7) and Elbistan (M_w=7.6) affected large areas: first the areas along the East Anatolian Fault from Hatay to Malatya and the close vicinity. One of the affected cities is Nigde. Though there were no casualties or collapses of buildings, many structures were damaged to a certain extent, causing considerable economic loss. Though the distance between the Nigde city center and the epicenter of Pazarcık earthquake is 217.3 km and the distance between the city center and the epicenter of Elbistan earthquake is 223.2 km, the shaking was intense in the city. In this study, the effects of these two earthquakes in terms of ground shaking in Nigde are investigated, the earthquake records are analyzed, and the observed acceleration spectrum and design acceleration spectrums are compared.

Keywords: Nigde, 6 February Maras Earthquakes, Earthquake Hazard, Acceleration Spectra

1 Giriş

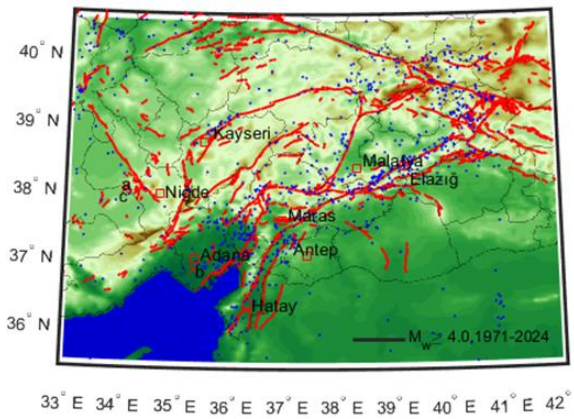
Türkiye'nin depremselliği göz önüne alındığında Niğde ili ve çevresinin göreceli olarak çok da hareketli olmadığı söylenebilir. Ancak, Şekil 1'de görüldüğü gibi, Niğde ve çevresinin tektonik yapıları ve geçmiş depremselliği değerlendirildiğinde [1-4] il merkezi ve yakın çevresinin büyük depremlerin etkilerine maruz kalabileceği öngörülebilir. İl Orta Anadolu Volkanik Bölgesinin içinde yer almakta olup, şehrin doğusunda ve batısında doğrusal atımlı iki büyük aktif fay hattı bulunmaktadır. Batıda Tuz gölü Fay Hattı ve doğuda Ecemiş fay hattı büyük deprem üretme potansiyeline sahip iki fay hattıdır [1,5]. Sismik hareketlilik açısından değerlendirildiğinde, özellikle ilin güneydoğusunda bulunan Adana ve çevresi ile Hatay-Antep-Maraş-Malatya ve Elazığ hattında bulunan Doğu Anadolu Fay Hattı üzerinde yoğun sismik hareketlilik göze çarpmaktadır.

Geçmiş sismik kayıtlar incelendiğinde, yakın zamanlarda orta büyüklükteki depremlerin meydana geldiği ve il merkezinde hissedilen bu depremlerin hasarlara neden olduğu tespit edilmiştir. Niğde ve yakın çevresinde meydana gelen en büyük depremlerden bir tanesi 20 Eylül 2020 tarihinde meydana gelmiş, moment büyüklüğü 5.4 [6] olarak hesaplanan depremin merkez üssü (38.04 K,34.03 D) Obruk Köyü yakınları olarak tespit edilmiştir (Şekil 2). Ayrıca 1998 yılında meydana gelen ve büyüklüğü 6.3 [7] olan Ceyhan (M_w=6.3, 36.85K-35.32D), (Şekil 2) depremi de [8] Niğde ilinde hasarlar meydana getirmiştir. Maraş depremlerinin artçısı olduğu düşünülen ve yine Obruk yakınlarında (37.99K-34.02D, Şekil 2) meydana gelen depremin büyüklüğü de 5.3 (M_w) [9] olarak ölçülmüştür.

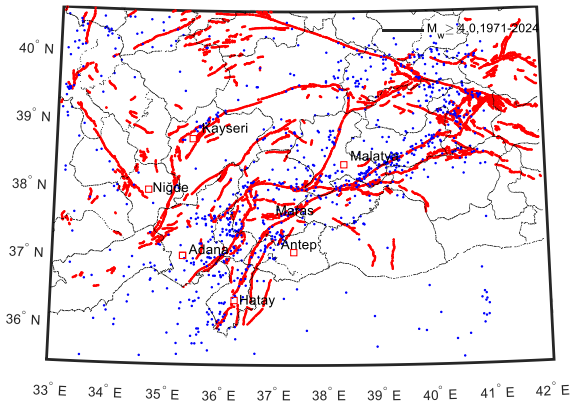
Niğde ilinin yakın çevresinde küçük ve orta ölçekli depremlerin meydana gelebileceği değerlendirilirken [1-4] bölgenin en aktif ve büyük deprem üretme kapasitesine sahip fay hattı olan Doğu Anadolu Fay Hattı (DAFH) üzerinde meydana gelebilecek depremlerde de Niğde İlinde hasar meydana gelebileceği görülmüştür [10]. Aslında, bu hat üzerinde geçmişte de 7 ve üzeri büyüklükte depremlerin meydana geldiği bilinmektedir [11-16]. 6 Şubat depremleri ile birlikte bu fay hattı ve çevre fayların da çok yıkıcı depremler ürettiği anlaşılmış ve özellikle fay hattı üzerindeki depremin yıkıcı etkileri göz önüne alındığında tehlikenin boyutlarının farkına varılmıştır [17-21].

6 Şubatta meydana gelen iki depremin oluş biçimleri açısından neredeyse eşi benzeri görülmemiştir. Aralarındaki tetikleme ilişkisi nedeniyle birbirleriyle öncü-artçı olarak değerlendirmeler yapıldığı gibi [7], gerçekleştirilen çalışmaların çoğunda bu iki depremin ayrı depremler olarak değerlendirildiği görülmektedir [17-21]. Bu iki büyük depremin ardından meydana gelen artçı depremlerin sayısı 4 Eylül 2023 saat 03:00 itibarıyla toplam 38022 [9] olarak kayda geçmiştir.

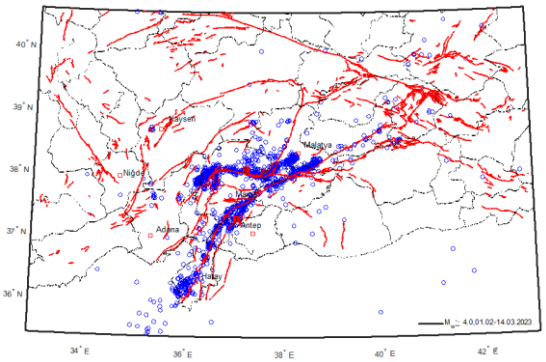
* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: karaca26@hotmail.com (H. Karaca)
Geliş / Recieved: 21.09.2023 Kabul / Accepted: 23.11.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngmuh.1363994



Şekil 1. Niğde İli ve Yakın Çevresi Faylar, Depremsellik (a: 2020 Obruk Depremi, b: 1998 Ceyhan Depremi, c: 2023 Obruk Depremi [9])



Şekil 2. Niğde, Doğu Anadolu Fay Hattı ve yakın çevresi fayların dağılımı ve bölgenin depremselliği [22] Not: (1) no.lu kutucuk Pazarcık ve (2) nolu kutucuk ise Elbistan depremi merkez üslerini göstermektedir [17]



Şekil 3. Maraş Depremleri ve artçı sarsıntılar, Not: (1) no.lu kutucuk Pazarcık ve (2) no.lu kutucuk ise Elbistan depremi merkez üslerini göstermektedir [9]

Bu artçı sarsıntılar çoğunlukla Doğu Anadolu Fay Hattı ile Çardak Fayı ve Doğanşehir Fay Zonu üzerinde yer almaktadır (Şekil 3). Bu artçılardan bazıları deprem merkez üssünden çok daha uzaklarda da meydana gelmiş, Niğde ilinde ise Obruk köyü yakınlarında 5.3 büyüklüğünde bir artçı deprem kaydedilmiştir [23].

Depremler geniş bir alanda hissedilmiş olmakla birlikte özellikle Maraş, Hatay, Adıyaman, Gaziantep, Kilis, Diyarbakır, Şanlıurfa, Elazığ, Adana, Malatya illerinde can ve mal kayıplarına neden olmuş [17-21] ve Kayseri, Sivas, Tunceli ve Niğde [10] illerinde hasarlara neden olmuştur. Özellikle Pazarcık (M_w=7.7) depreminin etkileri neredeyse bütün DAFH boyunca hissedilmiş, fay hattı boyunca yakın yerleşim yerlerinde de büyük yıkım ve can kayıpları meydana gelmiştir [17-21]. Niğde ilinde ise herhangi bir can kaybı meydana gelmemiş ancak birçok yapıda ağır hasar oluşmuş [10], birçok yapının ise orta veya hafif hasarlı olarak tespitleri yapılmıştır.

Niğde ilinin bu depremden ne kadar etkilendiğini belirlemek amacıyla ilk yapılması gereken Niğde İl merkezinde bulunan sismik kayıt cihazlarının kayıtlarını incelemektir. Bu kapsamda çalışmada ilk adım olarak il merkezinde bulunan 5102 istasyon no.lu ivmeölçere ait kayıtlar elde edilmiş ve çözümlemeler yapılmış, ikinci aşamada ise depremden etkilenen diğer yerleşim birimlerinin kuvvetli yer hareketlerinden ne kadar etkilendiğini belirlemek ve Niğde özelinde karşılaştırma yapmaktır. Bu bağlamda, tasarım ivmeleri ile ölçülen ivme değerlerinin karşılaştırılması gerçekleştirilmiş, sonrasında elde edilen bulgulara göre yer hareketinin etkileri ile ilgili çıkarımlar yapılmıştır.

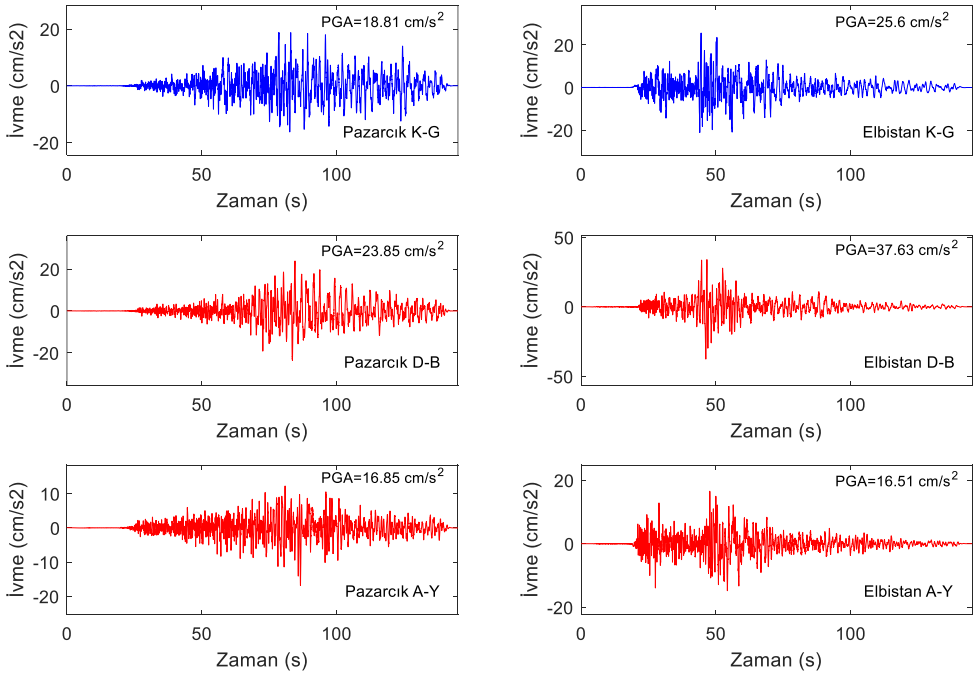
2 Veriler ve analizler

2.1 Niğde merkez ivmeölçer (5102) istasyon kayıtları

6 Şubat depremlerinden ilki (M_w=7.7) GMT +3 saatine göre gece 04:17'de Kahramanmaraş'ın Pazarcık ilçesinde ve ikinci deprem (M_w=7.6) ise GMT +3 saatine göre gündüz 13:24'te Kahramanmaraş'ın Elbistan ilçesinde meydana gelmiştir [17-21]. Pazarcık'ta meydana gelen ilk depremin moment büyüklüğü 7.7 ve derinliği 8.6 km olarak hesaplanmış, Elbistan'da meydana gelen ikinci depremin moment büyüklüğü 7.6 ve derinliği de 7 km olarak hesaplanmıştır. Depremlerin odak derinlikleri değerlendirildiğinde aslında çok sığ depremler oldukları ve bu nedenden dolayı da çok büyük hasarlara neden oldukları anlaşılabilir. Niğde il merkezinin bu iki depremin merkez üssüne olan uzaklıkları sırasıyla 217.3 km ve 223.2 km'dir. İlk depremin merkez üssünün Niğde il merkezine olan uzaklığı biraz daha az olmakla birlikte, iki mesafenin arasında kayda değer bir fark da yoktur. Her iki depremin de merkez üslerinin Niğde İl merkezine olan uzaklıkları birbirine çok yakın denebilir.

Niğde İl Merkezinde bulunan 5102 no'lu ivmeölçer istasyonundan (34.67E, 37.97N) elde edilen deprem kayıtları [24] Şekil 4'te sunulmuştur. Şehir merkezinde yer alan bu istasyonun Vs30 değeri ise 678 m/s olarak belirlenmiş [24], zemin sınıfı 2018 yılında Resmi Gazetede yayımlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine (TBDY) göre ZC [25] ve 2007 yılından itibaren geçerli olan Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, (DBYYHY) uyarınca da [26] Z3 olarak sınıflandırılmıştır.

Şekilde sunulan veriler incelendiğinde en yüksek PGA değerinin hem Pazarcık hem de Elbistan depremlerinde doğu-batı yönünde kaydedildiği anlaşılmış, Elbistan depremi PGA değerlerinin hem doğu-batı hem de kuzey-güney yönlerinde daha yüksek olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 4. Niğde İl Merkezi 5102 no'lu ivmeölçer istasyonu deprem kayıtları [24]

Elbistan depreminin büyüklüğünün daha küçük olmasına ve Niğde il merkezine uzaklığının da biraz daha fazla olmasına rağmen meydana getirdiği etkinin daha büyük olduğu incelenmeye değer bir husustur. Deprem süreleri açısından incelendiğinde ise Pazarcık depreminin süresinin daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca kayıtlar yakından incelendiğinde Pazarcık deprem hareketini çok daha uzun süre büyük ivmelerle devam ettiği gözlemlenmiştir. Bu değerlendirmelerin daha rahat analizlerinin yapılabilmesi ve anlaşılabilmesi için Şekil 5'te gösterilen Arias yoğunluk eğrileri oluşturulmuştur.

Bahsi geçen Arias yoğunluk eğrileri incelendiğinde de Elbistan depreminin Niğde şehir merkezinde daha güçlü bir sarsıntıya neden olduğunu ve merkezdeki yapılara daha fazla enerji yüklediğini söylemek yanlış olmaz. Eğrilerden anlaşıldığı üzere, her iki depremin doğu-batı yönünde daha etkili olduğu bunun yanı sıra aşağı-yukarı yönlü hareketinde göreceli olarak güçlü olduğu söylenebilir. Ayrıca Elbistan depreminin özellikle 40-60 s arasında çok hızlı bir şekilde enerjisinin arttığı ve ancak sonrasında yüklenen toplam enerjinin çok yavaş bir şekilde arttığı ve kısa bir süre sonra ise durağan bir şekilde kaldığı söylenebilir. Yapısal performans açısından değerlendirildiğinde, bu şekilde aniden meydana gelen enerji yüklemelerinde yapıların çok daha fazla zorlandığı açıktır

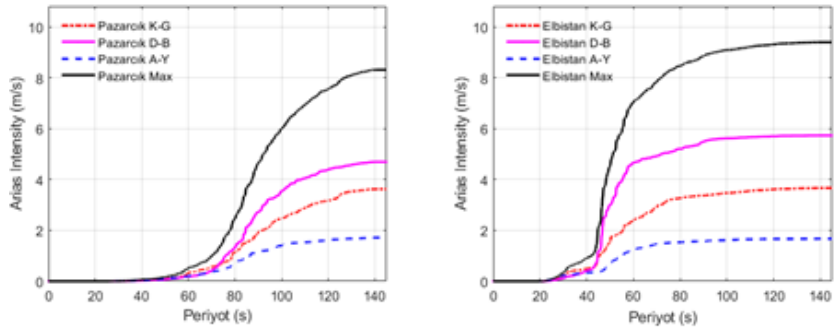
2.2 Deprem kayıtları ivme spektrumlarının değerlendirilmesi

Yapıların deprem performanslarının değerlendirilebilmesi için öncelikle depremde maruz kaldıkları yükler ile tasarım için varsayılan yüklerin karşılaştırılması gerekmektedir. Ülkemizde yapısal tasarım için kullanılan deprem yönetmeliklerinin bu bağlamda çok önemli rolleri olduğunu belirtmek gerekir. Birçok defa değiştirilen yönetmeliklerde kullanılan tasarım ivmeleri de her yeni yürürlüğe giren deprem yönetmeliği ile en yeni halini almıştır. Bu tasarım ivme spektrumları, TBDY (2018) [25] ile en son şeklini almış ve DBYBHY'te (2007) [26] de kullanılan tasarım spektrumları değiştirilmiştir. Bu bağlamda çalışmada sadece 2007 [26] ve 2018 [25] yönetmeliklerinde kullanılan tasarım ivme spektrumları değerlendirilmiştir.

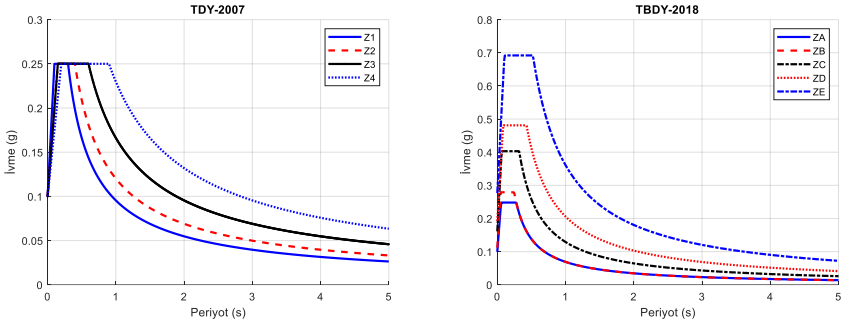
Bu bağlamda Niğde İl Merkezi için geliştirilen en son iki tasarım ivme spektrumu da Şekil 6'da sunulmuştur. Şekildeki ivme spektrumları incelendiğinde, tasarım ivme spektrumları arasında en önemli farkın zeminlere göre değişen en büyük ivmeler olduğu anlaşılır. Şöyle ki, 2007 yılında herhangi bir zemin üzerine inşa edilmesi planlanan bir yapının maruz kalabileceği en büyük tasarım ivmesi 0.25g iken, bu değer 2018 şartnamesi ile 0.7g'lere kadar çıkmıştır.

Kısaca açıklamak gerekirse, 2018 deprem yönetmeliği [25] ile birlikte zemin büyütme ve küçültme kavramları da yönetmeliğe girmiş, güncel bilimsel bilgiler doğrultusunda zeminlerin yapıya olan etkilerinin daha doğru tasarlanmasını sağlamıştır. Bu tasarım ivme spektrumları yeni yapılan yapıların hangi ivmelerle tasarlandığı hakkında çok değerli bilgiler sunmakla birlikte, 6 Şubat depremleri nedeniyle yapıların maruz kaldığı en büyük yer ivmesi ve spektral ivmelerle karşılaştırıldığında çok daha anlamlı bilgiler sunabilir.

Bu bağlamda, 6 Şubat depremlerinin kayıtlarının frekans/periyot içeriğinin de incelenmesi ve yapılan çözümlemeler sonucunda Şekil 7'de gösterilen spektral ivme değerleri hesaplanmıştır. İlk bakışta her iki depremin spektral ivmelerinin yüksek periyotlarda daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5. Deprem kayıtlarından elde edilen arias yoğunlukları



Şekil 6. Niğde il merkezi için 2007 ve 2018 tarihli deprem yönetmeliklerimize göre hesaplanan tasarım ivme Spektrumları [25,26]

Pazarcık deprem kayıtlarından elde edilen ivme eğrileri doğu-batı yönlü hareketin daha baskın olduğunu göstermekle birlikte, özellikle 0-1 s periyot aralıklarında her üç yönde de spektral ivme değerlerinin birbirine yakın olduğu, ancak 1 s ve sonrasında ivme değerlerinde ayrışmalar olduğu gözlenmiştir. Elbistan depreminde ise yer hareketi hem frekans içeriği hem de en büyük değerler açısından belirgin şekilde farklıdır. Özellikle 1 s periyotlu doğu-batı yönlü yer hareketinin spektral ivmesi 150 cm/s2 civarında olup, depremlerin il merkezinde bulunan 5102 no'lu istasyonundaki en büyük ivmeli yer hareketi olarak kayda geçmiştir.

Tablo 1'de yer hareketinin her üç yönde ve yatayda en büyük değer olmak üzere, yer ivmesi ile 0.2 s ve 1.0 s periyotlarda gözlemlenen spektral ivmeler gösterilmiştir. Yer hareketlerinin farklı salınım periyotlarındaki ivme dağılımının da açıkça gösterdiği gibi özellikle 1 s civarında ivmelerin belirgin şekilde büyüdüğü görülmektedir. Bu durum tasarım ivme spektrumları ile karşılaştırıldığında hiç de beklenmemektedir. Tasarım ivme spektrumlarımız incelendiğinde (Şekil 7) aslında özellikle kısa periyotlarda tasarım ivmelerinin uzun periyot ivme değerlerine göre çok daha büyük olduğu rahatlıkla anlaşılabilir. Dolayısıyla, Tablo 1'de karşımıza çıkan böylesi bir durumun açıklanması için daha detaylı çalışma yapılması gerektiği söylenebilir.

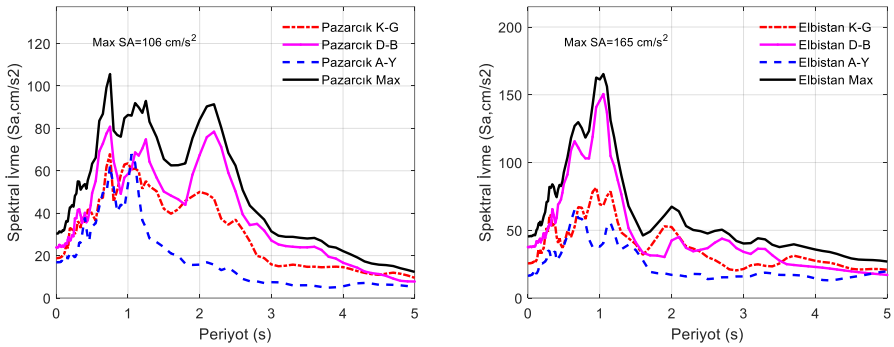
Tablo 1'den anlaşılabilecek bir başka husus ise, her iki deprem için de doğu-batı yönlü hareketin daha güçlü olduğu ve Elbistan depreminin meydana getirdiği, periyodu 1.0 s olan yer hareketinin ivmesinin Pazarcık depremine göre neredeyse iki kattan daha fazla olduğudur.

Bu noktada gözlemlenen ivme spektrumlarının tasarım ivmelerinden daha büyük olup olmadığı, ya da yapılara tasarlanandan daha fazla ivme etki edip etmediğinin belirlenmesi çok önemlidir. Tasarım ivme spektrumları TBDY, (2018) [25] çalışmaları kapsamında değiştirilmiş, bir önceki deprem yönetmeliği olan DBYYHY (2007) [26] kapsamında kullanılan tasarım ivme spektrumu ile 2018 ve sonrası yapıların tasarımında farklı tasarım ivme spektrumları kullanılmıştır.

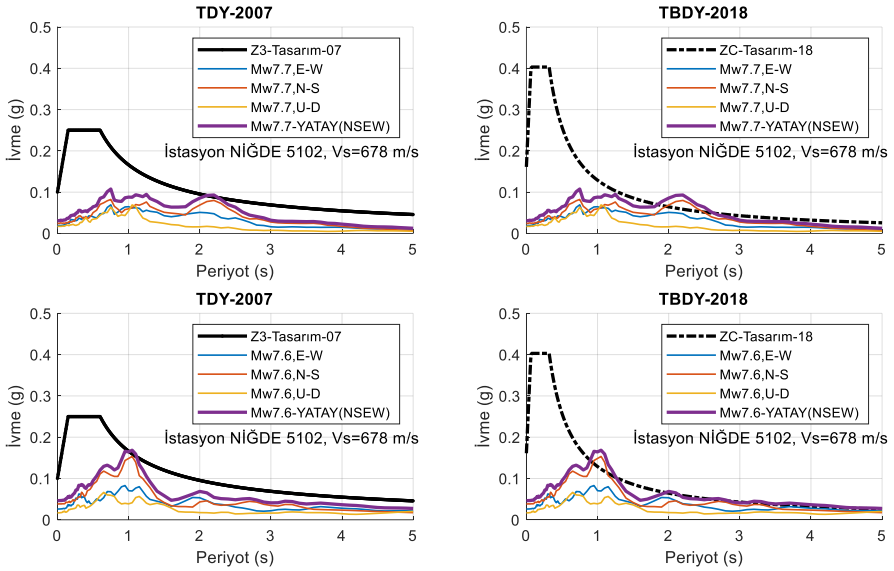
Şekil 8'de Niğde İl Merkezi ivme ölçe istasyonu için geliştirilen tasarım spektrum eğrilerinin, her iki depremde kaydedilen ivme spektrum eğrileri ile karşılaştırılması yapılmıştır. 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerine göre 5102 no'lu istasyonun tasarım ivme değerlerinin her iki deprem nedeniyle maruz kalınan spektral ivme değerlerinden genelde büyük olduğu anlaşılmakta ancak özellikle 1.0 s civarında ölçülen değerlerin TBDY, 2018 tasarım ivmelerinden daha büyük olduğu görülmüştür. Özellikle salınım periyodu yüksek olan yüksek katlı yapılar için her iki depremin de zorlayıcı olduğunu belirtmekte fayda vardır. Aslında yüksek periyotlarda yüksek ivme değerlerinin gözlemlenmesi zayıf zeminlere özgü bir durum olmakla birlikte, daha sağlam zeminlerde düşük periyotlarda yüksek ivmelerin olması beklenir. Tasarım ivme spektrumlarından da anlaşılacağı üzere düşük periyotlarda yüksek tasarım ivmeleri öngörülmüş ve saha da gözlemlenen ivme değerleri, bu tasarım değerlerinin çok altında kalmıştır. Dolayısıyla, rahatlıkla denebilir ki, bu depremlerde ana salınım periyodu düşük olan yapılar yani az katlı konutlar kapasitelerinin çok daha altında ivmelere maruz kalmışlardır.

Tablo 1. Hesaplanan en yüksek yer ivmeleri (PGA) ile spektral ivmeler (SA (T=0.2 s) ve SA (T=1.0 s) (cm/s^2)

Yön	Pazarcık (M_w=7.7)			Elbistan (M_w=7.6)		
	PGA	SA (T=0.2 s)	SA (T=1.0 s)	PGA	SA (T=0.2 s)	SA (T=1.0 s)
K-G	18.81	32.88	63.51	25.60	35.13	69.14
D-B	23.85	27.23	58.48	37.63	43.58	145.73
En Büyük Yatay İvme	30.38	42.69	86.33	45.52	55.97	161.30
A-Y	16.85	20.75	53.58	16.51	25.44	37.89



Şekil 7. Niğde il merkezi 5102 no'lu istasyon kayıtlarından elde edilen ivme spektrumları



Şekil 8. Niğde il merkezi (5102 no.lu İstasyon) tasarım ivme eğrileri ve 6 şubat Pazarcık (M_w=7.7) ve Elbistan (M_w=7.6) depremlerinin meydana getirdiği ivme spektrumları

3 Sonuçlar)

Çalışmanın en önemli bulguları Niğde İl Merkezinde bulunan 5102 no.lu sismik veri toplama istasyonundan en elde edilen kayıtların çözümlenmesi sonucunda ortaya çıkan periyot-ivme dağılımıdır. İstasyonun zemin sınıfı ZC olmasına rağmen, en büyük spektral ivmenin 1 s civarında olması beklenmeyen bir durum olup, üzerinde çalışılması gereken bir husus olarak göze çarpmaktadır.

Gözlemlenen periyot-ivme eğrisi, tasarım ivme eğrileri ile karşılaştırıldığında özellikle periyodun 1 s ve çevresi değerleri için, Elbistan depreminin tasarım ivmelerinin üzerine çıktığı gözlemlenmiştir. Bu da ana salınım periyodu 1 s ve civarı olan yapıların zorlandığını ve hatta deprem yönetmeliği gereği uygulanan tasarım ivmelerinin üzerinde ivmelere maruz kaldığını göstermektedir.

Hem Arias yoğunluk eğrileri hem de ivme spektrum eğrileri incelendiğinde Elbistan depreminin etkisinin Pazarcık depremine göre daha büyük olduğu anlaşılmakta olup, Niğde il merkezine biraz daha uzak olan Elbistan depreminin etkilerinin daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Bu hususta depremlerin meydana geldiği fayların türü ve doğrultuları mutlaka incelenmelidir.

Daha önce Niğde için üretilen senaryolarda Tuz Gölü Fay Hattı ve Ecemiş Fay Hattının deprem üreteceği varsayılmış [27], bu depremlerle birlikte hem deprem senaryolarının hem

de sismik tehlike haritalarının değiştirilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır.

Zemin büyütmelerine maruz kalan bir deprem dalgasının periyodunun uzayacağı ve genliğinin büyüyeceği bilinmektedir. Dolayısıyla yapıların deprem performansını değerlendirirken üzerinde bulunduğu zeminin çok önemli olduğu göz önüne alınarak değerlendirmeler yapılmalıdır. Bu bağlamda Niğde il merkezinde sadece bir tane ivmeölçer olması maalesef çalışmaları kısıtlamaktadır. Zeminin özelliklerinin çok küçük alanlarda bir değişkenlik gösterdiği göz önüne alınarak, ivmeölçer sayısının artırılmasının zorunlu olduğu görülmüştür.

Teşekkür

Çalışma kapsamında Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi'nin deprem verileri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan verileri web sayfasında yayımlayarak hizmete sunan Kandilli Rasathanesine teşekkür ederim.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %14

Kaynaklar

[1] R. Demirtaş, Orta Anadolu Kıta-İçi Fay Sistemi (Oakifs) Diri Fayları, Paleosismolojik Çalışmalar Ve Gelecek Deprem Potansiyelleri, Teknik Rapor, 2019

[2] S. Öztürk, Orta Anadolu Bölgesi ve civarındaki depremselliğin bölge-zaman-magnitüd analizleri ve güncel deprem potansiyeli. Turkish Journal of Earthquake Research, 1 (2), 148-166, 2019. https://doi.org/10.46464/tdad.644126.

[3] S. Öztürk Orta Anadolu Bölgesi (Türkiye) ve civarındaki güncel deprem aktivitesinin sismik durgunluk ve magnitüd-deprem sayısı istatistiği. Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 7(2), 645-652, 2019. https://doi.org/10.18586/msufbd.619968.

[4] B. Öztürk, Scaling method application for seismic design along the central anatolian fault zone. Advances in Civil Engineering. 2022. https://doi.org/10.1155/2022/1963553

[5] A. Koçyiğit, U. Doğan, Strike-slip neotectonic regime and related structures in the Cappadocia region: a case study in the Salanda basin, Central Anatolia, Turkey. Turkish Journal of Earth Sciences: 25(5), 393-417, 2016. https://doi.org/10.3906/yer-1512-9

[6] Kandilli Rasathanesi, 20 Eylül 2020 Obruk-Bor-Niğde Depremi, B.Ü. Kandilli Rasathanesi ve DAE Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme Ve Değerlendirme Merkezi Basın Bülteni, İstanbul, 2020

[7] USGS,https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0008qkc/shakemap/intensity, Son Erişim Tarihi: 18.09.2023

[8] R. Demirtaş, 27 Haziran 1998 Ceyhan-Misis, 22 Ocak 1997 Hatay depremleri: Doğu Anadolu Fayı yakın bir deprem serisinin hazırlık evresinde mi?. Teknik Rapor, Jeoloji Mühendisleri Odası, ANKARA, 1998

[9] Kandilli Rasathanesi (2023) 25 Şubat 2023 Obruk-Bor-Niğde Depremi, B.Ü. Kandilli Rasathanesi Ve DAE Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme Ve Değerlendirme Merkezi Basın Bülteni, İstanbul, 2023

[10] NÇŞİDİM, Niğde Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü (2023) https://webdosya.csb.gov.tr/db/nigde/duyurular/ilan-metn--ek--20230623081608.pdf, Son erişim Tarihi: 18.09.2023

[11] N. Ambraseys, Temporary seismic quiescence: se Anatolia, Geophysical Journal, 96, 311 – 331, 1989

[12] E. Bayrak, Ş. Yılmaz, M. Softa, T. Türker, Y. Bayrak, Earthquake hazard analysis for East Anatolian Fault Zone, Turkey. Natural Hazards, 76(2),1063-1077, 2015. https://doi.org/10.1007/s11069-014-1541-5.

[13] S.E. Güvercin, H. Karabulut, Ö. Konca, U. Doğan, S. Ergintav, Active seismotectonics of the East Anatolian Fault. Geophysical Journal International, 230(1), 50-69, 2022. https://doi.org/10.1093/gji/ggac045.

[14] A. Tan, H. Eyidoğan, The kinematics of the East Anatolian Fault Zone, Eastern Turkey and seismo-tectonic implications. International Journal of Engineering & Applied Sciences (IJEAS), 11(4) 494-506, 2019. https://doi.org/10.24107/ijeas.649330.

[15] L. Lamair, S. Hage, A. Hubert-Ferrari,U. Avsar,M. El Ouahabi, M.N. Çağatay, F. Boulvadin, A 3000 yr history of earthquakes recorded in Hazar Lake potentially related to ruptures along the East Anatolian Fault (Turkey)., 6th International INQUA Meeting on Paleoseismology, Active Tectonics and Archaeoseismology,19-24 April 2015, Pescina, Fucino Basin, Italy, 2015

[16] N. Ambraseys, Earthquakes in the Eastern Mediterranean and the Middle East: a multidisciplinary study of 2000 years of seismicity, Cambridge, Cambridge, UK, 968, 2009

[17] AFAD, 06 Şubat 2023 Pazarcık-Elbistan Kahramanmaraş (Mw: 7.7 – Mw: 7.6) Depremleri Raporu, Ankara, 2023

[18] İTÜ, 6 Şubat 2023 04.17 7.8 Kahramanmaraş (Pazarcık, Türkoğlu) Hatay (Kırıkhan) ve 13.24 Mw 7.7 Kahramanmaraş (Elbistan, Nurhak, Çardak) Depremleri, İstanbul, 2023

[19] ODTÜ DMAM (2023) 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık Mw=7.7 ve Elbistan Mw=7.6 Depremleri Ön Değerlendirme Raporu, METU/EERC 2023-01, Ankara, 2023

[20] Hacettepe Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06 February 2023 -Kahramanmaraş Pazarcık (Mw=7.7) and Kahramanmaraş Elbistan (Mw=7.6) Report on the Investigation of Earthquakes, Ankara, 2023

[21] Hacettepe Üniversitesi Doğal Afetler Araştırma ve Uygulama Merkezi (DAUM), Mühendislik ve sosyolojik boyutlarıyla 6 şubat 2023 Pazarcık ve Elbistan (Kahramanmaraş) merkezli depremlere yönelik ön değerlendirme raporu, Ankara, 2023.https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28439.14249.

[22] Kandilli Rasathanesi, http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb/ , Son Erişim Tarihi, 17.09.2023
[23] Kandilli Rasathanesi (2023) 25 Şubat 2023 Obruk-Bor-Niğde Depremi, B.Ü. Kandilli Rasathanesi Ve DAE Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme Ve Değerlendirme Merkezi Basın Bülteni, İstanbul, 2023
[24] AFAD, https://deprem.afad.gov.tr/event-catalog, Son erişim tarihi: 17.09.2023.
[25] TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, AFAD, Ankara, 2018
[26] DBYYHY, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara, 2007
[27] IRAP,https://nigde.afad.gov.tr/kurumlar/nigde.afad/NIGDE-IRAP.pdf

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 223-235

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Al_2O_3 nanoparçacıklarının ve çeşitli antioksidan katkı maddelerinin dizel motor karakteristiklerine etkilerinin araştırılması

Investigation of the effects of Al_2O_3 nanoparticles and various antioxidant additives on a diesel engine characteristic

Abdülvahap Çakmak[1,*]

[1] *Samsun Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 55420, Samsun, Türkiye*

Öz

Bu çalışmada, hacimsel olarak %15 oranında biyodizel içeren dizel-biyodizel yakıt karışımına (B15) alüminyum oksit (Al_2O_3) nanoparçacıkları ile bütil hidroksi tolüen (BHT), tersiyer bütil hidrokinon (TBHQ) ve karanfil esansiyel yağı (KEY) antioksidan katkı maddelerinin eklenmesinin yanma karakteristikleri, motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Al_2O_3 nanoparçacıkları 100 ppm konsantrasyonunda ve antioksidan katkı maddelerinin her biri 2000 ppm konsantrasyonunda B15 yakıtına eklenmiştir. Elde edilen katkılı yakıtlar ile katkı içermeyen dizel ve B15 yakıtı dört zamanlı ve tek silindirli bir dizel motorda test edilmiştir. Al_2O_3 nanoparçacıklarının tek başına yakıt katkısı olarak kullanıldığında motor performansının iyileştiği, CO, HC ve is emisyonlarının azaldığı ancak aynı çalışma şartlarında NO_X emisyonunun ortalama %30.36 oranında arttığı belirlenmiştir. Al_2O_3 nanoparçacıklarının ve antioksidan katkı maddelerinin birlikte kullanılması durumunda NO_X emisyonu ortalama %7.63 oranında azalmış ve B15 yakıtına çok yakın motor performans değerleri elde edilmiştir. NO_X emisyonunun azaltılmasında TBHQ antioksidan katkı maddesinin diğer antioksidanlara göre daha etkili olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Antioksidan, Biyodizel, Dizel motor, Yakıt katkısı, Nanoparçacık

Abstract

In this study, the effects of the addition of aluminium oxide (AI_2O_3) nanoparticles and butyl hydroxytoluene (BHT), tertiary butyl hydroquinone (TBHQ) and clove essential oil (CEO) antioxidant additives to a diesel-biodiesel fuel mixture (B15) containing 15% by volume biodiesel on combustion characteristics, engine performance and exhaust emissions were investigated experimentally. Al_2O_3 nanoparticles at the dosage of 100 ppm and each of the antioxidant additives at a concentration of 2000 ppm were added to the B15 fuel. The obtained test fuels with additives and the additive-free diesel and B15 fuel were tested in a four-stroke and single-cylinder diesel engine. It is determined that when Al_2O_3 nanoparticles are used alone as a fuel additive, engine performance improves, CO, HC and soot emissions decrease, but NOx emission increases by an average of 30.36% under the same operating conditions. It is found that when Al_2O_3 nanoparticles and antioxidant additives are added together to fuel, NOx emission decreases by 7.63% on average and engine performance values are very close to those of B15 fuel. It is concluded that the TBHQ antioxidant additive is more effective than other antioxidants in NOx emission reduction.

Keywords: Antioxidant, Biodiesel, Diesel engine, Fuel additive, Nanoparticle

1 Giriş

Sınırlı rezerve sahip olan petrol esaslı yakıtların yol açtığı siyasal, ekonomik, çevresel ve sağlık sorunları nedeni ile yerel kaynaklardan üretilebilen, temiz ve yenilenebilir alternatif yakıtların geliştirilmesi ve kullanımı önem kazanmıştır [1]. Çeşitli yenilenebilir alternatif yakıtlar arasından biyodizel fosil dizel yakıtına en uygun alternatif yakıttır [2]. Biyodizel, bitkisel yağlardan, hayvansal yağlardan veya bunların atıklarından kimyasal yöntemle üretilen, diğer alternatif yakıtlara kıyasla dizel yakıtına yakın termofiziksel özelliklere sahip yenilenebilir bir yakıttır. Biyodizel yerel hammaddelerden üretilebildiği için petrol ithalatının azaltılmasında, yakıt çeşitliliğinin artırılmasında ve enerji arz güvenliğinin sağlanmasında önemli rol oynamaktadır [3,4]. Teknik açıdan değerlendirildiğinde, biyodizel petrol esaslı dizel yakıtına göre önemli üstünlükleri bulunmaktadır. Biyodizelin kimyasal bileşiminde kütlece %10-12 oranında oksijen bulunması yanmayı iyileştirerek karbon monoksit (CO), hidrokarbon (HC) ve is emisyonlarını azaltabilmektedir [5]. Üretildiği hammadde kaynağına bağlı olarak setan sayısı, dizel yakıtına göre daha yüksek ve kükürt içeriği düşüktür. Dizel yakıt enjeksiyon sistemi için son derece önemli olan yakıtın yağlayıcılık karakteristiği biyodizel kullanımı ile gelişmektedir [6]. Biyodizel, toksik etkisi bulunmayan ve doğada kısa sürede bozunabilen bir yakıttır. Mevcut motor teknolojisi, yakıt transfer sistemleri ve yakıt dağıtım alt yapısı ile uyumludur. Biyodizelin parlama noktası sıcaklığı ve kendi kendine tutuşma noktası sıcaklığı dizel yakıtına göre daha yüksektir. Bu özellikler yangın ve patlama riski açısından biyodizelin daha güvenli yakıt olmasını sağlar. Biyodizel karbon döngüsünde yer aldığı için atmosfere salınan karbondioksit

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: abdulvahap.cakmak@samsun.edu.tr (A. Çakmak)
Geliş / Recieved: 16.04.2023 Kabul / Accepted: 24.11.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngmuh.1284143

(CO_2) miktarının artmasına neden olmaz. Ancak biyodizelin dizel yakıtına kıyasla bazı önemli yetersizlikleri bulunmaktadır. Biyodizelin yüksek viskozite ve yoğunluğa sahip olması yakıt atomizasyonunu kötüleştirmektedir [7]. Düşük ısıl değeri nedeni ile yakıt tüketimi artmakta ve motor performansı düşmektedir. Biyodizelin soğukta akış özelliklerinin (bulutlanma noktası sıcaklığı, akma noktası sıcaklığı ve soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığı) yüksek olması soğuk iklim bölgelerinde kullanımı engellemektedir [8]. Biyodizel, motor işletme şartlarına ve biyodizel harmanlama oranına bağlı olarak dizel yakıtına göre genellikle daha yüksek azot oksit (NO_X) emisyonlarına neden olmaktadır [9]. Biyodizel doymamış yağ asidi metil/etil esterleri içerdiğinden dolayı oksidasyon direnci düşüktür. Yakıtın oksidasyonu ile oluşan ketonlar, organik asitler, aldehitler ve çeşitli polimerler yakıtın asit değerini ve viskozitesini yükseltir [10]. Oksidasyon ayrıca biyodizelin yoğunluk, parlama noktası ve ester içeriği gibi diğer yakıt özelliklerinin de kötüleşmesine, depolama ömrünün kısalmasına ve yakıt sisteminde korozyona neden olur [11,12].

Oksidasyon biyodizelin oksijen ile teması halinde gelişen ve yakıt kalitesini düşüren bir süreçtir. Biyodizelin kimyasal bileşiminin yanında sıcaklık, ışık ve nem gibi ortam koşulları da oksidasyon sürecini etkilemektedir [13]. Ayrıca yakıt bileşiminde mikrobiyal ve inorganik maddelerin (özellikle su ve metal) varlığı yakıtın oksidasyonunu hızlandırmaktadır [14]. Aldehitler, karboksilik asitler, polimerler, tortular, oligomerler ve keton gibi oksidasyon ürünleri yakıt sisteminde tıkanıklığa yol açabilmektedir [15]. Bu tür teknik sorunların üstesinden gelmek için uygun yakıt taşıma ve depolama şartlarının sağlanmasının yanında biyodizelin oksidasyon direncinin katkı maddeleri ile artırılması gerekmektedir.

Biyodizelin oksidasyon direncini artırmak için antioksidan katkı maddeleri kullanılmaktadır. Antioksidan maddeler kararlı radikaller içerirler. Antioksidan maddeler yakıt içerisinde serbest radikallerin oluşumunu gidererek oksidasyon reaksiyonlarının başlamasını geciktirir ve yavaşlatır. Böylece biyodizelin oksidasyon direnci artar. Biyodizelin tekli veya çoklu doymamış yağ asidi ester içeriği artıkça oksidasyon direnci zayıflamaktadır [16]. Son yıllarda yapılan bir araştırmaya göre antioksidan katkı maddelerinin antioksidatif etkilerinin farklı hammaddelerden üretilen biyodizel yakıtlarda farklı düzeyde olduğunu ortaya koymuştur [17].

Antioksidanlar yakıtın oksidasyon kararlılığını arttırmanın yanında düşük sıcaklıklarda biyodizelin kristalleşmesini etkili bir şekilde engelleyebilir ve böylece yakıtın soğuk filtre tıkanma noktası sıcaklığını düşürebilir [18]. Ayrıca antioksidanların motorlarda NO_X emisyonu oluşumunu azaltma potansiyeli bulunmaktadır. İçten yanmalı motorlarda termal NO_X oluşum mekanizmasının ardından en önemli NO_X oluşum mekanizması *Fenimore* NO_X (*promt* NO_X) oluşum mekanizmasıdır [19]. Bu mekanizmada bazı ön reaksiyonlar neticesinde CH, CH_2, C_2, C_2H, O ve OH gibi serbest radikaller oluşur. Bu radikaller daha karmaşık kimyasal reaksiyonlar ile NO, NO_2, N_2O, N_2O_3, N_2O_4 ve N_2O_5 gibi bileşiklere dönüşerek NO_X emisyonunu artırır [20]. Yakıta eklenen antioksidan maddeler yüksek aktiviteye sahip bu radikallerin oluşumunu yavaşlatarak NO_X emisyonunu azaltır [21].

Antioksidanlar biyodizelin oksidasyon direncini ve stabilitesinin (karlılığını) artırması, soğukta akış özelliklerini iyileştirebilmesi ve yanma sırasında serbest radikallerin oluşumunu yavaşlatarak NO_X emisyonunu azaltmasına rağmen yanma sırasında yakıt molekülerinin veya kısmı/eksik yanma ürünlerinin oksidasyonunu olumsuz yönde etkileyerek CO, HC ve is emisyonlarını yükseltmektedir [22].

Biyodizelin başta zayıf buharlaşma karakteristiği, düşük ısıl değeri ve yüksek viskozitesi nedeni ile motor performansı düşüktür. Biyodizelin bu önemli sorunun çözümü için nanoparçacıkların kullanımı araştırmacıların dikkatini çekmiştir [23].

Nanoparçacıklar, büyük yüzey alanı-hacim oranına, yüksek termal iletkenliğe, yüksek enerji yoğunluğuna ve yüksek kimyasal etkinliğe sahiptir [23,24]. Metalik nanoparçacıklar düşük konsantrasyonlarda yakıta eklenmesi halinde yakıtın termofiziksel özellikleri gelişmekte, daha iyi yakıt atomizasyonu ve hava-yakıt karışımı elde edilmekte, yanma verimi artmakta, motor performansı iyileşmekte ve egzoz emisyonları azalmaktadır [25,26]. Metalik nanoparçacıklar bu etkileri sayesinde dizel motorlarda kullanılan yakıtlar için önemli yakıt katkı maddeleri haline gelmiş ve son yıllarda konu hakkında çok sayıda araştırma yapılmıştır [27]. Bu çalışmalarda nanoparçacıkların kullanımı ile motor karakteristiklerinin iyileştiği ancak NO_X emisyonunda genellikle artış meydana geldiği belirtilmiştir [28]. Ayrıca yakıt içerisindeki metalik nanoparçacıklar taşıma ve depolama sırasında yakıtın oksidasyon direncini zayıflatabilir.

Antioksidan katkı maddelerinin ve metal nanoparçacıklarının birlikte kullanılması halinde her iki yakıt katkısının olumsuz etkileri hafifletilerek bu katkı maddelerinin faydalarından daha fazla yararlanılabilir. Daha açık bir ifadeyle; metal nanoparçacıklarının kullanımı ile yakıtın oksidasyon direncinin düşeceği ve NO_X emisyonlarının artacağı düşünüldüğünde bu olumsuz etkileri hafifletmek için antioksidan katkı maddelerinin kullanılması faydalı olacaktır. Antioksidan katkı maddelerinin kullanımı ile yakıtın oksidasyon direnci artarken NO_X emisyonu azalacaktır. Ancak yanma sırasında yakıtın oksidasyon süreci kötüleşeceği için CO, HC ve is emisyonları artacaktır. Bu emisyonlar ise metalik nanoparçacıkların yüksek katalitik etkisi ile azaltılabilir.

Nano yakıt katkılarının ve antioksidan katkı maddelerin birlikte kullanımına ilişkin literatürdeki sınırlı sayıdaki çalışmaların değerlendirmesi aşağıda verilmiştir.

Ashok vd. [29] saf biyodizel yakıtına 50 ppm ve 100 ppm oranında titanyum dioksit (TiO_2) nanoparçacıkları ile 200 ppm ve 500 ppm oranında BHT antioksidan katkı maddesini ayrı ayrı eklemiş ve çift silindirli bir dizel motorda 1200 d/dk sabit hızda ve 0, 25, 50, 75 ve %100 yükte test etmiştir. TiO_2 nanoparçacıklarının oksitleyici katalizör gibi davranarak yanmayı iyileştirdiği, HC ve CO emisyonlarını azalttığı ve tam yükte termal verimi %4 oranında artırdığı belirlenmiştir. BHT antioksidan maddesinin 500 ppm konsantrasyonunda

kullanılması ile NO_X emisyonunun %11.65 oranında düştüğü ancak BHT serbest radikallerin oluşumunu engellediği için HC ve CO emisyonlarının yükseldiği ifade edilmiştir.

Farklı bir çalışmada [30] saf *Calophyllum Inophyllum* biyodizeline 50 ppm ve 100 ppm konsantrasyonunda çinko oksit (ZnO) nanoparçacıkları ile 200 ppm ve 500 ppm oranında ethanox antioksidan katkı maddesi ayrı ayrı eklenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ZnO nanoparçacıklarının 100 ppm konsantrasyonunda kullanılması durumunda termal verimin %4.7 oranında arttığı ve NO_X emisyonunun %12.6 oranında azaldığı belirlenmiştir. Ethanox antioksidan katkı maddesinin 500 ppm konsantrasyonunda kullanılması halinde NO_X emisyonun %17.8 oranına kadar azaldığı ancak HC ve CO emisyonların arttığı tespit edilmiştir.

Krishnakumar vd. [31] biyodizel-dizel yakıt karışımına (B20) 30 ppm oranında grafen nanoparçacıkları ile 1000 ppm konsantrasyonunda BHT, BHA (*butil hidroksi anisol*) ve TBHQ antioksidanlarını ayrı ayrı ekleyerek hazırladıkları yakıtları tek silindirli bir deney motorunda sabit devir sayında ve farklı yüklerde test etmiştir. Grafen nanoparçacıkları ile antioksidanların birlikte kullanılması halinde B20 referans yakıtına göre termal verimin arttığı, özgül yakıt tüketiminin düştüğü, NO_X ve HC emisyonlarının azaldığı ancak CO emisyonunun arttığı ifade edilmiştir. Performans ve egzoz emisyonu açısından en iyi sonuçların grafen nanoparçacıklarının, TBHQ antioksidan maddesi ile kullanılması durumunda elde edildiği bildirilmiştir.

Prabu vd. [32] biyodizel yakıtına %4 oranında iki farklı oksijenli yakıt katkısı, 30 ppm oranında Al_2O_3 ve CeO_2 nanoparçacıkları ile 2000 ppm oranında süksinimit (*succinimide*) ve NPPD (*N,N-Dimethyl p-phenylenediamine dihydrochloride*) antioksidan katkılarının birlikte eklenmesi halinde saf biyodizel yakıtına göre daha iyi motor performans ve emisyon değerleri elde etmişlerdir. Benzer sonuçlar Reddy ve Wani [33] tarafından da yayımlanmıştır. Araştırmacılar biyodizel-dizel yakıt karışımı (B20) için 1500 ppm konsantrasyonunda NPPD antioksidan katkı maddesi ile 60 ppm konsantrasyonunda TiO_2 nanoparçacıklarının birlikte kullanılmasının, bu yakıt katkılarını ayrı ayrı kullanmaktan daha iyi sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.

Sentetik antioksidanların performansları doğal oksidanlara göre daha yüksek ve maliyetleri daha düşük olabilmektedir [15]. Bu nedenle ticari uygulamalarda biyodizelin depolama stabilitesini artırmak için çoğunlukla sentetik antioksidanlar kullanılmaktadır. Bu katkı maddeleri, uygun koşullarda depolanan biyodizelin üç ay kadar olan raf ömrünü dokuz aya kadar uzatmaktadır [34,35]. Ancak sentetik (kimyasal) antioksidanlar petrol esaslı ürünler olduğu için insanlar ve diğer canlılar için toksik etkiye sahiptir. Ayrıca sentetik antioksidanlar emisyon sonrası çevre sorunlarına da neden olabilmektedir [36]. Bu nedenle alternatif olarak üretimi daha kolay ve toksik olmayan doğal (bitkisel) antioksidanlar araştırılmaya başlanmıştır. Bitkilerden elde edilen doğal antioksidanlar, antioksidan işlevi gören yüksek fenolik içeriklere sahiptir [37]. Doğal antioksidanlar sentetik antioksidanlar gibi hidrojen atomları vererek, ester molekülünü yenileyerek ve oksidasyon mekanizmasını kesintiye uğratarak serbest radikalleri inhibe etme yetenekleri vardır [37,38]. Bu nedenle toksik etkileri olmayan doğal antioksidanlar sentetik antioksidanlara alternatif olabilir. Bu durum sürdürülebilir ve yenilenebilir antioksidan üretimine imkân verir [39]. Mevcut literatürde sentetik ve doğal antioksidan katkı maddelerinin oksidatif etkilerinin araştırıldığı çok sayıda çalışma [40–44] olmasına rağmen doğal antioksidanların motor testlerine yönelik çalışmalar oldukça sınırlıdır [15,45].

Metalik nanoparçacıklar ile antioksidan katkı maddelerinin birlikte kullanılması biyodizelin yakıt özelliklerini geliştirilebilir, optimum motor performans ve egzoz emisyonu sunabilir [46]. Ancak verilen literatür değerlendirmesinden görüleceği üzere her iki yakıt katkısının birlikte kullanımını araştıran çalışmaların yetersiz olduğu ve bu çalışmalarda doğal antioksidanların incelenmediği görülmüştür. Bu nedenle sunulan bu çalışmada Al_2O_3 nanoparçacıkları ile sentetik antioksidanların (BHT ve TBHQ) ve doğal antioksidanın (KEY) B15 yakıtına birlikte eklenmesinin motorun yanma, performans ve egzoz emisyonlarına etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar dizel yakıtı, katkı içermeyen B15 yakıtı ve sadece 100 ppm oranında Al_2O_3 nanoparçacıkları içeren B15 yakıtı ile karşılaştırılmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 Test yakıtlarının hazırlanması

Test yakıtlarının hazırlanmasında ultra düşük kükürtlü dizel yakıtı, atık kızartma yağı biyodizeli, Al_2O_3 nanoparçacıkları, BHT ve TBHQ sentetik antioksidanları ile doğal antioksidan olarak karanfil esansiyel yağı (KEY) kullanılmıştır. TS EN 590 dizel ürün spesifikasyonunu sağlayan dizel yakıtı *Shell* yakıt istasyonundan satın alınmıştır. EN 14214 spesifikasyonunu karşılayan biyodizel yakıtı Kolza Biyodizel A.Ş.'den temin edilmiştir. Üretici firmadan sağlanan biyodizel analiz sonuçları Tablo 1'de sunulmuştur. Al_2O_3 nanoparçacıkları *NanoAmor* (ABD) firmasından satın alınmıştır. Al_2O_3 nanoparçacıklarının özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Al_2O_3 nanoparçacıklarının karakterizasyonu Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji yayılımlı X-ışını analizi (EDX) ile yapılmıştır. Elde edilen SEM görüntüsü ve EDX spektrumu sırası ile Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmiştir. BHT ve TBHQ antioksidanları *Merck* (Almanya) firmasından satın alınmıştır. KEY ise aktardan temin edilmiş ve bileşimi gaz kromatografisi-kütle spektrometresi ile doğrulanmıştır [41]. Kullanılan antioksidan katkı maddelerinin özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Hacimsel %15 oranında biyodizel ve %85 oranında dizel yakıtı (DY) harmanlanarak B15 yakıtı oluşturulmuştur. Al_2O_3 nanoparçacıkları 100 ppm konsantrasyonunda B15 yakıtına eklenerek nanoparçacık içeren biyodizel-dizel yakıt karışımı (B15+NP) elde edilmiştir. B15+NP yakıtına 2000 ppm konsantrasyonunda sırası ile BHT, TBHQ ve KEY ayrı ayrı eklenerek B15+NP+BHT, B15+NP+TBHQ ve B15+NP+KEY yakıtları oluşturulmuştur. Nanoparçacıkların ve antioksidanların yakıt içinde homojen dağılımını sağlamak için yakıtlar on beş dakika boyunca eş zamanlı

olarak mekanik karıştırıcı ve ultrasonik homojenizatör ile karıştırılmıştır. DY, B15, B15+NP, B15+NP+BHT, B15+NP+TBHQ ve B15+NP+KEY yakıtlarının bazı yakıt özellikleri ölçülmüş ve sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir. Elde edilen nanoyakıtların üç saat boyunca stabil kaldıkları, faz ayırımı veya sedimantasyonun meydana gelmediği görülmüştür.

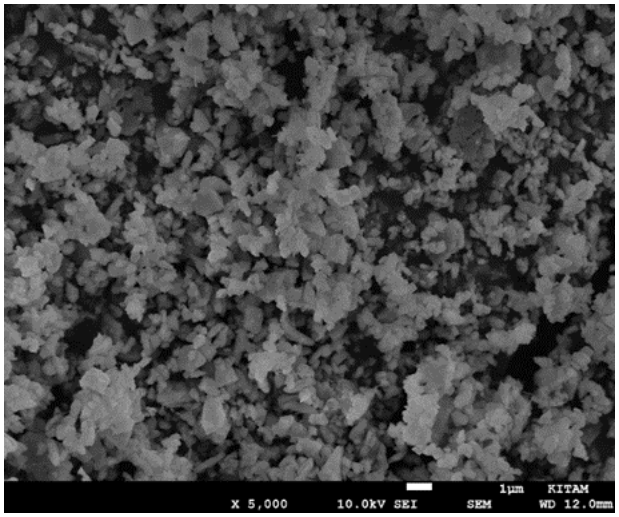
Tablo 1. Biyodizel analiz sonuçları

Özellik	Birim	Test metodu	Sonuç
Yoğunluk@15℃	kg/m^3	TS EN ISO 12185	879.4
Viskozite@40℃	mm^2/s	TS 1451 EN ISO 3104	4.295
Setan sayısı	-	TS EN ISO 5165	58.1
Parlama noktası	℃	TS EN ISO 3679	157
Oksidasyon stabilitesi	saat	TS EN 14112	14.1
Toplam kirlilik	mg/kg	TS EN 12662:2008	<12
Soğuk filtre tıkanma noktası	℃	TS EN 116	+1
Bulutlanma noktası	℃	TS EN ISO 23015	+6
Bakır şerit korozyonu	-	TS 2741 EN ISO 2160	1A
Metanol içeriği	%(m/m)	TS EN 14110	0.02
Fosfor içeriği	mg/kg	TS EN 14107	<1
Su içeriği	%	TS 6147 EN ISO 12937	0.039
Kükürt içeriği	mg/kg	TS EN ISO 20846	5.1
İyot sayısı	gl/100 g	TS EN 14111	86
Asit değeri	mgKOH/g	TS EN 14104	0.15
Monogliserit	%(m/m)	TS EN 14105	0.29
Digliserit	%(m/m)	TS EN 14105	<0.1
Trigliserit	%(m/m)	TS EN 14105	<0.1
Toplam gliserol	%(m/m)	TS EN 14105	0.081
Ester içeriği	%(m/m)	TS EN 14103	97.3
Çoklu doymamış metil ester içeriği	%(m/m)	TS EN 15779	0.17

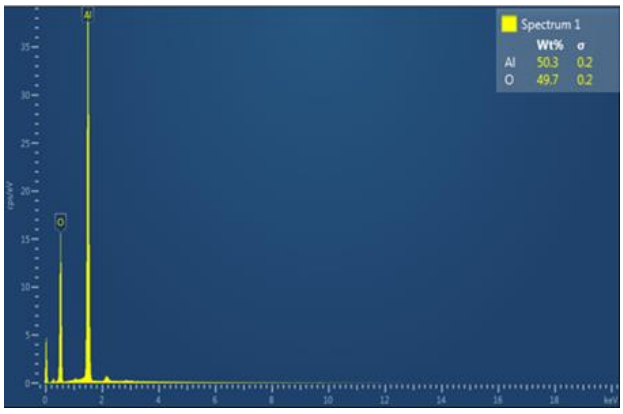
BHT ve TBHQ sentetik antioksidanları yüksek antioksidan aktivitesine sahiptir. KEY ise yüksek öjenol içeriği sayesinde çeşitli antioksidanlara kıyasla güçlü antioksidan aktivitesine sahiptir [47]. Al_2O_3 nanoparçacık ve antioksidan konsantrasyonu yapılan ön deneyler sonucunda belirlenmiştir. Literatürdeki çalışmalarda antioksidan ve nanoparçacıklar genellikle B20 yakıtına veya saf biyodizel yakıtına eklenmiştir. Ancak güncel uygulamada biyodizel %0.5-%7 oranında dizel yakıtı ile harmanlanmaktadır. Biyodizel harmanlama oranının gelecek yıllarda artabileceği dikkate alındığında (Avrupa birliği 2030 yılına kadar %14'e çıkarmayı hedeflemiştir [48]) bu çalışma için %15 biyodizel harmanlama oranın uygun olacağı değerlendirilmiştir.

Tablo 2. Al_2O_3 nanoparçacıklarının özellikleri [49–51]

Partikül boyutu	20-30 nm
Yoğunluk	3970 kg/m^3
Termal iletkenlik	40 W/mK
Yüzey alanı	~180 m^2/g
Erime noktası	2045 ℃
Kaynama noktası	2980 ℃
Saflık	%99.99
Renk	Beyaz



Şekil 1. Al_2O_3 nanoparçacıklarının SEM görüntüsü



Şekil 2. Al_2O_3 nanoparçacıklarının EDX spektrumu

Tablo 3. Antioksidan maddelerinin özellikleri [15,52–55]

Özellik	BHT	TBHQ	KEY
Kapalı formülü	$C_{15}H_{24}O$	$C_{10}H_{14}O_2$	$C_{10}H_{12}O_2$
Mol kütlesi (g/mol)	220.35	166.22	164.2
Yoğunluk (g/cm^3)	1.05	1.05	1.06
Erime noktası (℃)	70	127	-
Kaynama noktası (℃)	265	273	251
Saflık derecesi	%98.0	%98.0	%96.3
Faz/renk/form	Katı/beyaz/kristal	Katı/açık kahve/kristal	Sıvı/soluk sarı/-

2.2 Test düzeneği ve deney şartları

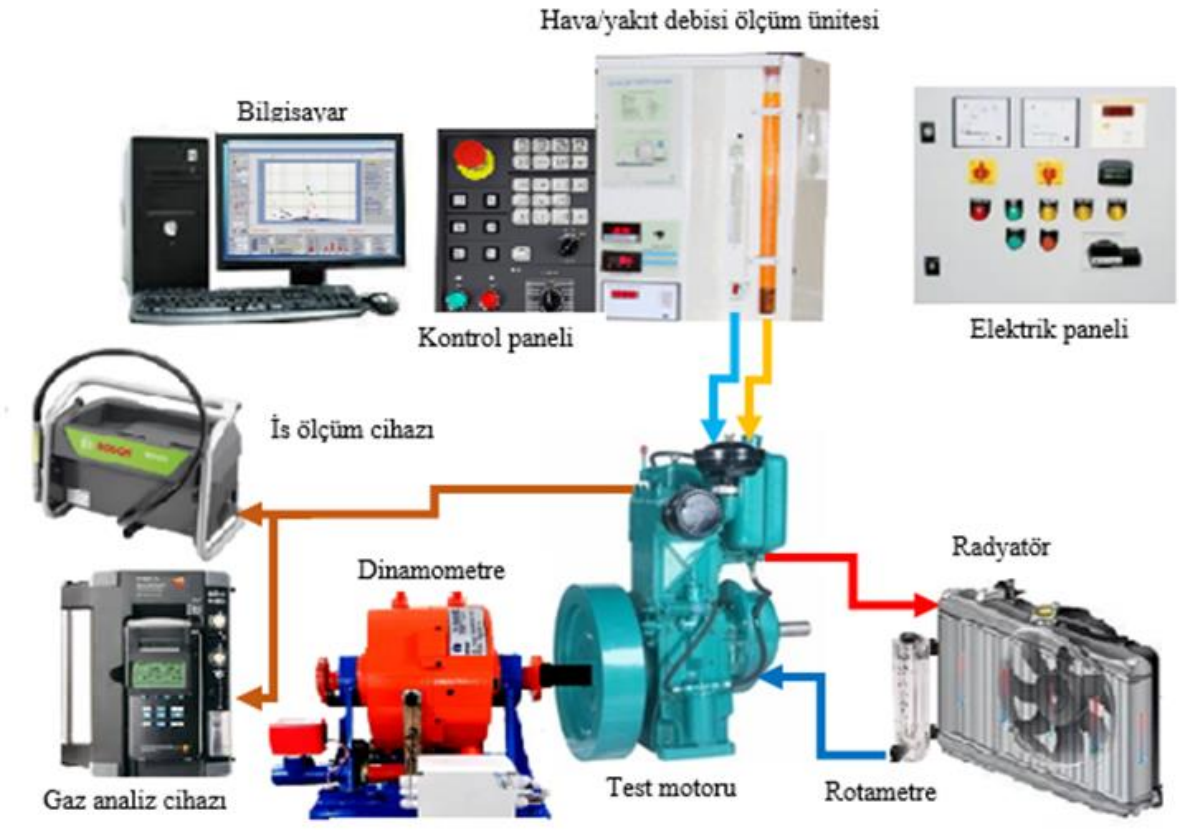
Test düzeneğinin şematik resmi Şekil 3'te ve ölçüm sistemlerinin teknik detayları Tablo 5'te verilmiştir. Test motoru Kirloskar marka TV1 model tek silindirli, dört zamanlı, sıvı soğutmalı ve direkt püskürtmeli bir dizel motorudur. Motor stasyoner olarak (1500 d/dk sabit devirde ve farklı yüklerde: %0-%100) çalışmaktadır. Tork ölçümü için Edyy akımlı su soğutmalı bir dinamometre kullanılmıştır. Motorda herhangi bir modifikasyon yapılmamış ve testler -23° KMA (krank mili açısı) standart püskürtme avansında ve 17.5:1 sıkıştırma oranında gerçekleştirilmiştir. Silindir basıncı 100 çevrim boyunca

kaydedilmiş ve ortamla basınç verileri yanma karakteristiklerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. O_2, CO, CO_2 ve NO_X emisyonları Testo-350 XL gaz analiz cihazı ile HC emisyonları ise K-Test egzoz gazı emisyon cihazı ile ölçülmüştür. İs emisyonları (egzoz gazı duman koyuluğu) BOSCH BEA 070 opasimetre cihazı ile ölçülmüştür.

Motor testleri 1500 d/dk'da ve 0 kW, 0.9 kW, 1.7 kW, 2.6 kW ve 3.5 kW efektif güç çıkışında yapılmıştır. Bu güç çıkışları sırası ile motorun %0, %25, %50, %75 ve %100 yük koşullarına karşılık gelmektedir. Ölçümlere başlamadan önce motor yarım saat 1.7 kW güçte çalıştırılarak motor soğutma suyu sıcaklığının 60°C'ye (rejim sıcaklığına) ulaşması sağlanmıştır. Deneylere önce dizel yakıtı ile başlanmıştır. Yeni bir yakıt testine geçildiğinde önceki testten yakıt sisteminde kalan yakıt boşaltılıp depo yeni test yakıtıyla doldurulmuştur. Her yakıt testi için bu işlem tekrarlanmıştır. Ölçümler motorun kararlı çalışma şartları sağlandığında (egzoz gaz sıcaklığı değişiminin 2 °C'den az olduğu durum) başlatılmıştır. Her test noktasında performans ve emisyon verileri altı kez kaydedilmiş ve bu değerlerin ortalaması hesaplamalarda kullanılmıştır.

Tablo 4. Test yakıtların ölçülen yakıt özellikleri

Özellik	Birim	Test metodu	DY	B15	B15+NP	B15+NP+BHT	B15+NP+TBHQ	B15+NP+KEY
Yoğunluk@15°C	kg/m^3	TS EN ISO 12185	833.4	840.2	840.3	840.5	840.5	840.7
Setan indisi	-	TS EN ISO 4264	53.2	53.6	53.6	53.5	53.5	53.2
Parlama noktası	°C	TS EN ISO 2719	63.0	64.0	65.0	65.0	65.0	64.0
Soğuk filtre tıkanma noktası	°C	TS EN 116	-21	-9	-8	-9	-7	-7
Su içeriği	%(m/m)	TS 6147 EN ISO 12937	0.006	0.009	0.009	0.008	0.009	0.008
Kükürt içeriği	mg/kg	TS EN ISO 20846	7.8	7.2	7.3	7.4	7.4	7.6
Damıtma	°C	TS EN ISO 3405						
	İlk kaynama sıcaklığı		167.3	168.7	168.2	164.0	165.7	159.7
	Son kayamama sıcaklığı		358.2	354.3	354.4	354.4	354.0	354.5
	250°C'de elde edilen % (v/v)		37.7	30.4	30.1	30,2	30.1	30.7
	350°C'de elde edilen % (v/v)		95.2	96.1	95.8	95.8	96.0	95.9
	%95'nin (v/v) elde edildiği sıcaklık		349.3	348.2	348.7	347.6	347.0	348.4



Şekil 3. Deney sisteminin şematik görünümü

Tablo 5. Test sisteminin teknik özellikleri

Sistem Bileşenleri	Teknik özellikler
Test motoru	D/H: 87.5mm/110 mm; Silindir hacmi: 661.5 cm^3; Sıkıştırma oranı:12:1-18:1, Püskürtme avansı: 0-25° KMA ÜÖN önce; Püskürtme basıncı: 200 bar; Maksimum tork: 21.8 Nm@ 1500 d/dk; Maksimum güç: 3.5 kW@ 1500 d/dk; Yağlama sistemi: Basınçlı yağlama; Motor yağı: 3 litre 20W-40.
Dinamometre	Su soğutmalı; Maksimum dönüş hızı: 10000 d/dk, Maksimum yutma gücü: 10 kW; Çift yönlü dönüş.
Yük hücresi/yük kolu	S tipi gerinim ölçer; Kapasite:0-491 N/Yük kolu uzunluğu:0.185 m
Yakıt debisi ölçüm sistemi	Diferansiyel (fark) basınç vericisi; Marka/model: Yokogawa/ EJA110E; Ölçüm aralığı: 0-50 mbar
Hava debisi ölçüm sistemi	Diferansiyel (fark) basınç vericisi; Marka/model: WIKA/ SL-1; Ölçüm aralığı:0-25 mbar;
Sıcaklık ölçümü	Egzoz gazı için K-tip; Ölçüm aralığı:0-1200 ℃; Soğutma sıvısı sıcaklığı için: PT100-tip:0 -100 ℃;
Rotametre	Dikey tip: ölçüm aralığı: 25-400 litre/saat; Maksimum sıcaklık: 200 ℃
Basınç transdüseri	Marka: PCB Piezotronics; Ölçüm aralığı:0-350 bar
Krank açısı sensörü	Marka/model: Kübler/ 8; Çözünürlük: 1° KMA; Maksimum dönüş hızı: 5500 d/dk
Veri toplama kartı	National Instruments USB 6210, 16-bit, 250 kS/s
Elektrik paneli	230 ∓10 V, alternatif akım, 50 Hz
CO sensörü	Ölçüm aralığı:0-10000 ppm; Hata:±10 ppm; Ölçüm tekniği: NDIR (*non-dispersive infrared)*
CO_2 sensörü	Ölçüm aralığı: %0-50; Hata:±%0.2; Ölçüm tekniği: NDIR (*non-dispersive infrared)*
NO_X sensörü	Ölçüm aralığı:0-3000 ppm; Hata:±5 ppm; Ölçüm tekniği: CLA (chemiluminescence analyzer)
HC sensörü	Ölçüm aralığı:0-4000 ppm; Hata:±8 ppm; Ölçüm tekniği: FID (flame ionization detector)
İs (duman opaklığı)	Ölçüm aralığı: %0-100; Hata:±%0.1; Ölçüm tekniği: Yeşil ışık absorbsiyonu

Motor performans parametrelerinin belirsizliği Denklem (1)'e [56] göre hesaplanmıştır. Bu bağıntıda U_P, P bağımlı değişkeni için hesaplanan belirsizlik, x bağımsız değişken ve u bağımsız değişkenin belirsizliğidir. Elde edilen sonuçlar Tablo 6'da sunulmuştur.

$$U_P = \pm\left[\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial P}{\partial x_i}u_i\right)^2\right]^{1/2} \quad (1)$$

Tablo 6. Performans parametrelerinin belirsizliği

Parametre	Belirsizlik değeri
Efektif güç	± 0.0162 kW
Yakıt tüketimi	± 0.0060 l/saat
Özgül yakıt tüketimi	± 1.7 g/kW-h
Hava debisi	±0.2167 kg/saat
Efektif verim	±0.0035

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Yanma karakteristikleri

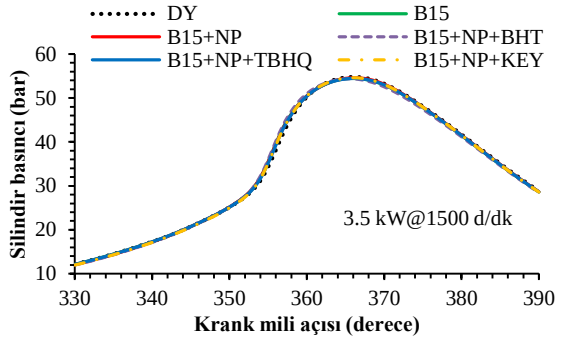
Test yakıtları için krank mili açısına göre ölçülen silindir basıncı, hesaplanan net ısı yayılım oranı ve basınç artış oranı grafiği sırası ile Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir. Yanma karakteristikleri tüm yakıtlar için eşit efektif motor gücü çıkışında (3.5 kW) elde edildiği için yakıtlar arasında yanma karakteristikleri açısından büyük farklar meydana gelmemiştir. Ayrıca Tablo 4'te görüleceği üzere test yakıtlarının belirlenen yakıt özellikleri birbirine oldukça yakındır. Bu nedenle tüm yakıtlar benzer silindir basıncı, net ısı yayılım oranı ve basınç artış oranı eğrisine sahiptir.

DY, B15, B15+NP, B15+NP+BHT, B15+NP+TBHQ ve B15+NP+KEY yakıtları için maksimum silindir basıncı 366° KMA'da sırası ile 54.80, 54.44, 54.58, 54.40, 54.45 ve 54.58 bar olarak ölçülmüştür. Biyodizelin düşük ısıl değeri nedeni ile yakıt karışımlarının maksimum basınç değerinin dizel yakıtına göre daha düşük olması beklenebilir [57]. Fakat aynı efektif güç çıkışı için çevrim başına harcanan yakıt miktarı yakıt karışımları kullanımında dizel yakıtına göre daha yüksektir. Bunun sonucunda tüm yakıtların maksimum silindir basıncı değerleri birbirine yakın bulunmuştur.

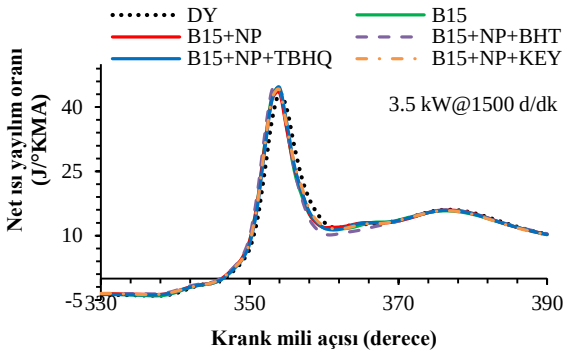
DY, B15, B15+NP, B15+NP+BHT, B15+NP+TBHQ ve B15+NP+KEY için maksimum net ısı yayılım oranı 354° KMA'da sırasıyla 43.22, 44.33, 43.46, 44.62, 44.64 ve 44.08 J/°KMA olarak hesaplanmıştır. B15 ve antioksidan içeren yakıtlar DY ve B15+NP yakıtlarına göre maksimum net ısı yayılım oranını artırmıştır. Bunun nedeni biyodizelin yüksek viskozite ve kaynama noktası sıcaklığı ile antioksidan katkılarının kimyasal reaksiyonları yavaşlatma etkileri sonucu tutuşma gecikmesi süresinin uzaması ve kontrolsüz yanma safhasında biraz daha fazla yakıtın yanması olabilir [58]. Ancak bu çalışmada kullanılan krank mili açı sensörünün düşük çözünürlüğü nedeni ile yakıtların tutuşma gecikmesi süreleri arasındaki 1° KMA'dan küçük farklar ortaya çıkarılamamıştır (tüm yakıtlar için tutuşma gecikmesi süresi 9° KMA olarak bulunmuştur). B15, B15+NP+BHT, B15+NP+TBHQ ve B15+NP+KEY yakıtları maksimum net ısı yayılım oranını DY göre sırası ile %2.57, %3.23, %3.29 ve %1.99 oranında artırmıştır. B15+NP yakıtı, B15 yakıtına göre maksimum net ısı yayılım oranını %1.96 oranında düşürmüştür. Bunun nedeni Al_2O_3 nanoparçacıklarının çok geniş yüzey alanı ve yüksek termal iletkenliği sayesinde hava-yakıt karışım homojenliğinin artması olabilir.

Şekil 6'da test yakıtları için verilen basınç artış oranı grafiği incelendiğinde, yakıt karışımları dizel yakıtına göre

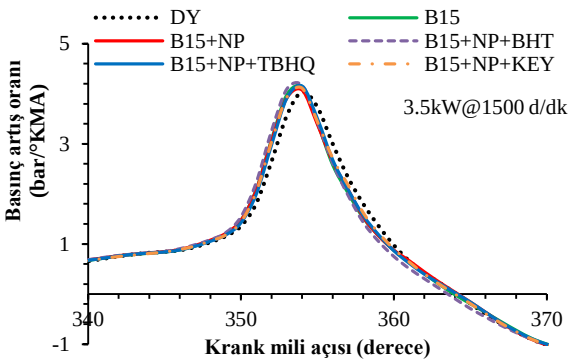
basınç artış oranını yükselttiği görülmektedir. DY, B15, B15+NP, B15+NP+BHT, B15+NP+TBHQ ve B15+NP+KEY yakıtları için maksimum basınç artış oranı 354° KMA'da sırası ile 4.04, 4.14, 4.07, 4.17, 4.16 ve 4.11 bar/°KMA olarak belirlenmiştir. Tüm yakıtlar dizel motoru için kabul edilebilir maksimum basınç artış oranı (vuruntu sınırı) olan 10 bar/°KMA'dan [59] çok daha düşük maksimum basınç artış oranı değerine sahiptir. Dolayısı ile Al_2O_3 nanoparçacıkları ve antioksidan katkı maddelerinin kullanımı ile dizel vuruntusu meydana gelmemiştir. Ancak B15, B15+NP+BHT, B15+NP+TBHQ ve B15+NP+KEY yakıtları dizel yakıtına göre daha yüksek net ısı yayılım oranına sahip oldukları için maksimum basınç artış oranını dizel yakıtına göre sırası ile %2.60, %3.35, %2.97 ve %1.86 oranında artırmıştır. B15+NP yakıtı ise B15 yakıtına göre maksimum basınç artış oranı değerini %1.69 oranında düşürmüştür.



Şekil 4. Test yakıtları için silindir basıncı grafiği



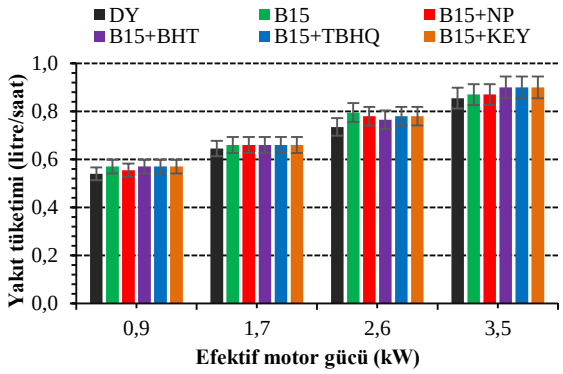
Şekil 5. Test yakıtları için net ısı yayılım oranı grafiği



Şekil 6. Test yakıtları için basınç artış oranı grafiği

3.2 Motor performans karakteristikleri

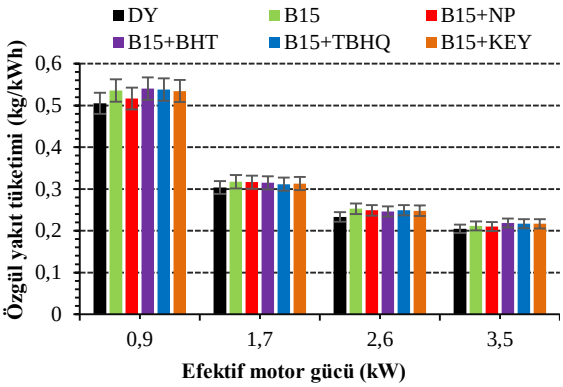
Şekil 7'de test yakıtları için yakıt tüketiminin efektif motor gücüne göre değişimi verilmiştir. Motor gücünü artırmak için silindire püskürtülen yakıt miktarı artırılır. Dolayısıyla tüm yakıtlar için yakıt tüketimi artan efektif motor gücü ile artmakta ve maksimum güçte maksimum seviyeye ulaşmaktadır. DY, B15, B15+NP, B15+NP+BHT, B15+NP+TBHQ ve B15+NP+KEY yakıtları için ortalama yakıt tüketimi değeri sırasıyla 0.6938, 0.7238, 0.7163, 0.7237, 0.7275 ve 0.7274 litre/saat olarak belirlenmiştir. Biyodizelin düşük ısıl değeri ve yüksek yoğunluğu nedeni ile tüm yakıt karışımları, dizel yakıtına göre yakıt tüketimini artırmıştır. B15 yakıtı dizel yakıtına göre ortalama yakıt tüketimini %4.33 oranında yükseltmiştir. Ancak Al_2O_3 nanoparçacıklarının karışım oluşumu ve yanma üzerindeki olumlu etkileri sayesinde B15+NP yakıtı, B15 yakıtına göre yakıt tüketimini ortalama olarak %1.04 oranında düşürmüştür. Antioksidanlar serbest radikallerin oluşumunu engelleyerek yakıtın oksidasyonunu olumsuz etkiler [15]. Bu nedenle antioksidan katkı maddelerinin kullanımı ile ortalama yakıt tüketimi, B15+NP yakıtına kıyasla %1.05-1.57 oranında artmıştır. Fakat yakıt bileşimindeki Al_2O_3 nanoparçacıkları sayesinde B15+NP+BHT, B15+NP+TBHQ ve B15+NP+KEYyakıtları için yakıt tüketimindeki artış sınırlı olmuş ve bu yakıtlar B15 yakıtıyla hemen hemen aynı ortalama yakıt tüketimi değerine sahip olduğu belirlenmiştir (B15 ve bu yakıtların, yakıt tüketimi değerleri arasındaki farklar yakıt tüketimi için hesaplanan belirsizlik değerinden küçüktür).



Şekil 7. Yakıt tüketiminin motor gücüne göre değişimi

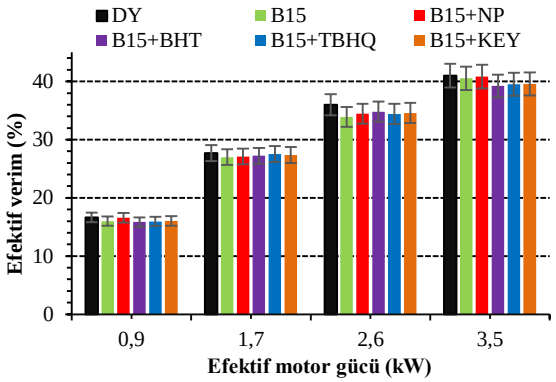
Test yakıtları için özgül yakıt tüketimi grafiği Şekil 8'de verilmiştir. Efektif motor gücündeki artış oranı yakıt tüketimindeki artış oranından fazla olduğu için özgül yakıt tüketimi, güç artıkça azalmış ve maksimum güçte minimum olmuştur. DY, B15, B15+NP, B15+NP+BHT, B15+NP+TBHQ ve B15+NP+KEY yakıtları için minimum özgül yakıt tüketimi sırası ile 0.2048, 0.2115, 0.2100, 0.2186, 0.2170 ve 0.2167 kg/kWh olarak belirlenmiştir. Ortalama özgül yakıt tüketimi değerlerine bakıldığında, B15 yakıtı dizel yakıtına göre özgül yakıt tüketimini %5.69 oranında yükseltmiştir. B15 yakıtına 100 ppm konsantrasyonunda Al_2O_3 nanoparçacıklarının eklenmesi durumunda (B15+NP) dizel yakıtına göre ortalama yakıt tüketimindeki artış %3,64 olmaktadır. Biyodizelin düşük ısıl

değer, yüksek viskozite ve yüksek kaynama noktası sıcaklığı gibi yakıt özellikleri özgül yakıt tüketiminin artmasında etkili olmuştur. Fakat Al_2O_3 nanoparçacıklarının hava ve yakıt moleküllerinin teması için çok geniş yüzey alanı sunması, yakıtın termal iletkenliğini artırarak buharlaşmasını hızlandırması ve sahip olduğu katalitik etki ile yanmayı iyileştirmesi sonucunda özgül yakıt tüketimini azaltmış olabilir [60]. Antioksidan katkı maddelerinin kullanımı ile DY ve B15+NP yakıtlarına göre ortalama özgül yakıt tüketimi artmış ancak B15 yakıtına kıyasla önemli bir değişim meydana gelmemiştir. B15+NP+BHT, B15+NP+TBHQ ve B15+NP+KEY yakıtları, B15+NP yakıtına göre özgül yakıt tüketimini ortalama olarak sırası ile %2.18, %1.85 ve %1.58 oranında artırmıştır.



Şekil 8. Özgül yakıt tüketiminin motor gücü ile değişimi

Şekil 9'da test yakıtları için efektif verimin motor gücüne göre değişimi verilmiştir. Motor gücü artıkça (sabit devirde motor gücü tork ile orantılı olarak artmaktadır) yakıt enerjisinin oransal olarak daha büyük bir kısmı efektif güce dönüştüğünden efektif verim, artan motor gücü ile artmıştır ve tüm yakıtlar için 3.5 kW güç çıkışında maksimum seviyeye ulaşmıştır. Motorun bu çalışma noktasında DY, B15, B15+NP, B15+NP+BHT, B15+NP+TBHQ ve B15+NP+KEY yakıtları için efektif verim değerleri sırası ile %41.01, %40.54, %40.82, %39.23, %39.50 ve %39.57 olarak hesaplanmıştır. Tüm yakıt karışımları dizel yakıtına göre efektif verimi düşürmüştür. Biyodizel yakıtının zayıf yakıt özellikleri nedeni ile B15 yakıtı ortalama efektif verim değerini dizel yakıtına göre %3.18 oranında düşürmüştür. B15 yakıtına Al_2O_3 nanoparçacıklarının eklenmesi ile (B15+NP) dizel yakıtına göre ortalama efektif verimdeki düşüş %1.93 oranında olurken, B15 yakıtı ile karşılaştırıldığında ise ortalama efektif verim %1.29 oranında artmıştır. Antioksidan katkı maddelerinin kullanımı ile dizel ve B15+NP yakıtına göre ortalama efektif verim azalmış fakat B15 yakıtı ile kıyaslandığında önemli bir farkın oluşmadığı belirlenmiştir. B15+NP+BHT, B15+NP+TBHQ ve B15+NP+KEY yakıtları, dizel yakıtına göre ortalama efektif verim değerini sırası ile %3.44, %3.24 ve %3.08 oranında azaltmıştır. B15+NP yakıtı ile karşılaştırıldığında ortalama efektif verimdeki düşüş aynı sırada %1.54, %1.34 ve %1.18 olmaktadır. Antioksidan katkı maddeleri yakıtın oksitlenmesi için önemli olan serbest radikallerin oluşumunu yavaşlatarak veya geciktirerek yanma verimini ve sonuçta efektif verimi düşürmüştür. Bu durum antioksidan katkı maddeleri içeren yakıtların kullanımında artan yakıt tüketimi, CO, HC ve is emisyonları ile doğrulanmıştır.

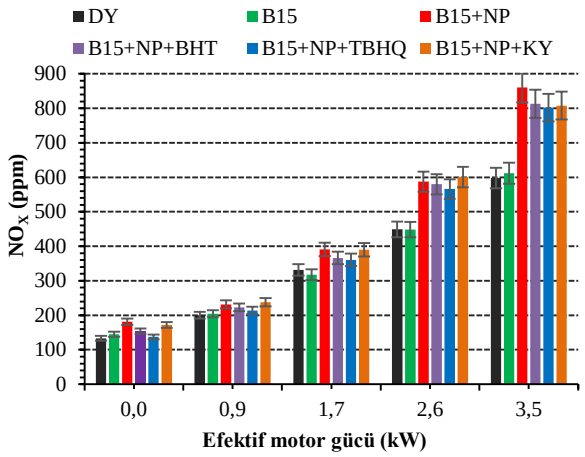


Şekil 9. Efektif verimin motor gücüne göre değişimi

3.3 *Egzoz emisyonları*

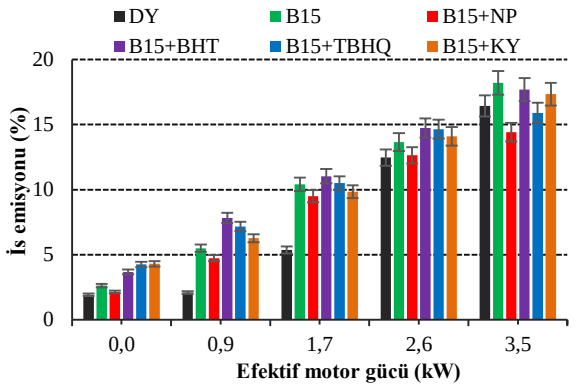
Şekil 10'da test yakıtları için NO_X emisyonunun efektif motor gücü ile değişimi verilmiştir. Tüm yakıtlar için efektif güç artıkça NO_X emisyonu artmış ve maksimum güçte en yüksek değerine ulaşmıştır. Motor gücünü artırmak için silindire püskürtülen yakıt miktarı artırılmaktadır. Bu durumda yanma sonu basınç ve sıcaklıkları da yükselmekte ve NO_X emisyonu oluşumu hızlanmaktadır. DY, B15, B15+NP, B15+NP+BHT, B15+NP+TBHQ ve B15+NP+KEY yakıtları için en yüksek NO_X emisyonu sırası ile 598 ppm, 611 ppm, 860 ppm, 813 ppm, 802 ppm ve 808 ppm olarak ölçülmüştür. Ortalama NO_X emisyonu değerlerine göre tüm yakıt karışımları dizel yakıtına kıyasla NO_X emisyonunu artırmıştır. B15 yakıtı DY'ye göre %0.87 oranında daha fazla NO_X emisyonu salınımına neden olmuştur. Ancak B15 yakıtına Al_2O_3 nanoparçacıklarının eklenmesi durumunda NO_X emisyonu önemli oranda artmıştır. Bu durum, Al_2O_3 nanoparçacıklarının hava-yakıt karışımının homojenliğini artırması ve yanma sırasındaki katalitik etkisine bağlanabilir. Nanoparçacıkların katalitik etkisi sıcaklıkla birlikte artmaktadır [29]. Bu sebeple maksimum efektif güç durumunda, maksimum silindir sıcaklığı ortamında Al_2O_3 nanoparçacıklarının yüksek katalitik etkisi NO_X emisyonunu diğer güç noktalarına göre daha fazla artırmıştır. Sonuçta B15+NP yakıtı, diğer tüm yakıtlara göre ortalama NO_X emisyonu değerini yükseltmiştir. B15+NP yakıtı ile NO_X emisyonu, DY ve B15 yakıtına kıyasla ortalama olarak sırası ile %31.51, %30.37 oranında artmıştır. Fakat antioksidan katkı maddeleri, Al_2O_3 nanoparçacıkları ile birlikte kullanılması durumunda NO_X emisyonu azalmıştır. Antioksidanların silindir içerisinde serbest radikallerin oluşumunu engelleyerek promt NO_X oluşum mekanizmasına göre NO_X emisyonunu azaltmıştır. B15+NP+BHT, B15+NP+TBHQ ve B15+NP+KEY yakıtları B15+NP yakıtına göre NO_X emisyonunu ortalama olarak sırası ile %5.17, %7.63 ve %1.92 oranında azaltmıştır. Ancak bu yakıtların ortalama NO_X emisyonu değeri referans yakıtlarınkinden hala daha yüksektir. Bunun nedeni Al_2O_3 nanoparçacıklarının kullanımında termal NO_X oluşum mekanizmasının özellikle yüksek ve tam güç durumunda

daha etkili olması ve antioksidan katkı maddelerinin promt NO_X oluşum mekanizmasına göre NO_X oluşumunu azaltma etkilerinin sınırlı kalmasına bağlanabilir.



Şekil 10. NO_X emisyonunun motor gücü ile değişimi

Şekil 11'de test yakıtları için is emisyonunun (egzoz gazı duman koyuluğu) efektif motor gücü ile değişimi verilmiştir. Tüm yakıtlar için is emisyonu artan motor gücü ile artmıştır. Dizel motorda güç, silindire püskürtülen yakıt miktarının değiştirilmesiyle kontrol edilir. Yüksek güç çıkışı için püskürtülen yakıt miktarının artırılması, hava-yakıt oranının azalarak is emisyonunun yükselmesine neden olur. Biyodizelin yüksek viskozite, düşük uçuculuk, yüksek kaynama noktası sıcaklığı ve doymamış yağ asidi metil esteri içeriği nedeni ile B15 yakıtı tüm güç noktalarında dizel yakıtından daha fazla is emisyonu oluşumuna yol açmıştır. Ortalama is emisyonu değerleri karşılaştırıldığında B15, DY'ye göre %31.67 oranında daha fazla is emisyonu oluşturmuştur. Fakat B15+NP yakıtı, B15 yakıtına göre is emisyonunu ortalama %13.85 oranında düşürmüştür. Bunun nedeni Al_2O_3 nanoparçacıklarının yüksek termal iletkenlik, geniş yüzey alanı ve katalitik etkisi ile daha verimli ve temiz yanma sağlamasına bağlanabilir. Ayrıca nanoparçacıklar yakıtın tutuşma sıcaklığını düşürerek oluşmuş olan is parçacıklarının yanma oranını artırır [61]. Antioksidan katkı maddelerinin kullanımı ile is emisyonu artmıştır. Antioksidanlar oluşan is parçacıklarının oksitlenmesinde etkili olan -OH ve -COOH gibi aktif radikallerin [62] oluşumunu yavaşlatması sonucu is emisyonunun arttığı düşünülmektedir. B15+NP+BHT, B15+NP+TBHQ ve B15+NP+KEY yakıtları B15+NP yakıtına kıyasla is emisyonunu ortalama olarak sırası ile %26.53, %20.75 ve %19.37 oranında yükseltmiştir. Bu yakıtlar B15 yakıtı ile karşılaştırıldığında is emisyonundaki ortalama artış aynı sırada %9.01, %4.03 ve %2.84 olmaktadır. Antioksidan kullanımı ile is emisyonlarında artış Prabu ve Anand [63] tarafından yapılan çalışmada da tespit edilmiştir. Araştırmacılar üç farklı sentetik antioksidan katkı maddesinin 2000 ppm oranında kullanılmasıyla is emisyonlarının %50.50'ye varan oranda artmış olduğunu bildirmiştir.

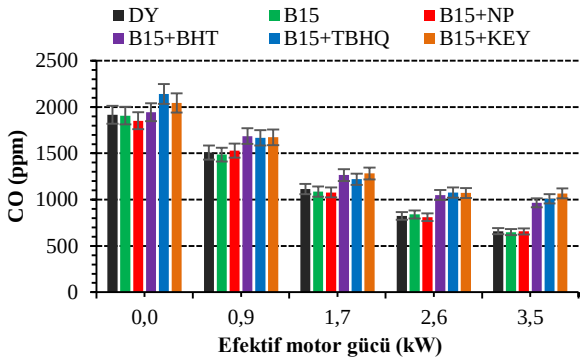


Şekil 11. İs emisyonunun motor gücü ile değişimi

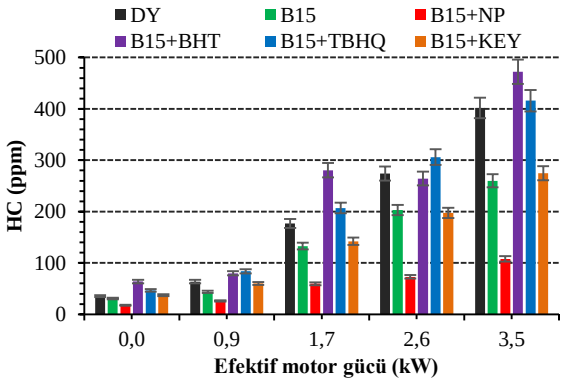
Test yakıtları için CO emisyonunun motor gücü ile değişimi Şekil 12'de verilmiştir. Tüm yakıtlar için CO emisyonunun en yüksek değeri motorun rölanti çalışması sırasında (0.0 kW efektif güç durumu) ölçülmüş ve CO emisyonu artan motor gücü ile azalarak maksimum güçte minimum seviyeye düşmüştür. Sıfır veya düşük güç durumlarında silindir gaz basıncı ve sıcaklığının düşük olması, ayrıca gaz hareketlerinin yavaşlaması CO'nun oksidasyonunu olumsuz etkilemektedir. DY, B15, B15+NP, B15+NP+BHT, B15+NP+TBHQ ve B15+NP+KEY yakıtları için minimum CO değeri sırası ile 659 ppm, 648 ppm, 657 ppm, 966 ppm, 1008 ppm ve 1067 ppm olarak ölçülmüştür. Ortalama CO emisyonu değerlerine bakıldığında B15 ve B15+NP yakıtı DY'ye göre sırası ile %0.88 ve %1.61 oranında daha az CO emisyonu salınımına sahiptir. Antioksidan katkı maddeleri içeren yakıtların kullanımı ile tüm test noktalarında CO emisyonu diğer yakıtlara kıyasla önemli oranda artmıştır. B15+NP+BHT, B15+NP+TBHQ ve B15+NP+KEY yakıtları, B15+NP yakıtına kıyasla CO emisyonunu ortalama olarak sırası ile %16.66, %20.06 ve %20.49 oranında yükseltmiştir. Bu yakıtlar B15 yakıtı ile karşılaştırıldığında CO emisyonundaki ortalama artış aynı sırada %15.81, %19.18 ve %19.61 olmaktadır. CO emisyonundaki artışın nedeni antioksidan katkı maddelerinin, yanma reaksiyonlarında oksitleyici görevi gören hidroksil radikali gibi reaktif oksijen türlerinin oluşumunu engellemesi olabilir.

Şekil 13'te test yakıtları için HC emisyonunun motor gücü ile değişimi verilmiştir. Tüm yakıtlar için en düşük HC emisyonu 0.0 kW efektif güç durumunda ölçülmüş ve motor gücü artırıldıkça, hava-yakıt oranının azalmasına bağlı olarak HC emisyonu artmıştır. HC emisyonu 3.5 kW efektif güç durumunda maksimum seviyeye ulaşmıştır. Biyodizelin oksijen içeriği sayesinde B15 yakıtı dizel yakıtına kıyasla tüm güç noktalarında HC emisyonunu düşürmüştür. B15 yakıtına 100 ppm konsantrasyonunda Al_2O_3 nanoparçacıklarının eklenmesi durumunda HC emisyonları daha da azalmış ve B15+NP yakıtı ile tüm güç noktalarında en düşük HC emisyon değerleri ölçülmüştür. Bu sonuç nanoparçacıkların karışım oluşumu ve yanma üzerindeki olumlu etkilerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ortalama HC emisyonu değerlerine bakıldığında B15 ve B15+NP yakıtı DY'ye göre sırası ile %29.60 ve %70.21 oranında daha az HC emisyonu salınımına sahiptir. B15+NP

ile HC emisyonundaki düşüş oranı CO emisyonundaki azalma oranından çok daha fazla olması dikkat çekicidir. Bu durum HC ve CO'nun oksitlenme sıcaklığı ile ilişkilendirilebilir. HC'nin oksidasyonu 600 ℃ sıcaklıkta başlarken CO'nun oksidasyonu daha yüksek sıcaklıklarda başlar [19]. Bu durumda Al_2O_3 nanoparçacıklarının katalitik etkisi ile daha fazla HC molekülü yanmış olabilir. Antioksidan katkı maddelerinin yakıtın oksidasyonunu yavaşlatma etkileri nedeni ile tüm test noktalarında HC emisyonunun artmasına neden olmuştur. B15+NP+BHT, B15+NP+TBHQ ve B15+NP+KEY yakıtları, B15 yakıtına kıyasla HC emisyonunu ortalama olarak sırası ile %73.20, %58.05 ve %6.12 oranında yükseltmiştir. DY ile karşılaştırıldığında B15+NP+BHT ve B15+NP+TBHQ ortalama HC emisyon değerini sırası ile %21.94 ve %11.27 oranında yükseltirken, B15+NP+KEY yakıtı %25.29 oranında düşürmüştür.



Şekil 12. CO emisyonunun motor gücü ile değişimi



Şekil 13. HC emisyonunun motor gücü ile değişimi

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, Al_2O_3 nanoparçacıkları ile sentetik veya doğal antioksidan katkı maddelerinin yakıta birlikte eklenmesinin motorun yanma, performans ve egzoz emisyonlarına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Tüm yakıtlar benzer yanma karakteristiklerine sahip olduğu belirlenmiştir. Al_2O_3 nanoparçacıklarını ve antioksidan katkı maddelerini içeren yakıtlar maksimum net ısı yayılım oranı ile maksimum basınç artış oranını hafif şekilde yükseltmiştir. Fakat hiçbir test yakıtı dizel vuruntu sınırını aşmadığı belirlenmiştir.

İncelenen antioksidan katkı maddelerinin tamamı motor performansını kötüleştirmiştir. Ancak antioksidan katkı maddeleri ile birlikte Al_2O_3 nanoparçacıklarının kullanılması halinde motor performansı iyileşerek B15 yakıtına çok yakın motor performans değerleri elde edilmiştir.

Al_2O_3 nanoparçacıklarının katalitik etkisinin yüksek sıcaklıklarda artması nedeni ile yüksek güç ve maksimum güç koşullarında termal NO_X oluşumu hızlanmıştır. Aynı koşullarda antioksidan katkı maddelerinin promt NO_X oluşum mekanizmasını zayıflatma etkileri sınırlı kalmıştır. Bu nedenle sadece Al_2O_3 nanoparçacıklarını veya her iki yakıt katkı maddesini içeren yakıtlar, katkısız yakıtlara göre daha fazla NOx emisyonu üretmiştir.

NO_X emisyonunu azaltmada TBHQ antioksidanının diğer antioksidanlara göre daha etkili olduğu belirlenmiştir. Doğal antioksidan olarak seçilen karanfil esansiyel yağının NO_X emisyonunu azaltma etkisi sentetik antioksidanlara göre zayıf olduğu tespit edilmiştir.

Al_2O_3 nanoparçacıklarının tek başına yakıt katkısı olarak kullanılması durumunda CO, HC ve is emisyonu B15 yakıtına göre azalmıştır. Fakat antioksidan katkı maddelerinin oksidasyon reaksiyonlarını inhibe etkisi nedeni ile her iki yakıt katkısını içeren yakıtlar referans yakıtlara göre daha fazla CO, HC ve is emisyonu oluşturmuştur.

Bu çalışmada, yaktın oksidasyon direncini artırmak için veya NO_X emisyonunu azaltmak için yakıta eklenen antioksidan katkı maddelerinin motor performansını kötüleştirme ve CO, HC ve is emisyonlarını artırma etkileri, yüksek katalitik etkiye sahip nanoparçacıkların kullanımı ile hafifletilebileceği görülmüştür.

Yakıt bileşimindeki metal parçacıkların varlığı yakıtın oksidasyon direncini zayıflatabilir. Bu nedenle gelecek çalışmalarda nanoparçacık katkılı yakıtların oksidatif stabilitesini belirlemek için Rancimat gibi standart metodlar uygulanmalıdır. Ayrıca optimum motor performansı ve egzoz emisyonlarını verecek nanoparçacık ve antioksidan katkı maddesi türü ile konsantrasyonu belirlenebilir. Daha yüksek antioksidan aktivitesine sahip doğal antioksidan katkı maddelerinin kullanımı araştırılabilir. Bu noktada yüksek fenolik içeriğe sahip meyve ve sebze atıkları değerlendirilebilir veya doğal esansiyel yağların fenol içeriğini artırmaya yönelik genetik çalışmalar yürütülebilir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

[1] N. Abas, A. Kalair and N. Khan, Review of fossil fuels and future energy technologies. Futures, 69, 31-49, 2015.https://doi.org/10.1016/j.futures.2015.03.003.

[2] F. Yaşar, Comparision of fuel properties of biodiesel fuels produced from different oils to determine the most suitable feedstock type. Fuel, 264, 116817, 2020. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116817.

[3] A. Demirbas, Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. Energy conversion and management, 49, 2106-16, 2008. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.02.020.

[4] A. Çakmak, Improvement of exhaust emissions in a diesel engine with the addition of an oxygenated additive to diesel-biodiesel blends. Energetika, 68, 79–90, 2022. https://doi.org/10.6001/energetika.v68i1.4859.
[5] R. Behçet, H. Oktay, A. Çakmak and H. Aydin, Comparison of exhaust emissions of biodiesel-diesel fuel blends produced from animal fats. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 46, 157–65, 2015. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.015.
[6] V. K. Mishra and R. Goswami, A review of production, properties and advantages of biodiesel. Biofuels, 9, 273–289, 2018. https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1336350.
[7] M. Gülüm, An investigation of effects of diesel fuel-vegetable oil-diethylene glycol dimethyl ether fuel blends on performance, combustion and emission characteristics of a diesel engine. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12:1, 2023.
[8] L. Leng, W. Li, H. Li, S. Jiang and W. Zhou, Cold Flow Properties of Biodiesel and the Improvement Methods: A Review. Energy & Fuels, 34, 10364–83, 2020. doi:10.1021/acs.energyfuels.0c01912.
[9] A. Syafiuddin, J. H. Chong, A. Yuniarto and T. Hadibarata, The current scenario and challenges of biodiesel production in Asian countries: A review. Bioresource Technology Reports, 12, 100608, 2020. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100608.
[10] C. V. Jemima Romola, M. Meganaharshini, S. P. Rigby, I. Ganesh Moorth, R. Shyam Kumar and S. Karthikumar, A comprehensive review of the selection of natural and synthetic antioxidants to enhance the oxidative stability of biodiesel. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 145, 111109, 2021. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111109.
[11] M. A. Fazal, M. R. Jakeria, A. Haseeb and S. Rubaiee, Effect of antioxidants on the stability and corrosiveness of palm biodiesel upon exposure of different metals. Energy, 135, 220–226, 2017. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.128.
[12] M. A. Fazal, A. Haseeb and H. H. Masjuki, Comparative corrosive characteristics of petroleum diesel and palm biodiesel for automotive materials. Fuel Processing Technology, 91, 1308–15, 2010. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.04.016.
[13] R. K. Saluja, V. Kumar and R. Sham, Stability of biodiesel – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 62, 866–81, 2016. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.001.
[14] M. Sui and F. Li, Effect of TEPA on oxidation stability and metal ion content of biodiesel. Renewable Energy, 143, 352–358, 2019. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.128.
[15] G. Uğuz, A. Çakmak, C. da. Bento and N. Karakullukçu, Experimental investigation of fuel properties and engine operation with natural and synthetic antioxidants added to biodiesel. Biofuels, 14, 405–420, 2023. https://doi:10.1080/17597269.2022.2156049.
[16] E. A. Decker, J. Alamed and I. A. Castro, Interaction between polar components and the degree of unsaturation of fatty acids on the oxidative stability of emulsions. Journal of the American Oil Chemists' Society, 87, 771–780, 2010. https://doi.org/10.1007/s11746-010-1556-3.
[17] L. C. de Menezes, E. R. de Sousa, G. S. da Silva, A. L. B. Marques, H. D. C. Viegas and M. J. C. Dos Santos, Investigations on Storage and Oxidative Stability of Biodiesel from Different Feedstocks Using the Rancimat Method, Infrared Spectroscopy, and Chemometry. ACS Omega, 7, 30746–55 2022. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01348.
[18] F. Zhang, J. Li, S. Yang and Y. Bi, Inhibitory effect of antioxidants on biodiesel crystallization: Revealing the role of antioxidants. Fuel, 297, 120782, 2021. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120782.
[19] J. B. Heywood, Internal combustion engine fundamentals. McGraw-Hill, New York, 1988.
[20] C. P. Fenimore, The ratio NO_2 NO in fuel-lean flames. Combustion and Flame, 25, 85–90, 1975. https://doi.org/10.1016/0010-2180(75)90071-1.
[21] E. Ileri and G. Koçar, Experimental investigation of the effect of antioxidant additives on NOx emissions of a diesel engine using biodiesel. Fuel, 125, 44–49, 2014. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.02.007.
[22] H. Hosseinzadeh-Bandbafha, D. Kumar, B. Singh, H. Shahbeig, S. S. Lam and M. Aghbashlo, Biodiesel antioxidants and their impact on the behavior of diesel engines: A comprehensive review. Fuel Processing Technology, 232, 107264, 2022. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107264.
[23] M. G. Bidir, N. K. Millerjothi, M. S. Adaramola and F. Y. Hagos, The role of nanoparticles on biofuel production and as an additive in ternary blend fuelled diesel engine: A review. Energy Reports, 7, 3614–27, 2021. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.05.084.
[24] I. Sezer, Effect of nano materials additives on fuel properties and combustion characteristics. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34, 115–35 2019. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416469.
[25] A. Tuan Hoang, M. Xuan Le, S. Nižetić, Z. Huang, Ü. Ağbulut and I. Veza, Understanding behaviors of compression ignition engine running on metal nanoparticle additives-included fuels: A control comparison between biodiesel and diesel fuel. Fuel, 326, 124981, 2022;. doi:https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124981.
[26] A. Yakın, R. Behcet, H. Solmaz and S. Halis, Testing sodium borohydride as a fuel additive in internal combustion gasoline engine. Energy, 254, 124300. 2022. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124300.
[27] V. Dhana Raju, P. S. Kishore, K. Nanthagopal, and B.Ashok, An experimental study on the effect of nanoparticles with novel tamarind seed methyl ester for diesel engine applications. Energy conversion and management, 164, 655–66, 2018.

https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.032.
[28] A. Gaur, G. Dwivedi, P. Baredar and S. Jain, Influence of blending additives in biodiesel on physiochemical properties, engine performance, and emission characteristics. Fuel, 321, 124072 2022. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124072.
[29] B. Ashok, K. Nanthagopal, R. Subbarao, A. Johny, A. Mohan and A. Tamilarasu, Experimental studies on the effect of metal oxide and antioxidant additives with Calophyllum Inophyllum Methyl ester in compression ignition engine. Journal of Cleaner Production, 166, 474–84, 2017. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.050.
[30] B. Ashok, K. Nanthagopal, A. Mohan, A. Johny and A. Tamilarasu, Comparative analysis on the effect of zinc oxide and ethanox as additives with biodiesel in CI engine. Energy, 140, 352–64, 2017. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.09.021.
[31] S. Krishnakumar, T. M. Y. Khan, C. R. Rajashekhar, M. E.. Soudagar, A. Afzal and A. Elfasakhany, Influence of graphene nano particles and antioxidants with waste cooking oil biodiesel and diesel blends on engine performance and emissions. Energies, 14, 4306, 2021. https://doi.org/10.3390/en14144306.
[32] A. Prabu, I. J. I. Premkumar and A. Pradeep, An investigation on the performance, combustion and emission characteristics of CI engine on the addition of antioxidants, oxygenates and nanoparticles as additives in Jatropha biodiesel. International Journal of Ambient Energy, 41, 121–128. 2020. https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1443281.
[33] S. N. K. Reddy and M. M Wani, An investigation on the performance and emission studies on diesel engine by addition of nanoparticles and antioxidants as additives in biodiesel blends. International Review of Applied Sciences and Engineering, 12, 111–118, 2021. https://doi.org/10.1556/1848.2020.00157.
[34] E. B. Shevchenko, A. M. Danilov and V. N. Kameneva, Oxidation resistance of biodiesel. Russian Journal of Applied Chemistry, 90, 1015–1018 2017. https://doi.org/10.1134/S1070427217060246.
[35] H. Tang, A. Wang, S. O. Salley and K. Y. S. Ng, The Effect of Natural and Synthetic Antioxidants on the Oxidative Stability of Biodiesel. Journal of the American Oil Chemists' Society, 85, 373–382 2008. https://doi.org/10.1007/s11746-008-1208-z.
[36] H. A. Deveci, N. Gökhan, M. Ali Kırpık, A. Harmankay and Y. Yıldız, Fenolik bileşik içeren bitkisel antioksidanlar. Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 9, 26–32, 2016.
[37] K. R. Spacino, E. T. Da Silva, K. G. Angilelli, I. Moreira, O. F. Galão and D. Borsato, Relative protection factor optimisation of natural antioxidants in biodiesel B100. Industrial Crops and Products, 80, 109–14. , 2016. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.11.034.
[38] M. Rocío Teruel, M. D. Garrido, M. C. Espinosa and M. B. Linares, Effect of different format-solvent rosemary extracts (Rosmarinus officinalis) on frozen chicken nuggets quality. Food chemistry, 172, 40–6, 2015. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.018.
[39] C. H. Lau, S. Gan, H. L. N. Lau, L. Y. Lee, S. Thangalazhy-Gopakumar and H. K. Ng, Insights into the effectiveness of synthetic and natural additives in improving biodiesel oxidation stability. Sustain Energy Technology Assessments, 52, 102296. 2022. https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102296.
[40] G. Uğuz, Antioxidant effect of clove oil on biodiesel produced from waste cooking oil. Biomass Conversion Biorefinery, 13(1), 367-373, 2023. https://doi.org/10.1007/s13399-021-01679-4.
[41] G. Uguz, Inhibitory effect of thyme oil as an antioxidant for waste cooking oil biodiesel crystallization. Energy & Environment, 34(1), 176-192, 2023. https://doi.org/10.1177/0958305X211061346.
[42] L. Silva de Sousa, C. Verônica Rodarte de Moura and E. Miranda de Moura, Action of natural antioxidants on the oxidative stability of soy biodiesel during storage. Fuel, 288, 119632, 2021. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119632.
[43] N. Jeyakumar, Z. Huang, D. Balasubramanian, A. T. Le, X. P. Nguyen and P. L. Pandian, Experimental evaluation over the effects of natural antioxidants on oxidation stability of binary biodiesel blend. International Journal of Energy Research, 46, 20437–61, 2022. https://doi.org/10.1002/er.7956.
[44] G. Karunanithi and A. M. S. Varadappan, Exploring the effectiveness of novel Coffea Arabica leaf pigment as a natural antioxidant additive for date seed biodiesel. Fuel, 324, 124561, 2022. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124561.
[45] K. K. Pandey and S. Murugan, Effect of Pongamia pinnata leaves extracted natural antioxidant doped in biodiesel--diesel blend run low heat rejection engine. International Journal of Environmental Science and Technology, 20, 13159–13178, 2023. https://doi.org/10.1007/s13762-023-04777-0.
[46] S. N. K. Reddy and M. M. Wani, A comprehensive review on effects of nanoparticles-antioxidant additives-biodiesel blends on performance and emissions of diesel engine. Applied Science and Engineering Progress, 13(4), 285–298, 2020.
[47] M. T. Tunç and İ. Koca, Ohmic heating assisted hydrodistillation of clove essential oil. Industrial Crops and Products, 141, 111763, 2019. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111763.
[48] Official Journal of the European Union. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast). 2018.
[49] F. Sahin and L. Namli, Thermal performances and stabilities of nanofluids in an electrical oil heater. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 145, 3195–206, 2021. https://doi.org/10.1007/s10973-020-09826-1.
[50] NanoAmor, Aluminum Oxide Nanopowder, https://www.nanoamor.com/inc/sdetail/23066. Erişim

tarihi: 05.01.2023.

[51] M. Nour, A. I. EL-Seesy, A. K. Abdel-Rahman and M. Bady, Influence of adding aluminum oxide nanoparticles to diesterol blends on the combustion and exhaust emission characteristics of a diesel engine. Experimental Thermal and Fluid Science, 98, 634–44, 2018. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.07.009.

[52] Sigma-Aldrich. Specification Sheet,tert-Butylhydroquinone n.d. https://www.sigmaaldrich.com/TR/en/specification-sheet/SIAL/07293. Accessed 10 January 2023.

[53] PubChem, tert-Butylhydroquinone $C_{10}H_{14}O_2$, https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/tert-Butylhydroquinone, Accessed 01 April 2023.

[54] NIST Chemistry WebBook/Butylated Hydroxytoluene, https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C128370&Mask=6FF. Accessed 01 April 2023.

[55] ChemicalBook. Clove oil 2022. https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB8286611.htm, Accessed 01 April 2023.

[56] J.P. Holman, Experimental methods for engineers. 7th editio. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, New York, 2001.

[57] B. S. Chauhan, N. Kumar and H. M. Cho, A study on the performance and emission of a diesel engine fueled with Jatropha biodiesel oil and its blends. Energy, 37, 616–622 2012. https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.10.043.

[58] E. Rajasekar and S. Selvi, Review of combustion characteristics of CI engines fueled with biodiesel. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 35, 390–399, 2014. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.006.

[59] S. M. Mousavi, R. K. Saray, K. Bahlouli, K. Poorghasemi, A. Maghbouli and A. Sadeghlu, Effects of pilot diesel injection strategies on combustion and emission characteristics of dual-fuel engines at part load conditions. Fuel, 258, 116153. 2019. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116153.

[60] S. Gumus, H. Ozcan, M. Ozbey and B. Topaloglu, Aluminum oxide and copper oxide nanodiesel fuel properties and usage in a compression ignition engine. Fuel, 163, 80–87, 2016. https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2015.09.048.

[61] V. Saxena, N. Kumar and V. K. Saxena, A comprehensive review on combustion and stability aspects of metal nanoparticles and its additive effect on diesel and biodiesel fuelled C.I. engine. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 70, 563–588, 2017. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.067.

[62] A. I. EL-Seesy, M. Nour, H. Hassan, A. Elfasakhany, Z. He and M. A. Mujtaba, Diesel-oxygenated fuels ternary blends with nano additives in compression ignition engine: A step towards cleaner combustion and green environment. Case Studies in Thermal Engineering, 25, 100911, 2021. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.100911.

[63] A. Prabu and R. B. Anand, Inhibition of NO emission by adding antioxidant mixture in Jatropha biodiesel on the performance and emission characteristics of a CI engine. Frontiers in Energy, 9, 238-245, 2015. https://doi.org/10.1007/s11708-015-0356-8.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 236-247

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Maden galerilerinde farklı kaya kütle sınıflama sistemleri ile durabilite analizi uygulaması: Yahyalı/Kayseri Pb-Zn ocağı örneği

Application of durability analysis with different rock mass classification systems in mine galleries: A case study of Yahyalı/Kayseri Pb-Zn quarry

Ahmet Teymen[1,*]

[1] *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye*

Öz

Bu çalışma Yahyalı/Kayseri bölgesinde kurulu bulunan bir yer altı Kurşun-Çinko (*Pb-Zn*) ocağının ana nakliyat galerisinde gerçekleştirilen Kaya Kütlesi Karakterizasyonu ile ilgili saha ve laboratuvar çalışmalarını kapsamaktadır. Kaya malzemesi ve kaya kütlesi üzerinde yapılan detaylı çalışmalarla Kaya Kütle Puanlaması (RMR), Kaya Kütle Kalitesi (Q) ve Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) sistemleri ilgili tüm parametreler hesaplanarak duraylılık analizi yapılmıştır. Sonuçlar kireçtaşı formasyonu içerisinde açılan ana galerinin mevcut kesiti dikkate alındığında gerek duyulan bölümlerde lokal tahkimat uygulaması yapılması koşuluyla genel olarak tahkimatsız uzun yıllar ayakta kalabileceğini göstermiştir. Ancak madenlerin dinamik yapılar olduğu ve üretimle birlikte sürekli değişim geçirdikleri unutulmamalıdır. Kaya kütle koşulları, denetimsiz patlatma gibi mühendislik hataları ile değişebilecektir. Kullanılan kaya kütle sınıflama sistemleri ile her ne kadar bu sonuca varılmış olsa da, ani kaya kütle kalitesi değişimlerinin olabileceği lokasyonlarda (özellikle cevher zonları, fay zonu, erime boşluğu) ve tehlike arz eden yerlerde tahkimat uygulamasına mutlaka devam edilmelidir ve sürekli olarak denetlenmelidir.

Anahtar kelimeler: Kaya kütle sınıflaması, RQD, RMR, Q, GSI

Abstract

This study covers field and laboratory studies on Rock Mass Characterization carried out in the main gallery of an underground Lead-Zinc (*Pb-Zn*) quarry located in the Yahyalı/Kayseri region. With detailed studies on rock material and rock mass, stability analysis was carried out by calculating all relevant parameters of Rock Mass Rating (RMR), Rock Mass Quality (Q) and, Geological Strength Index (GSI) systems. The results have shown that, considering the existing section of the main gallery opened within the limestone formation, it can generally survive for many years without support, provided that local support is applied in the necessary sections. However, it should not be forgotten that mines are dynamic structures and constantly change with operation. Rock mass conditions may change with engineering errors such as uncontrolled blasting. Although this conclusion has been reached with the rock mass classification systems used, the application of support must be continued and constantly inspected in locations where sudden rock mass quality changes may occur (especially ore zones, fault zones, melting gaps) and in places that pose danger.

Keywords: Rock mass classification, RQD, RMR, Q, GSI

1 Giriş

Yeryüzünde çeşitli amaçlara yönelik olarak tasarlanan büyük mühendislik yapılarının yanı sıra, giderek artan alt yapı, ulaşım, yerleşim ve enerji gibi gereksinimlerin karşılanabilmesi için yeraltı yapıları da hızla çoğalmakta ve boyut olarak büyümektedir [1]. Dünya genelinde madencilik başta olmak üzere, ulaştırma, hidroelektrik santral gibi çeşitli mühendislik projelerinde farklı amaçlarla yeraltı açıklığı kazıları yapılmaktadır. Ulaştırma amaçlı yapılan yeraltı kazılarının önemli bir bölümü metro, karayolu ve demiryolu tünelleri için yapılmakta iken madencilik alanında yapılan yer altı kazıları nakliyat, havalandırma için açılan desandre ve galerilerdedir. Tünel yâda galeri açma çalışmaları temel olarak kazı ve tahkimat aşamalarından oluşmaktadır. Proje aşamasında iken en uygun kazı ve tahkimat sisteminin tasarımının yapılması kritik öneme sahiptir. Bu tür mühendislik projelerinin uygulanacağı kaya kütlelerinin özelliklerinin en doğru şekilde tanımlanması kazısı sırasında oluşabilecek olası duraysızlık problemlerinin önüne geçilmesini sağlayacaktır. Dolayısı ile proje maliyetleri olumlu yönde etkilenecektir.

Yeraltı kazılarında temel amaç kazı sonrası ortaya çıkan deformasyonları mümkün olduğunca engellemek ya da kontrol altında tutabilmektir. Kendini tutabilen kaya kütlelerinde tahkimat ihtiyacı olmamasına rağmen kendini tutamayan kaya kütlelerinde deformasyonu engellemek için tahkimat sistemleri kullanılmaktadır [2]. Zayıf zeminlerde açılan tünel ya da galerilerde yaşanan en büyük sorun uzun dönemde oluşacak olan deformasyonlardır [3]. Bu tür yapılar kazı ve tahkimatın ardından ilk etapta stabil olsa dahi uzun dönemde sıkışmaya bağlı olarak tahkimat sistemlerinde yenilmeler meydana gelmektedir [4]. Bu temel problem destek sistemleri belirlenirken rijit bir tahkimat sisteminin ya

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ateymen@ohu.edu.tr (A. Teymen)
Geliş / Recieved: 16.10.2023 Kabul / Accepted: 25.11.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngmuh.1376707

da deformasyonlara müsaade eden esnek bir destek sisteminin seçilmesini önemli hale getirmektedir [5].

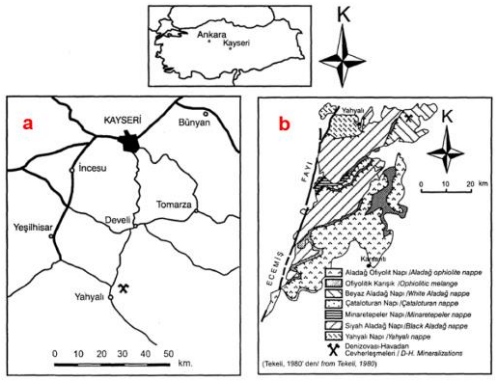
Kaya kütle sınıflama sistemleri özellikle tünel projelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Terzaghi'nin [6] öncülük ettiği bu sistemler günümüze kadar daha da geliştirilmiş ve birçok projede başarıyla uygulanmıştır. Bahsi geçen bu kaya kütlesi sınıflama sistemlerinin en çok kabul gören ve uygulama alanı bulanları; RMR, Q, GSI ve Kaya Kütle İndeksi (RMI) gibi sınıflama sistemleridir. Sınıflama sistemlerinde kaya kütlesinin özelliklerine bağlı olarak tahkimat tasarım önerileri de sunulmaktadır.

Bu çalışmada, Kayseri İli, Yahyalı İlçesi, Göynük mevkiinde kurulu bulunan bir Yeraltı *Pb-Zn* madeninde kireçtaşı formasyonu içerisinde açılmış galeride inceleme ve ölçümler yapılarak tahkimatsız olarak geçilen bölümlerin sağlamlığı ve stabilitesinin incelenmesi, elde edilen bulgular ve hesaplamalara göre bahsi geçen bu bölümlerin tahkimatsız (desteksiz) olarak geçilmesinde sakınca olup olmadığının belirlenmesi amaçlanmıştır. Galeri hattı boyunca kaya kütle sınıflandırma sistemleri için uygun bulunan yüzleklere RMR, Q ve GSI sınıflama sistemleri uygulanmıştır.

2 Coğrafi konum, jeoloji ve depremsellik

2.1 Coğrafi konum

Bu çalışma kapsamında incelenen yeraltı *Pb-Zn* ocağı, Kayseri İli, Yahyalı İlçesi'nin yaklaşık 8 km kuzeydoğusunda bulunan Göynük mevkiinde yer almaktadır (Şekil 1a). Çalışma alanı topografik özellikleri itibari ile ulaşım ve madencilik faaliyetleri bakımından oldukça uygun durumdadır. Alanda dik eğimler, aşırı yükseklik değişiklikleri gibi unsurlar bulunmamaktadır.



Şekil 1. a) Çalışma alanına ait coğrafi konumu gösteren yerbulduru haritası **b)** Aladağlar'ın yapısal haritası

2.2 Jeoloji

Yahyalı yöresindeki madencilik faaliyetleri, Aladağlar'ın en kuzey-kuzeydoğu kesimindeki Zamantı *Pb-Zn* provensinde yer alır ve çok eski tarihlerde başlamıştır. Yörede, aktif madencilik faaliyetlerinin devam ettiği ya da bir dönem sürdürüldüğü tüm işletmelerde *"Roma"* olarak bilinen ve kılavuz olarak yararlanılan eski galeriler mevcuttur. Zamantı bölgesi Orta Toros Kuşağında yer alan karbonatlı kayaçlarının *K-KD* kesimini oluşturur. Çok geniş bir zaman aralığını temsil eden kayaç grupları ve bünyesinde barındırdığı çok sayıdaki *Pb-Zn* cevherleşmesi ile araştırmacıların uzun zamandır ilgilendiği bir çalışma bölgesidir.

2.2.1 Bölgesel jeoloji

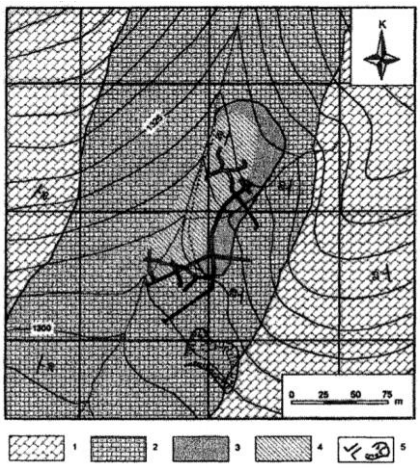
Zamantı provensi ve yakın çevresinde ilk detaylı çalışmalarda yöredeki karbonatlı kayaçlardan Paleozoyik yaşlı olanlar *"Siyah Aladağ"*, Mesozoyik yaşlı olanlar *"Beyaz Aladağ"* olarak tanımlanmıştır [7]. Yahyalı ilçesinin doğusunda yapılan bir çalışmada Kambriyen'den Lütesiyen sonuna kadar yörede genellikle sığ, sıcak, litoral-sublitoral ortam koşullarının hâkim olduğu ve bölgenin duraysız bir şelf özelliği gösterdiği belirtilmiştir [8]. Yahyalı Napı, Aladağlar yöresi ile ilgili çalışmaların büyük çoğunluğunda kabul gören tektonostratigrafik sınıflamadaki [9] Nap dizinlerinin en altında yer alır ve düşük dereceli metamorfizma izleri taşıyan Üst Devoniyen Permiyen yaş aralığında birimlerden oluşur. Siyah Aladağ Napı karbonatlı ve kırıntılı kayaçlar içermektedir (Üst Devoniyen-Orta Triyas yaş aralığında). Aladağlar'da sığ kıta içi basen Üst Paleozoyik boyunca, resif ve resif gerisi ortam gelişimi ise Triyas-Alt Kretase boyunca oluşmuştur [10]. Şekil 1b'de, geniş bir yayılımlı Siyah Aladağ Nap dizininin kuzey kesiminde yer alan Göynük *Pb-Zn* cevherleşmesi görülmektedir. Cevherleşme yakınlarında bu Napa ait kireçtaşları, kireçtaşları ile uyumlu olarak yer yer silttaşı, marn ve çamurtaşı seviyeleri içeren kireçtaşları ile bu litolojileri uyumsuz şekilde örten genç volkanitler gözlenmektedir.

2.2.2 Maden jeolojisi

Göynük bölgesindeki *Pb-Zn* cevherleşmesi yakınlarında karbonatlı, yer yer de kırıntılı kayaçlar ve tüfler yer alır (Şekil 2). Siyah Aladağ olarak tanımlanan kayaç grubu, kısmen siyaha yakın gri-koyu gri renkli, 10-80 cm arasında değişen tabaka kalınlığına sahip ve taban seviyelerinde çört ara katkıları olan ve kısmen dolomitik özellikler taşıyan fosilli kireçtaşlarıdır. Fosil bulguları bu kireçtaşlarının Üst Permiyen yaşlı olduğunu göstermiştir ve üzerinde yer alan ve kahverengi, kirli sarı-açık tonları taşıyan marn, silttaşı ve çamurtaşı seviyeleri içeren kireçtaşları ise Alt-Orta Triyas yaşlıdır. Erciyes volkanizmasının son ürünleri, bu birimlerin üzerinde yer almaktadır. Cevher kütlesi düzenli bir geometrik şekle sahip değildir ve Alt-Orta Triyas yaşlı litolojiler ile Üst Permiyen yaşlı kireçtaşlarının dokunağında yer alır. Bu özellik, ana galeri girişinin güneydoğu kesiminde cevher üretim faaliyetinin sürdürüldüğü çeşitli katlarda da izlenebilmektedir. Cevherleşmede yer yer küçük ölçekli faylanmalar gözlenmektedir ve bunlar cevherleşme sonrası yöredeki naplanma olayları ile ilişkili tektonik ürünlerdir. Cevher-yan kayaç dokunaklarında herhangi bir alterasyon izi yoktur, yani cevherleşmede tektonizma kontrolü söz konusu değildir.

Yan kayaçlarla uyumlu ve laminalı bir içyapıya sahip olan cevherleşme çoğunlukla karbonatlı minerallerden oluşmaktadır. Ayrıca yan kayaç ile uyumlu olacak şekilde kalınlığı birkaç mm'den birkaç cm'ye kadar değişen, zaman zaman 10-12 cm'ye kadar ulaşan galenitli seviyeler de mevcuttur. Yeraltı üretim faaliyetleri, *B-KB* yönünde dalımlı olarak cevherleşmenin senklinal kanadına uyumlu şekilde

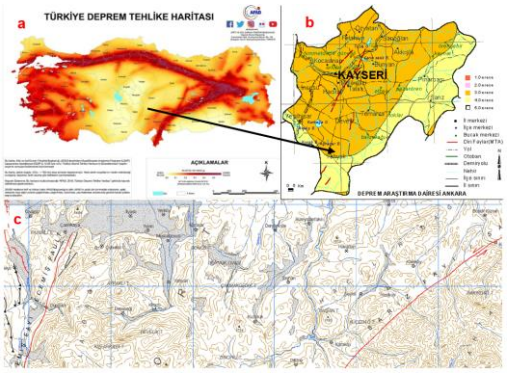
sürdürülmektedir. Göynük *Pb-Zn* cevherleşmesi tipik bir *"Alpin Tipi Karbonat Yankayaçlı Pb-Zn cevherleşmesi"* olup, oluşumunu takiben zaman içerisinde karbonatlaşmıştır [11].



Şekil 2. Göynük cevherleşmesinin detaylı jeolojik haritası. (1. Üst Permiyen kireçtaşları, 2. Alt-Orta Triyas kireçtaşları ve kırıntılıları, 3. Tüf, 4. Cevherleşme, 5. Galeri ve yarma)

2.3 Depremsellik

Şekil 3'te güncel Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası ve Kayseri İli Deprem Haritası verilmiştir. Bu haritalara göre genel olarak Kayseri İl'inin ve proje alanının yer aldığı Yahyalı İlçesi'nin bir bölümünün 3. derece bir kısmının ise 4. derece deprem kuşağında yer aldığı görülmektedir. Türkiye Deprem Haritası, MTA tarafından 2014 yılında güncellenmiş diri fay haritası ve proje alanının da bulunduğu *NJ 36-8* paftası incelendiğinde, 1900 yılından günümüze kadar yüzey faylanması oluşturmuş nitelikte diri fay/faylar tespit edilememiştir. Proje alanının yer aldığı Göynük Yöresi'nin doğusundaki Sarız Fayı ve batısındaki Ecemiş Fayları ise Holosen'de (11000 yıl) yüzey faylanması oluşturmuş fay niteliğindedirler.



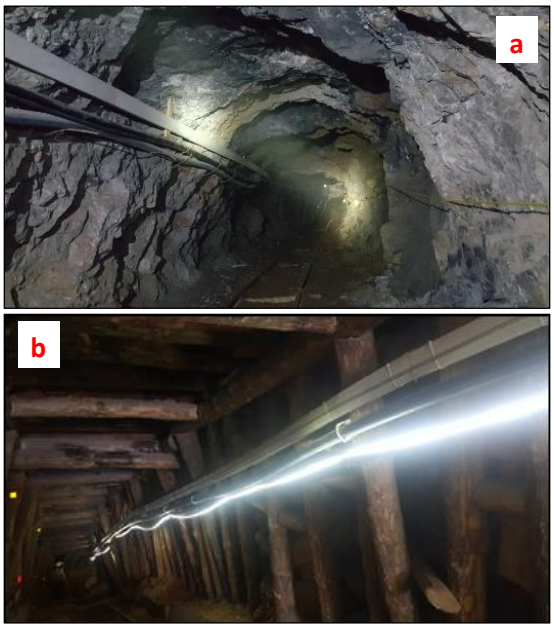
Şekil 3. a) Türkiye Deprem Tehlike Haritası **b)** Kayseri İli diri fay haritası **c)** MTA NJ 36-8 paftası (2014)

Bölge her iki faya eşit uzaklıkta yer almaktadır. Proje alanı civarında sismik hareketlenme olasılığının düşük olması, madencilik çalışmalarının daha sağlıklı yürütülebilmesi, çalışma alanında oluşturulan galeri/desandre/fere gibi mühendislik yapılarının duraylılığını koruması açısından avantaj sağlamaktadır.

3 Çalışma alanında yapılan genel değerlendirme ve gözlemler

Göynük bölgesi yeraltı *Pb-Zn* ocağı siyah kireçtaşı formasyonu içerisinde yer almaktadır ve bu formasyon tüm desandre ve galeri uzunluğu boyunca hakim durumdadır. Ocak girişi (desandre başlangıcı) 1300m, desandre tabanı 1230m kotunda yer almaktadır. 165m uzunluğa sahip desandre yaklaşık 26-27° eğime sahiptir. Desandre yaklaşık 30 yıl önce 2.0m X 2.0m (taban genişliği X yüksekliği) ebatlarında açılmıştır. Yakın zamanda başlayan madencilik faaliyetleri ile desandrenin boyutları 2.5m X 2.5m olacak şekilde genişletilmiştir. Kesit genişletme çalışmalarını takiben desandrenin ilk bölümleri oldukça özenli bir şekilde tahkim edilmiş ve ilk 18 metrelik bölümde beton tahkimat uygulaması gerçekleştirilmiştir. Beton bölümden sonra yaklaşık 33 m boyunca devam eden ahşap kasa tahkimat uygulaması yapılmıştır. Desandre boyunca kesintisiz olarak tahkimat uygulanan en uzun bölüm burasıdır. Bu bölümde tahkimat 0.3-0.5 m aralıklarla çintili kasa uygulaması şeklindedir. Aralarda fırça üst kısımlarda kama uygulaması yapılmıştır. İlave olarak 4 metrelik sarmalar kullanılarak kasa tahkimat güçlendirilmiştir. Bilindiği gibi tahkimat sistemleri, yeraltında tavandan veya yan duvarlardan gelen kavlak, akma veya gerilmelerden dolayı meydana gelebilecek göçmeleri önlemek amacıyla yapıldığından amaca uygun bir tahkimat sistemi uygulanmalıdır. Bu bölümde uygulanan tahkimat aralığının oldukça yeterli olduğu, iç kısma takviye olarak uygulanan 4 metrelik sarma uygulaması ile hem tavanda hem de yanlarda oluşabilecek gerilme ve yüklere karşı oldukça dirençli hale getirildiği tespit edilmiştir. Desandrede 33 metrelik kasa tahkimat uygulamasını takip eden 28 metrelik kısım tahkimatsız geçilmiştir. Bu tahkimatsız bölümden sonra sırasıyla; 7 metrelik tahkimatlı bölüm, 22 metrelik tahkimatsız bölüm, 7 metrelik tahkimatlı bölüm gelmektedir. Tahkimat uygulaması yapılan bu bölümden desandre tabanına kadar olan bölüm tahkimatsız olarak geçilmiştir. Desandre uzunluğu boyunca tahkimatlı ve tahkimatsız olarak geçilen bölümler Şekil 4'te görülmektedir. 7 metrelik tahkimat uygulaması yapılan bölümler killi limonit dolguların gözlendiği küçük ölçekli kırık/fay gözlemlenen bölümlerdir. Bu bölümler işletme mühendisleri tarafından tespit edilmiş ve yine onların nezaretinde tahkim edilerek güçlendirilmiştir. Yapılan tahkimat çalışmaları oluşabilecek yükleri karşılayacak niteliktedir. Tavan bölümü kamalarla kapatılarak muhtemel blok/parça kaya düşmesinin önüne geçilmiştir. Desandre ile galeriyi bağlayan kavşak noktasından 6-7 metre ileride *"Fere"* çalışması yapılmaktadır. Toplam 120 metre olarak planlanan *Fere*'de 75. metrede çalışmalar devam etmektedir. İkinci acil çıkış ve havalandırma amacıyla kullanılması düşünülen *Fere* 45° eğimli olarak sürülmektedir.

Desandre ile birlikte 30 yıl önce yürütülen madencilik çalışmaları için açılmış olan galeri yaklaşık 100 metre uzunluğundadır ve mühendisler tarafından genişletilmiş yeni ebatları 2.2m X 2.5m'dir.



Şekil 4. Desandre uzunluğu boyunca **a)** tahkimatsız ve **b)** tahkimatlı olarak geçilen bölümler

Galerinin kavşaktan itibaren 45 metrelik bölümünde tahkimat uygulaması yapılmıştır. Bir metre aralıklı kasa tahkimat uygulamasının yapıldığı tespit edilen bu bölümde teknik elemanlar tarafından gerekli görülen bölümlerde (yanlardan baskı olduğu durumlarda) kilit sarma tahkimat ile takviye edildiği tespit edilmiştir. Bu bölümden itibaren galeri sonuna kadar olan bölüm tahkimatsız geçilmiştir. Tahkimatsız geçilen bu bölümde herhangi bir üretim çalışması yoktur. Galerinin sonunda cevherleşmenin başladığı bölümde birkaç noktada yatay dilimler şeklinde üretim noktaları mevcuttur. Bu bölümlerde oldukça yoğun bir tahkimat uygulaması göze çarpmaktadır. Bu bölümde uygulanan kasa tahkimatın aralığı 0.7m-1.0m arasındadır. Kullanılan tahkimat direklerinin çapları oldukça geniştir. Hâlihazır durumda çalışma sahası içerisindeki ana galeri ekseni *K63B* yönündedir ve *GD* yönünden *KB* yönüne doğru açılmıştır. Desandre ekseni ise *K60D* yönündedir ve *GB* yönünden *KD* yönüne doğru açılmıştır. Ekseni *K22D* olacak şekilde bir başyukarı sürülmesi de planlanmaktadır. 165 metre uzunluğundaki mevcut desandrenin devam ettirilerek 300 metreye uzatılması planlanmaktadır. Desandre tamamlandıktan sonra mevcut galeriden 59 metre alt kotta ekseni *K77B* olan ikinci bir galeri açılarak cevherleşmenin yoğun olduğu bölüme ulaşılması planlanmaktadır. Bu aşamadan sonra *"aşağıdan yukarıya ilerletimli, yatay dilimli, dolgulu"* yöntemle üretime geçilecektir. Aşınmış ve eskimiş tahkimatlar düzenli olarak değiştirilmektedir. Tahkimat işlemi yapılmadan önce teleskobik direklerle baskı kontrol altına alınıp daha sonra değiştirilecek tahkimatın hemen yanına kasa atılarak tahkimat işlemi gerçekleştirilmektedir.

4 Yerinde ve laboratuvarda yapılan test/ölçümler

Kaya kütlesinin en doğru şekilde karakterize edilmesi, tünel, galeri ve şev gibi mühendislik çalışmalarını yürütürken tasarım, kazı yöntemi ve destek türünün belirlenmesinde hayati öneme sahiptir. Kaya kütlesinin davranışı bu tür projelerin güvenliği ve bütçesini doğrudan etkilemektedir. Günümüze kadar çok sayıda kaya kütle sınıflama sistemi geliştirilmiştir [12]. Bu çalışma kapsamında en çok bilinen ve uygulanan yöntemlerden RMR [13, 14], Q [15, 16] ve GSI [17-20] sınıflama sistemlerinin en güncel versiyonları kullanılmıştır. RMR, Q ve GSI sınıflama sistemlerinde girdi olarak kullanılacak parametrelerin bir bölümü laboratuvar testleri ile belirlenirken önemli bir bölümü ise yerinde yapılan ölçüm ve gözlemlerle belirlenmiştir. Yöntemlerden ilki olan Jeomekanik kaya kütle sınıflaması ilk defa Bieniawski [13] tarafından geliştirilmiş ve son olarak 1989'da [14] değişikliklere uğramıştır. Sistem uygulanırken kaya kütlesinin yapısal olarak alt birimlere ayrılması ve ayrı ayrı değerlendirilmesi gerekir. Kaya kütlesinin mühendislik verilerinin tespitine yarayan bu yöntem, yer altı inşaatları, tüneller, şev yamaçları için uygun kaya destek sistemlerinin seçiminde kullanılmaktadır. Sistem altı temel parametre üzerine kurgulanmıştır.

- Kayanın tek eksenli basınç dayanımı (UCS) veya nokta yük dayanım indeksi ($Is_{(50)}$)
- RQD kaya niteliği-göstergesi (%)
- Yer altı suyu koşulları
- Süreksizlik aralığı
- Süreksizlik durumu (devamlılık, ayrışma/bozunma, pürüzlülük, dolgu ve açıklık)
- Süreksizlik yönelimi (doğrultusu ve eğimi)

Kaya kalitesi, RMR olarak adlandırılan ve 0 ile 100 arasında değişen puanlardan oluşan bir kavramla sayısallaştırılır. İlk adım, projenin çeşidinden bağımsız olarak kaya kütlesinin niteliği hakkında genel bir değerlendirme yapmaktır (ilk beş parametre). Daha sonra yapılan bu değerlendirmeler projenin uygulandığı alanın doğrultu ve eğim yönlerine göre düzeltilir (tünel, şev ya da temel). Düzeltmelerden sonra elde edilen derecelere göre kayaların sınıflandırılması ve bu sınıfların yorumlanması yapılır.

RQD karot kalitesinin temel göstergesidir ve kaya kalitesi sınıflaması yaparken zaman zaman tek başına kullanılır. Ancak çatlak karakteri, kaya dayanımı ve çevre faktörleri gibi parametreleri de dikkate alabilmek için çoğu zamanda bu parametrelerle birlikte kullanılır. RQD, sondaj karotları yardımıyla kaya kütle kalitesinin niceliksel olarak kestirilebilmesi için geliştirilmiştir [21]. RQD, on (10) santimetreden uzun sağlam karotların toplam karot uzunluğuna oranı olarak tanımlanabilir. Kireçtaşı birimini kesen sondaj logundan, birime ait RQD değeri hesaplanmış ve % 93 olarak bulunmuştur (Şekil 5). Buna göre formasyon *"oldukça sağlam zemin"* sınıfına girmektedir. Kaya malzemesinin RQD değeri olan % 93 değerinin RMR puan değeri 18.5'tir. Karot örnekleri kesme-düzeltme makinesi yardımı ile boyutlandırılmış, yüzeyleri pürüzsüzlendirilerek birbirine paralel hale getirilmiştir. Numunelerin standartlara göre gerçekleştirilen testleri sonucunda belirlenen ortalama birim hacim ağırlık (γ), UCS ve $Is_{(50)}$ değerleri Tablo 1'de verilmiştir [22].

Tablo 1. *Pb-Zn* Ocağının kireçtaşı birimi örneklerinin γ, UCS ve Is değerleri

No	**γ** Birim hacim ağırlık (gr/cm^3)	**$Is_{(50)}$** Nokta yük dayanımı (MPa)	**UCS** Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	Kaya Sınıfı
1	2.74	3.24	71.6	R4
2	2.67	3.50	100.8	R5
3	2.70	4.36	85.2	R4
4	2.71	3.40	92.0	R4
5	2.69	2.60	99.7	R4
6	2.68	2.63	93.2	R4
Ortalama	**2.70 ± 0.025**	**3.29 ± 0.65**	**90.4 ± 10.9**	**R4**



Şekil 5. İşletmenin karotlu sondaj arşivinden bir görsel

Siyah kireçtaşı birimlerin ortalama γ değeri 2.7 gr/cm^3, $Is_{(50)}$ dayanımı 3.29 MPa ve UCS değeri 90.4 MPa olarak tespit edilmiştir. Ortalama test sonuçlarının kaya dayanım mühendislik sınıflamasına göre [23] genel bir değerlendirilmesi yapıldığında R4 *"dayanımlı kaya"* kategorisinin üst sınırında yer aldığı görülmektedir. Kaya malzemesinin 90.4 MPa'lık UCS değerinin RMR puanı 9'dur.

Yeraltı projelerinde suyun varlığı kaya kütlesinin davranışında oldukça etkili olabilmektedir. Proje kapsamında herhangi bir pilot tünel ya da araştırma galerisi varsa galeri/tünel içine gelen su miktarını veya çatlak suyu basıncını doğrudan ölçerek RMR puanını kolayca belirlemek mümkün olabilmektedir. Su geliminin belirlenebilmesi için kuyu logları ve sondaj karotlarından da faydalanılabilir. Bu çalışmada kazı aynalarında gözlem yapılmış ve bu gözlemleri dikkate alan su sızıntısıyla ilgili tanımlamalardan yararlanılmıştır [22]. Süreksizliklerin su durumu analiz edildiğinde *"süreksizlik yüzeyi kuru ve sızıntı yok"*, esas olarak ana yapıda dolgusuz süreksizlikler için *"süreksizlik yüzeyi kuru, suyun aktığına ilişkin bir gösterge yok"* sınıflarının geçerli olduğu belirlenmiştir. Genel olarak desandre ve galeri yüzeyinde yapılan gözlemlere göre herhangi bir su akışı gözlemlenmemiştir ve *"tamamen kuru"* koşullar geçerlidir (RMR puan değeri 15).

Süreksizlik aralığı, bir süreksizlik takımını oluşturan süreksizlikler arasındaki dik mesafedir [22]. Süreksizlik ara uzaklığı, sondaj karotlarından belirlenebildiği gibi, mostrada süreksizlik doğrultusuna dik yönde serilen şerit metre uzunluğunca gözlenebilen süreksizliklerin sayılması ile de belirlenebilir. Ölçüm hattı veya sondaj ekseni boyunca iki süreksizlik arasındaki uzaklık *"görünür ara uzaklık"* olarak tanımlanır. Süreksizlik aralıklarını belirlemek amacıyla galeride *"Hat Etüdü Yöntemi"* ile ölçümler yapılmıştır. Galeride yapılan ölçümler galeri eksenine dik yönde, galeri tavanından tabanına doğru 200cm'lik üç farklı hatta şerit-metre yardımıyla yapılmıştır (Şekil 6a). Galerideki süreksizlik setinin neredeyse galeri tabanına paralel seyretmesi sebebiyle ölçümler bu şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerin ortalamalarına göre ara uzaklıklar 1. hat için 153 mm (9 adet süreksizlik); 2. hat için 191 mm (8 adet süreksizlik) ve 3. hat için 278 mm (5 adet süreksizlik) olarak belirlenmiştir. Üç hattın 207 mm (0.207 m)'lik ortalaması ile bu kaya biriminin *"orta derecede ara uzaklıklı"* sınıfında olduğu saptanmıştır [22]. Süreksizlik ara uzaklığı puanı ana galeri için 8 olarak belirlenmiştir.



Şekil 6. Hat etüdü yöntemi ile ölçüm hattı boyunca süreksizlik aralığının tayini



Şekil 7. Şerit metre ile süreksizlik devamlılığı ölçümleri

Değerlendirme sırasında süreksizlik aralığına ek olarak süreksizlik durumu da dikkate alınır. Süreksizliklerin devamlılığı, kohezyon görülmeyen alanların toplam çatlak alanına oranıdır [22]. Süreksizliklerin devamlılığı galeri

içerisindeki süreksizliklerin izleri ölçülerek tespit edilmiştir (Şekil 7). Yapılan çok sayıdaki ölçümlerin ortalama değerlerine göre süreksizliklerin devamlılığının *"orta derecede devamlılık"* kategorisinde yer aldığı saptanmıştır. Orta derecede devamlılık sınıfındaki süreksizliğin RMR puanı 2'dir.

Açıklık, bir süreksizliğin karşılıklı iki yüzeyinin arasındaki dik mesafedir. Bu bölüm boş olabileceği gibi herhangi bir dolgu maddesi veya su ile doldurulmuş olabilmektedir [22]. Bu tanımdan hareketle galeri uzunluğu boyunca dijital kumpas ile çok sayıda ölçüm yapılmıştır. Elde edilen ortalama açıklık değeri 4.69 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 8). Galerideki kireçtaşı birimleri içerisinde gelişmiş süreksizliklerin açıklığı ISRM [22] ölçütlerine göre değerlendirildiğinde *"boşluklu yapılar-orta derecede geniş ve 2.5-10.0 mm"* kategorisinin genel durumu yansıttığı saptanmıştır. Buna göre söz konusu alanda yer alan süreksizlikler için RMR puanı 1'dir. Süreksizliklerin büyük bölümü "*dolgusuz*" olmasına karşın, nadiren "*kapalı-sert*" dolgulu olanları da mevcuttur.



Şekil 8. Dijital kumpas yardımı ile Süreksizlik Açıklığı ölçümleri

Dalgalılık ve pürüzlülük sırasıyla, süreksizlik yüzeyinin büyük ölçekte (m boyutunda) ve küçük ölçekte (cm boyutunda) düzlemsellikten sapmasının bir ölçüsüdür [22]. Önerilen değişik yöntemler arasından Barton ve Choubey [24] pürüzlülük profilleri ile süreksizlik yüzeylerinden gözlemlenen değerler karşılaştırılarak JRC (süreksizliklerin pürüzlülük değeri) belirlenmiştir. Bu çalışmada, galerinin içinden geçtiği kireçtaşı formasyonunda JRC değerleri 10-12 puan aralığındadır. Süreksizlikler *"pürüzlü"* sınıfında olup aynı zamanda yer yer *"dalgalı ve basamaklı"* bir yapı da göstermektedir. Bu veriler ışığında yerinde yapılan değerlendirmeye göre pürüzlülük sayısı için genel olarak *"pürüzlü"* sınıfı ve 5 puanının en gerçekçi değer olduğu saptanmıştır. Galeri uzunluğu boyunca yapılan gözlem ve incelemelerde süreksizliklerin dolgu durumunun çeşitlilik arz ettiği görülmüştür. Dolgusuz kısmen kapalı sayılabilecek süreksizlikler olmakla beraber en uygun değerlendirmenin *"yumuşak dolgu < 5 mm"* olabileceği değerlendirilmiştir. Dolgu gözlemlenen süreksizliklerde demir oksit sıvanmaları mevcuttur ve genel olarak sert ve kaynaşmış nitelikte değildir. Bu değerlendirmeden hareketle dolgu için RMR puanı 2 olarak belirlenmiştir.

Süreksizlik yüzeylerinin bozunma durumunu belirlemek için saha çalışmaları sırasında kullanılabilecek bozunma sınıflaması ölçütleri önerilmiştir [22]. Yerinde yapılan incelemelerde kayacın dayanımı ve temel özellikleri değerlendirildiğinde, söz konusu lokasyonda yer alan kayacın jeolog çekici ile yirmiden (20) fazla darbe ile kırılabildiği saptanmıştır. ISRM [22]'ye göre ana kayaç (kireçtaşı) *"bozunmamış (taze) kaya"* sınıfına girmektedir. Kayacın süreksizlik düzlemleri incelendiğinde, süreksizlik düzlemlerinde renk değişimleri gözlenmektedir. Jeolog çekici ile 4-5 darbe vurulduğunda kayaç eklem yüzeyinden kırılabilmekte, ya da çentik/çatlaklar oluşabilmektedir. Tüm bu değerlendirmeler göz önüne alındığında süreksizliklerin *"bozunmamış - sağlam kaya (R4)"* sınıfında olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 9a).



Şekil 9. a) Jeolog çekici yardımıyla kayaç dayanımının yerinde tespitine yönelik çalışmalar, **b)** Sağlam kaya ve eklem düzlemleri üzerinde Schmidt çekici ile yapılan ölçüm çalışmaları

Galeri ve desandrenin kavşak noktasında sağlam kaya ve süreksizlik düzlemleri üzerinde Schmidt çekici ile ölçüm çalışmaları yapılmıştır (Şekil 9b). Yukarıda bahsedilen kaya bozunma sınıflamaları tamamen gözlemle oluşturulduklarından zaman zaman öznel değerlendirmeler söz konusu olabilmekte ve aynı süreksizlik yüzeyi için farklı yorumlar yapılabilmektedir. Bozunma derecesi ile ilgili bu tür hataların giderebilmesi için aşağıda verilen sayısal indeks tanımlanmıştır [23].

$$W_c = R_f / R_w \quad (1)$$

Bu çalışmada, galeride yüzeyleyen kireçtaşı birimi için yapılan bozunma katsayısı (W_c) hesaplamasında taze kayanın Schmidt çekici sekme sertlik değeri (R_f) olarak 42.4; eklem düzlemi için Schmidt çekici sekme sertlik değeri (R_w) olarak 37.6 ortalama değerleri kullanılmıştır. Sahada yapılan bu deneyin sonuçları kullanılarak kayacın bozunma derecesi (W_c=1.13) *"az bozunmuş"* olarak belirlenmiştir. Bu

değerlendirmelerden hareketle RMR puanı 5 olarak belirlenmiştir [23].

Süreksizliklerin yönelimi kaya davranışını etkileyebilmektedir. Bieniawski, uygun veya uygun olmayan yönelim pozisyonlarının uygun olup olmaması durumuna göre *"Temel RMR"* puanının (ilk beş parametre toplamı) düzeltme yapılarak kullanılmasını önermektedir. Burada uygun süreksizlik yönelimi için toplam puanda herhangi bir azaltma yapılmaz ancak süreksizlik pozisyonlarının uygun olmadığı tünel çalışmalarında en fazla yirmibeş (25) puana kadar azaltma yapılır. Süreksizlik takımlarının yönelimini sondaj çalışmalarıyla belirlemek mümkün değildir ancak bazı özel alet ve yöntemlerle belirlemek mümkün olabilir [25]. Süreksizlik yönelimi, düşey galeri ve şaftta bir kamera yardımıyla çıplak gözle tespit edilebilir. Cevherleşmenin yönelimi, açılan galeri ve oluşturulan yeraltı açıklıklarının geometrisini planlamada belirleyici olmaktadır. Bu bağlamda hali hazır durumda yeraltı açıklılarının nihai yönelimi hesaplamalarda belirleyici olacaktır. Yeraltı işletme yöntemiyle üretim yapılan, *Pb-Zn* ocağında, birbiriyle bağlantılı desandre ve galerideki siyah kireçtaşı biriminde, jeolog pusulası ile yapılan doğrultu, eğim ve eğim yönü ölçümleri ile hâkim süreksizlik takımlarının yönelimleri belirlenmiştir (Şekil 10). Sahada yapılan gözlemler ve yapılan ölçümler neticesinde çalışma alanına hâkim bir (1) ana süreksizlik takımı belirlenmiştir.



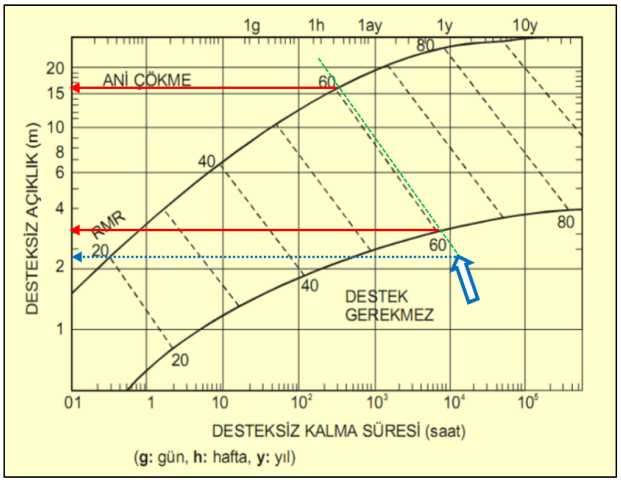
Şekil 10. Desandre ve galeride jeolog pusulası ile yapılan doğrultu, eğim ve eğim yönü ölçümleri.

Hâlihazır durumda ruhsat sahası içerisindeki Ana galeri ekseni *K63B* yönündedir ve *GD* yönünden *KB* yönüne doğru açılmıştır. Yapılan süreksizlik ölçümlerine göre; ana galerideki hâkim süreksizlik setinin yönelimi *(K38B/5°GB)* olarak belirlenmiştir. RMR sınıflamasının altıncı parametresi olan *"Süreksizlik Yönelimi Düzeltmesi"*, hâkim süreksizlik takımının doğrultusu ile galeri (tünel) gidişi arasındaki açı ve süreksizlik takımının eğimi esas alınarak belirlenir. Ana Galeri *K63B* yönündedir. Ana galeri, hâkim süreksizlik seti ile 25° açı yapmakta olup süreksizlik eğimi ortalama 5°'dir. Mevcut galeri gidişi (yönelimi) ile süreksizliklerin doğrultusu arasındaki açı ve süreksizliklerin eğimi değerlendirilerek *"Düzeltilmiş RMR"* puanının saptanması gerekir. Ana galeride süreksizlik takımının doğrultusu galeri eksenine neredeyse paralel durumdadır.

Tablo 2. Göynük ocağı ana nakliyat galerisinin RMR kaya sınıflama değerlendirmesi.

Ana Parametreler	Alt Parametreler	Değer	Puan
UCS		90.4 MPa	9.0
RQD Değeri		% 93	18.5
Yeraltı Suyu		Kuru	15.0
Süreksizlik Aralığı		207 mm	8.0
Süreksizlik Durumu	Süreksizlik Uzunluğu	3-10 m	2.0
	Süreksizlik Açıklığı	1-5 mm	1.0
	Pürüzlülük Durumu	Pürüzlü	5.0
	Dolgu Durumu	Yumuşak dolgu < 5mm	2.0
	Bozunma Durumu	Az Bozunmuş	5.0
Temel RMR puanı			65.5
Süreksizlik yöneliminin etkisi		Orta	-5
Düzeltilmiş RMR puanı			60.5

Eğim açısı itibariyle *"Doğrultudan bağımsız eğim 0-20° arasında (Orta)"* en uygun kategori olarak belirlenmiştir. Bu bilgiler ışığında ana galeri için (-5 puan) düzeltme uygulanarak *"Düzeltilmiş RMR"* puanı belirlenmiştir. Yukarıda bahsi geçen parametreler ışığında Göynük ocağındaki galerinin RMR kaya sınıflama sistemine göre değerlendirmesi yapılmıştır. Ana nakliyat galerisinin gerekli görülen bölümlerinde tahkimat önlemleri alınmakla birlikte tahkimatsız olan bölümler de mevcuttur. Ana galerinin tahkimatsız olarak stabil kalabileceği süre yaklaşık olarak hesaplanmaya çalışılmıştır. Arazide yapılan ölçümler, gözlemler ve laboratuvar testlerinin sonuçlarına göre Temel ve Düzeltilmiş RMR sistemi puanı hesaplanmıştır. RMR sınıflama sisteminde kaya kütlelerinde oluşturulacak yeraltı açıklıklarının belirli bir tavan genişliğine göre desteksiz durma sürelerinin tahmini amacıyla Şekil 11'de verilen grafik kullanılmaktadır. Mevcut koşullarda ana nakliyat galerisinin *"Düzeltilmiş RMR"* puanı 60.5 olarak hesaplanmıştır (Tablo 2). Ana nakliyat galerisini oluşturan kaya yapısının *"iyi kaya"* sınıfında yer aldığı ancak *"orta derecede sağlam kaya"* sınırında yer aldığı görülmektedir.



Şekil. 11. RMR sınıflama sistemine göre yeraltındaki boşlukların tavan açıklığı ve desteksiz ayakta kalma süresi grafiği [15]

Bu kaya koşullarında 16m'den geniş açıklıklarda ani çökme gözlenebilecek iken, 3.5m'den daha küçük

açıklıklarda tahkimat uygulanmasına gerek yoktur. Ana galeri kesiti 2.2m X 2.5m olduğundan, gerekli görülen kısımlarda tahkimat yapılması koşuluyla tahkimatsız olarak stabil kalabileceği öngörülmektedir. Genel olarak masif yapı arz eden ana nakliyat galerisinde özellikle kısmi deformasyon gözlenen bölümlerde hâlihazırda tahkimat uygulaması yapılmış durumdadır. RMR sisteminin gerilme parametrelerinden yoksun olduğu söylenebilir. Bu sebeple çalışma alanında Q- sınıflama sistemi de kullanılmıştır. Q (Rock Mass Quality) veya Norveç Jeoteknik Enstitü Sınıflama (NGI) sistemi olarak bilinen bu sistem, Barton ve diğ. [15] tarafından geliştirilmiştir. İskandinav tünellerinde gerçekleştirilen 200'e yakın inceleme ve değerlendirmelerle oluşturulan Q-sisteminin kaya sınıflama sistemi konusundaki gelişmelere katkısı büyük olmuştur. Uzun yıllar ilk hali ile kullanıldıktan sonra, sistemin destek seçimlerine yönelik bölümü [16] ile *"Kazı destek oranı"* (ESR) ve *"Gerilme azaltma faktörü"* (SRF) değerleri revize edilmiştir [26]. Q-kaya kütlesi sınıflama sistemini belirten denklem aşağıda tanımlanmıştır.

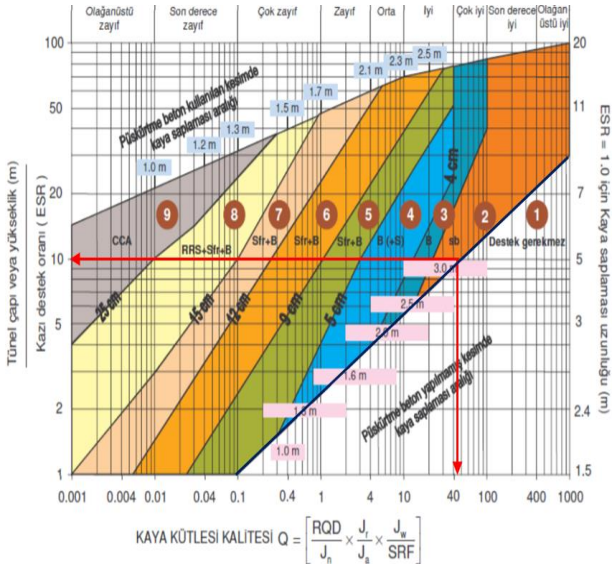
$$Q=\frac{RQD}{J_n}\times\frac{J_r}{J_a}\times\frac{J_w}{SRF} \quad (2)$$

Burada; RQD, kaya kalite göstergesi; J_n, eklem takım numarası; J_r, eklem pürüzlülük numarası; J_a, eklem ayrışma numarası; J_w, eklem suyu azalım faktörü; SRF, gerilme azalım faktörü; RQD/J_n, blok boyutunun ölçüsü; J_r/J_a, bloklar arasındaki kayma direnci ve J_w/SRF, aktif gerilmedir. Q-sınıflama sistemi değerinin hesaplanması için kullanılan altı parametre Tablo 3'te verilmiştir.

Q-kaya kütlesi sınıflama sistemi değeri, bu parametreler kullanılarak Denklem (2)'den 46.5 olarak hesaplanmış olup, bu değere göre *"çok iyi kaya"* sınıfına girmektedir. Q-sistemine göre sınıflandırılan tünel/galeri kayalarında destek/tahkimat türünün saptanmasında *"Eşdeğer Boyut"* (*De*) değerinin bulunması gerekir. Eşdeğer boyut değeri, aşağıdaki denklemden yararlanılarak bulunur.

$$\text{Eşdeğer boyut (De)}=\frac{\text{En, çap veya yükseklik (m)}}{\text{Kazı destek oranı (ESR)}} \quad (3)$$

Denklemdeki ESR değeri, kazı türü, amacı ve derinliği (yüzeyden) ile ilgilidir. Bu değer yer altı açıklığının duraylı kalabilmesi için yerleştirilen destek sistemi üzerinde etkisi olan bir tür güvenlik katsayısıdır. Çalışma alanı kazı tipi olarak *"C sınıfı"* olduğundan ESR değeri 1.6 olarak belirlenmiştir. Grimstad ve Barton [16] tarafından modifiye edilmiş tünel destek sistemi abağında 46.5 olan Q-değeri için *De* değeri 10 m olarak belirlenmiştir (Şekil 12). Bu değerler Denklem (3)'te yerine konulduğunda galeri için tahkimatsız olarak ayakta kalabilecek en, çap veya yükseklik 16 m olarak hesaplanmıştır. Destek kategorilerinde saplama uzunluklarına dair herhangi bir öneri yoktur. Saplama uzunlukları tavan ve duvar için sırasıyla Denklem (4) ve Denklem (5) kullanılarak hesaplanmıştır (2.20 m ve 2.23 m). En büyük desteksiz kazı genişliği ($B_{max\text{-}desteksiz}$) Denklem (6)'dan 14.86 m, kalıcı destek basıncı Denklem (7)'den 0.185 kg/cm^2 olarak hesaplanmıştır. Eklem takım sayısının 3'ten az olması durumunda kalıcı destek basıncı değeri Denklem (8)'e göre 0.107 kg/cm^2'dir.



Şekil. 12. Q-Kaya kütlesi sınıflama sistemi için modifiye edilmiş tünel destek sistemi abağı [16].

$$L=2+[(0.15\times B)\div ESR] \quad (4)$$

$$L=2+[(0.15\times H)\div ESR] \quad (5)$$

$$B_{max\text{-}desteksiz}=2\times ESR\times Q^{0.4} \quad (6)$$

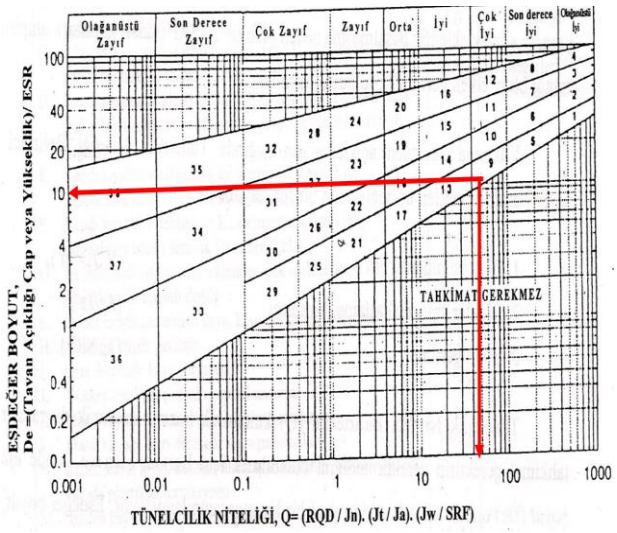
$$P_{tavan}=\frac{2\times Q^{\frac{1}{3}}}{J_r} \quad (7)$$

$$P_{tavan}=\frac{2\times J_n^{\frac{1}{2}}\times J_r^{-1}\times Q^{\frac{1}{3}}}{3} \quad (8)$$

Tablo 3. Kireçtaşı birimlerine ait Q-kaya kütlesi sınıflama sistemi puanlama tablosu

No	Parametreler	Sınıf	Tanımlama	Puan
1	RQD (Kaya Kalite Göstergesi)	E	Çok iyi (Mükemmel) % 93	93
2	J_n (Eklem takımı sayısı)	C	Bir eklem takımı-düzensiz eklemler	3
3	J_r (Eklem pürüzlülük değeri)	B	Dalgalı-pürüzlü	3
4	J_a (Eklem yüzeyi bozunma değeri)	C	Eklem cidarları az ayrışmış, yumuşamayan tipte kumlu parçacıklar, kilsiz ayrışmış kaya.	2
5	J_w (Eklem suyu azaltma faktörü)	A	Kuru kazı veya düşük su geliri	1
6	SRF (Gerilme azaltma faktörü)	J	Orta gerilme, gerilme koşulları elverişli	1

Burada; B, kazı genişliği (2.2m); H, kazı yüksekliği (2.5m); L, saplama uzunluğu; ESR, kazı destek oranı ve P_{tavan}, kalıcı destek basıncıdır. Kazı/tahkimat oranının, kullanım amacı ve süresi ile kabul edilebilir duraysızlık derecesine göre Q-sistemi için tahkimat şekli ve özelliklerinin özetlendiği tablodaki değerleri alması öngörülmüştür. Barton ve arkadaşlarının [15] hazırladığı ve sonra yeraltı kazılarında çelik lif destekli püskürtme betonun kullanımının artmasından dolayı güncellenen [16] abakta, Q ve *De* verileriyle projedeki destek kategorisi belirlenebilmektedir (Şekil 13).



Şekil 13. Yeraltı açıklıklarında kalıcı destek ve güçlendirme sistemlerinin tespiti için Q destek grafiği [16]

Kayaçlar küçük ölçekte dikkate alındıklarında kayaç malzemesi önem kazanırken, ölçek büyüdükçe sağlam kayaç malzemesinden eklemli kayaç kütlesine geçiş söz konusudur. Bu nedenle çok sayıda süreksizlik içeren kaya kütlelerinin davranışını kayaç malzemesi ile birlikte süreksizlikler denetler. Bu nedenle, çatlaklı kaya kütlesinin dayanımını belirlemek amacıyla Hoek ve Brown [27] tarafından ampirik bir yöntem (Görgül yenilme ölçütü) ortaya konulmuştur. Bu yöntem daha sonra geliştirilerek GSI kavramı ortaya çıkmıştır [28]. Homojen ve izotrop kaya kütlelerinin dayanımlarının bir ifadesi olan Hoek-Brown görgül yenilme ölçütünde başlangıçta RMR puanları kullanılarak kaya kütle sabitleri (m_b, s ve a) belirlenirken, 1995 yılından sonra sisteme GSI kavramı eklenmiştir. Başlangıçta RMR ve Q-sınıflaması puanları ile ilişkilendirilirken, GSI daha sonraki yıllarda tek başına bir sınıflama sistemi olarak kullanılmaya da başlanmıştır [20].

Palmström [29-31] tarafından tanımlanan hacimsel eklem sayısı (J_v), birim hacimdeki yani 1 m^3'teki çatlak sayısını göstermektedir ve Denklem (9)'la bulunmaktadır. Burada; N_n, gözlenen her bir eklem seti için ölçüm hattı boyunca sayılan süreksizliklerin sayısı, L_n, gözlenen her bir eklem setine dik yönde seçilmiş ölçüm hattının uzunluğudur. Ana galeride saptanan eklem takımlarının şerit metre yardımıyla yapılan ölçümlerinden ortalama J_v değeri 11adet/m^3 olarak hesaplanmıştır. Kayaç hacimsel eklem sayısı parametresi açısından *"orta büyüklükteki bloklar"* sınıfındadır [22]. Palmström [29, 31]'e göre de J_v tanımı *"orta derecede düşük"* olup, kaya *"orta derecede eklemli"* sınıfına girmektedir.

$$J_v=\frac{N_1}{L_1}+\frac{N_2}{L_2}+\frac{N_3}{L_3}+\ldots+\frac{N_n}{L_n} \quad (9)$$

$$SR=-17.5\times \ln(J_v)+79.8 \quad (10)$$

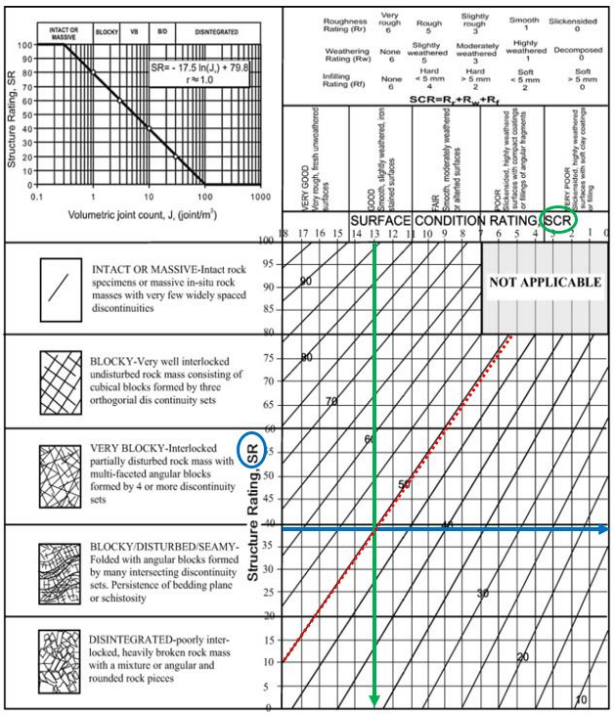
$$SCR=R_r+R_w+R_f \quad (11)$$

Tablo 4. GSI parametresinin hesabında kullanılan parametreler ve puan değerleri

Parametre	Açıklama	Formül/eşitlik	Gözlem/tespit	Puan
RQD (%)	Kaya kalite göstergesi	-	Karot sandığı ölçümler	93
D_F	Patlatma hasarı ve gerilme gevşemesinden kaynaklı örselenme faktörü	-	Kontrollü patlatma	0.2
m_i	Kaya türüne bağlı malzeme katsayısı (kaya malzemesi)	-	Sparitik Kireçtaşı	10
σ_3	Yenilme anındaki en küçük yanal (minör) asal gerilme	-	Saha gözlemi	0
σ_c	Sağlam kaya malzemesi basınç dayanımı (MPa)	-	Tablo 1	90.4
J_v	Kaya kütlesi hacimsel çatlak sayısı (adet/m^3)	Denklem (9)	-	11
SR	Yapısal özellik puanı	Denklem (10)	-	37.8
SCR	Süreksizlik yüzey koşulu puanı	Denklem (11)	Saha gözlemi	13
GSI	Jeolojik dayanım indeksi	-	Şekil 14	50
m_b	İndirgenmiş malzeme katsayısı (yerinde kaya kütlesi)	$m_b=m_i.\exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D_F}\right)$	-	1.38
s	Kaya türüne bağlı sabit	$s=\exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D_F}\right)$	-	0.003
a	Kaya türüne bağlı sabit	$a=\frac{1}{2}+\frac{1}{6}(e^{-GSI/15}-e^{-20/3})$	-	0.506
σ_1	Yenilme anındaki en büyük düşey asal gerilme-kaya kütlesi yerinde basınç dayanımı (MPa)	$\sigma_1=\sigma_3+\sigma_c\left(m_b\frac{\sigma_3}{\sigma_c}+s\right)^a$	-	4.45
E_m	Deformasyon modülü (GPa)	$E_m=\sqrt{\frac{\sigma_c}{100}}10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)}$	-	9.51
c	Kohezyon (MPa)	-	-	21.5
φ	İçsel sürtünme açısı (derece)	-	-	39.2°

Patlatma hasarı ve gerilme gevşemesinden kaynaklı örselenme faktörü (D_F) başarılı ve kontrollü bir patlatma uygulaması yapıldığından "0.2" olarak hesaba katılmıştır. Ana galeri uzunluğu boyunca hakim formasyon sparitik kireçtaşıdır. Bu sebeple kaya türüne bağlı malzeme katsayısı (kaya malzemesi) değerleri "m_i=10" olarak hesaba katılmıştır. Sahada yapılan gözlemlere göre galeri yan duvarlarında herhangi bir deformasyon-sıkışma izine rastlanmadığından yenilme anındaki en küçük yanal (minör) asal gerilme değerleri "σ_3=0" olarak alınmıştır. Yapısal özellik puanı (SR) Denklem (10)'a göre hesaplanmıştır. Buna göre ana galerinin SR değerinin puanı 37.8'dir. Süreksizlik yüzey koşulu puanı (SCR), Şekil 14'teki abakta verilen ve süreksizlik yüzeyinin pürüzlülüğü (R_r: pürüzlü: 5 puan), süreksizlik yüzeyinin bozunma durumu (R_w: bozunmamış: 6 puan) ve süreksizlikteki dolgunun (R_f: yumuşak dolgu < 5 mm: 2 puan) durumundan elde edilen puanların toplamı ile Denklem (11)'e göre hesaplanmaktadır. Buna göre SCR değeri "13" olarak belirlenmiştir.

Göynük *Pb-Zn* ocağında yapılan gözlemler ve laboratuvarda yapılan karotlu sondajlardan elde edilen dayanım ve süreksizlik ölçümlerine göre Tablo 4'te sunulan veriler yardımıyla kireçtaşı birimlerin yaklaşık GSI puanları Şekil 14'te verilen abak yardımıyla belirlenmiştir. GSI puanı belirlenirken SR ve SCR değerlerinin kesiştiği nokta esas alınmıştır. Mevcut koşullara ana galerinin GSI puanı 50 *"bloklu-örselenmiş"* olarak bulunmuştur ancak *"çok bloklu"* kaya sınıfının sınırında yer almaktadır. Elde edilen bu değerler, tektonik faaliyetler sonucunda yer yer kırıklı bir yapı arz eden ancak geniş ve sağlam bloklar sunan kireçtaşlarının tahkimatsız olarak ayakta kalabilme kabiliyetini sınırlayacak niteliktedir.



Şekil 14. Kantitatif GSI abağı [20]

İşletmede uygulanacak patlama uygulamalarının *"kötü denetimli"* koşullarda gerçekleşmesi halinde kaya kütlesinin tamamen *"bloklu-örselenmiş"* kaya sınıfında yer alma ihtimali söz konusu olabilecektir. GSI, kaya kütle dayanımındaki azalmayı farklı jeolojik koşullara göre kestiren bir yaklaşım sağlar. Jeolojik dayanım indeksi sistemi, eklemli kaya kütlesinin dayanımının sağlam kaya parçasının özellikleri ve farklı gerilme koşullarında bu parçaların hareket serbestlikleri, sağlam parçaların geometrik şekli ve parçaları birbirinden ayıran yüzeylerin durumu ile kontrol edildiği prensibine dayanmaktadır. Altere olmuş ve bozunmuş malzemeler ile çevrelenmiş yuvarlak parçalar içeren kaya parçalarının temiz-kaba süreksizlik yüzeyleri içeren köşeli kaya parçalar içeren kaya kütlelerinden daha zayıf kaya kütleleri oluşturacağı çok açıktır.

Kaya kütlesi sınıflaması sistemlerinin kullanımları önemli tasarım kolaylıkları sağlarken süreksizlik geometrisinin tanımlanmasındaki belirsizlikler gibi nedenler ile önemli değerlendirme hataları riskleri taşıdıkları unutulmamalıdır. Bu sebeple kesin bir rakam dikkate almaktansa belirli bir aralığının daha gerçekçi bir yaklaşım sağlayacağı bilinmelidir. Ayrıca, patlatma ile kazı yapılan kaya kütleleri gibi kazı nedeni ile oluşan çatlakların kaya kütlesi sınıflama sistemleri değerlendirmelerinde göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

5 Genel değerlendirme ve sonuçlar

Detaylı olarak incelenen parametrelere göre ocakları oluşturan kaya yapısının genel itibariyle dayanımlı kayaçlardan oluştuğu görülmektedir. Karotların makro olarak incelemesi yapıldığında genel olarak masif bir yapı arz ettiği, belirgin süreksizlik, deformasyon ve alterasyon izlerinin olmadığı belirlenmiştir. Basınç dayanımı ya da RQD gibi parametreler kayaç hakkında oldukça önemli bilgiler sağlasa da mühendislik projelerinde kaya kütlesini bir bütün olarak değerlendirmek doğruya en yakın sonuçları vermektedir. Ocakta tercih edilen tahkimat sistemi genel olarak ağaç (kasa) tahkimattır. Altere olan bölümlerde ve şistli kayaç/cevher sınırlarında 0.5m ile 1.0m arasında değişen aralıklarla tahkimat uygulaması yapılmıştır. Cevher üretim yerlerinde küçük ölçekli kırık/faylanma olan bölgelerde tamamen tahkimat uygulandığı görülmektedir (süren kama kasa tahkimatı). İhtiyaç duyulan bölgelerde takviye uygulaması yapılmıştır. Kaya kütlesinin dayanımında hidrojeolojik koşullar, süreksizliklerin detaylı özellikleri ve tektonizmanın etkileri oldukça önem arz etmektedir. Genel olarak küçük kesitlere sahip galerilerde yüksek su geliminin olmaması, belirgin süreksizlik takımlarının ve fayların olmaması gibi koşullarda rutin kontrollerin yapılması koşuluyla kaya kütlesinin tahkimatsız olarak ayakta kalabilmesi mümkün olabilmektedir. Ancak altere olmuş kayaçların, süreksizliklerin ve fay zonlarındaki cevherleşmenin başladığı bölgelerde mutlaka gerekli tahkimat önlemleri alınmalıdır. Genel olarak ana nakliyat galerileri ve üretim bölgelerinde yapılan tahkimat önlemleri yeterli görülmektedir. Ancak madenlerin dinamik yapılar olduğu ve üretimle birlikte sürekli değişim geçirdikleri

unutulmamalıdır. Üretim için yapılan patlatmalar sonrasında özellikle kavlak taraması sürekli olarak yapılmalıdır. Gevşemiş ya da gevşeme ihtimali olan kaya blokları için ilave tahkimat önlemleri alınmalıdır. Mühendislerin gözetiminde gerekli görülen bölgelerde kasa, kasa altı sarma tahkimatı gibi uygulamaların devamlılığı sağlanmalıdır.

Bu çalışma kapsamında kireçtaşı formasyonu içerisinde açılmış galeride inceleme ve ölçümler yapılarak tahkimatsız olarak geçilen bölümlerin sağlamlığı ve stabilitesinin incelenmesi, elde edilen bulgular ve hesaplamalara göre bahsi geçen bu bölümlerin desteksiz olarak geçilmesinde sakınca olup olmadığının belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan bu çalışmalardan aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir:

RMR sistemine göre yapılan hesaplamalara göre ana galerideki hâkim kaya biriminin *"iyi kaya"* sınıfında olduğu ancak *"orta derecede sağlam kaya"* sınırında yer aldığı görülmektedir. Ana galeride çok uzun süreli çalışmalarda tahkimat gerektirmeden durabilecek maksimum açıklık 3.5 m olarak hesaplanmıştır. Mevcut kaya kütlesi koşullarında 16 m'den geniş açıklıklarda ani çökme gözlenebilecektir. Ana galeri kesiti 2.2m X 2.5m olduğundan yer yer tahkimat gerektirmeden durabilmesinde bir sakınca bulunmamakla birlikte, gerekli görülen, risk saptanan ve tehlike arz eden yerlerde mutlaka tahkimat uygulanmalıdır.

Q-sistemine göre ana galerideki çok kısa süreli çalışmalarda tahkimat gerektirmeden durabilecek maksimum açıklığın 16 m olduğu hesaplanmıştır. Q-sistemine göre mevcut kaya kütlesi 9 nolu bölgede yani *"tahkimat gerekmez"* sınırındadır (Şekil 13). Yapılması olası mühendislik hataları ile (denetimsiz patlatma gibi) bu durum *"9 numaralı"* bölgeye rahatlıkla taşınabilecektir. Bu durumda gerdirmesiz noktasal kaya saplamaları (tavan ve duvar için 2.20m-2.23m uzunluğunda) kullanmak oldukça gerçekçi bir çözüm ortaya koyacaktır. İşletmede gerekli görülen yerlerde kasa tahkimat uygulaması yapıldığından kaya saplamalarına gerek kalmamaktadır. Uygulanan kasa tahkimatta özellikle tavan bölümler açıklık kalmayacak şekilde kamalarla kapatılmalıdır ve uygulanan tahkimat önlemlerinin titizlikle devamı sağlanmalıdır.

Analiz çalışmalarında üçüncü yöntem olarak GSI sınıflaması kullanılmıştır. Göynük *Pb-Zn* ocağında yapılan gözlemler ve laboratuvarda yapılan karotlu sondajlardan elde edilen dayanım ve süreksizlik ölçümlerine göre kireçtaşı birimlerin yaklaşık GSI puanı 50 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, tektonik faaliyetler sonucunda yer yer kırıklı bir yapı arz eden ancak geniş ve sağlam bloklar da sunan kireçtaşlarının tahkimatsız olarak ayakta kalabilme kabiliyetini sınırlar niteliktedir. İşletmede uygulanacak patlama uygulamalarında gerekli özenin gösterilmemesi halinde kaya kütlesinin tamamen *"bloklu-örselenmiş"* kaya sınıfına geçme ihtimali söz konusu olabilecektir. İşletmede patlatmalı kazı ile üretim yapıldığından, patlatma faaliyetlerinin tahkimat sistemleri ile açıklıkların göçmesine neden olmayacak şekilde ve gerekli emniyet tedbirleri alınarak yapılması zorunluluktur.

Çalışma alanında az sayıda küçük ölçekli kırık/fayların varlığı, süreksizliklerin, açıklık ve yönelimleri nedeniyle, yapılacak olan çalışmalarda ani kaya kütle kalitesi değişimlerine sebebiyet verebilecek olmaları nedeniyle gerekli görülen lokasyonlarda (süreksizliklerin/çatlakların olduğu yerlerde, kavşak noktalarında, cevher zonlarında, fay zonlarında, erime boşluğu olan yerlerde) işletme tarafından uygun kazı ve tahkimat sistemleri uygulanmalıdır. Tahkimat yönergesine uygun olarak çalışılmalı, tahkimat kontrolü yapılmalı ve bozulmaya başlayan tahkimat unsurları değiştirilmelidir.

Açıklıkların çok uzun ve çok kısa süreli olarak tahkimat gerektirmeden stabil kalabilme durumu, kaya kütlesinin bütünsel duraylılığını ifade etmektedir. Kaya sınıflama sistemleri ile her ne kadar *"tahkimatsız ayakta kalabilecek maksimum açıklık"* değerleri bulunsa da teknik personelin detaylı bir şekilde ocak içerisinde inceleme ve değerlendirmeler yapması, tahkimat çalışmalarında gerekli dikkat ve özenin gösterilmesi gerekmektedir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %15

Dergi kaynakları

[1] K. Karaman, F. Cihangir, S. Demirel, A. Kesimal, Kaya kütlesi deformasyon modülünün farklı yöntemlerle belirlenmesi. Yerbilimleri, 35(3), 141-168, 2014. https://doi.org/10.17824/huyuamd.68314.

[2] A. Sakcalı, Pirinkayalar tüneli (Erzurum, Türkiye) giriş ve çıkış portallarının sayısal modellenmesi: örnek vaka çalışması. Konya Journal of Engineering Sciences, 9(4), 1025-1039, 2021. https://doi.org/10.36306/konjes.859345.

[3] E.B. Aygar, Evaluation of new Austrian tunnelling method applied to Bolu tunnel's weak rocks. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 12, 541-546, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.12.011.

[4] C. O. Aksoy, K. Ogul, I. Topal, S. C. Ozer, V. Ozacar, E. Posluk, Numerical modeling of non-deformable support in swelling and squeezing rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 52, 61-70, 2012. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.02.008.

[5] G. Barla, Full-face excavation of large tunnels in difficult conditions. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 8(3), 294-303, 2016. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.12.003.

[6] K. Terzaghi, Rock Defects and Loads on Tunnel Supports. In: R.V. Proctor, T. White (eds), Rock Tunnelling with Steel Support, 1. Commercial Shearing Co., Youngstown, OH, 15-99, 1946.

[7] M. M. Blumenthal, Toroslarda yüksek Aladağ silsilesinin coğrafyası, stratigrafisi ve tektoniği hakkında yeni etüdler. Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Yayınları, Seri D, No: 6,136 s., 1952.

[8] S. Metin, E. Göğer, İ. Bingöl, O. Baydar, B. Erdoğan, Tufanbeyli dolayının Kambriyen ve Tersiyer kayaları. Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 16, 82-100, 1973.

[9] O. Tekeli, Toroslarda, Aladağların yapısal evrimi. Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 23(1),11-14, 1980.

[10] O. Tekeli, A. Aksay, B. M. Urgun, A. Isik, Geology of the Aladag mountains. In International Symposium on the Geology of the Taurus Belt, Ankara-Turkey, Proceedings (Ed: O. Tekeli, and M.C. Göncüoğlu), 143-158, 1984.
[11] O. Koptagel, A. Efe, F. Ceyhan, Göynük Pb-Zn cevherleşmesinin (Yahyalı-Kayseri) kökeni. Türkiye Jeoloji Bülteni, 41(2), 53-62, 1998.
[12] R. Ulusay, H. Sönmez, Kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, No: 60, Ankara. 2007.
[13] Z. T. Bieniawski, Engineering Classification of Jointed Rock Masses. Civil Engineering= Siviele Ingenieurswese, 12, 335-343, 1973.
[14] Z. T. Bieniawski, Engineering Rock Mass Classifications, Wiley, New York. pp 251, 1989.
[15] N. Barton, R. Lien, J. J. R. M. Lunde, Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics, 6, 189-239, 1974. https://doi.org/10.1007/BF01239496.
[16] E. D. Grimstad, Updating the Q-system for NMT. In Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete-Modern use of wet mix sprayed concrete for underground support, Fagemes, Oslo, Norwegian Concrete Association, 1993.
[17] E. Hoek, E. T. Brown, Practical estimates of rock mass strength. International Journal of Rock Mechanics and mining Sciences, 34(8), 1165-1186, 1997. https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X.
[18] E. Hoek, P. Marinos, M. Benissi, Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 57, 151-160, 1998. https://doi.org/10.1007/s100640050031.
[19] H.Sonmez, R. Ulusay, Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 36(6), 743-760, 1999. https://doi.org/10.1016/S0148-9062(99)00043-1.
[20] H. Sonmez, R. Ulusay, A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies. Yerbilimleri, (26), 77-99, 2002.
[21] D.U. Deere, Geological Consideration, In: K.G. Stagg, O.C. Zienkiewicz (Eds.), Rock Mechanics in Engineering Practice. Wiley, London, 1968.
[22] ISRM, The Complete ISRM Suggested Methods Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006, Editors: R. Ulusay, J.A. Hudson, ISBN: 978-975-93675-4-1, Kozan Ofset, Ankara, Turkey, p 613, 2007.
[23] ISRM, Rock Characterization, Testing and Monitoring – Commission on Standardization Laboratory and field Results. Suggested Methods for Determining Hardness and Abrasiveness of Rocks, Part 4, p:102-103, Pergamon, Oxford, 1981.
[24] N. Barton, V. Choubey, The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics, 10, 1-54, 1977. https://doi.org/10.1007/BF01261801.
[25] R.E. Goodman, Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks, 1976.
[26] N. Barton, E. Grimstad, The Q-system following twenty years of application in NMT support selection. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 32(5), 232A, 1995.
[27] E. Hoek, E. T. Brown, Empirical strength criterion for rock masses. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 106(9), 1013-1035, 1980. https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0001029.
[28] E. Hoek, P. K. Kaiser, W. F. Bawden, Support of Underground Excavations in Hard Rock, AA Balkema, Rotterdam. 1995.
[29] A. Palmstrom, The volumetric joint count- a useful and simple measure of the degree of jointing. 4th Int. Congress IAEG, New Delhi, 221–228, 1982.
[30] A. Palmstrom, Application of the volumetric joint count as a measure of rock mass jointing. Proceedings International Symposium on Fundamentals of Rock Joints, Sweden, 103- 110, 1985.
[31] A. Palmstrom, RMi-a system for characterizing rock mass strength for use in rock engineering. Journal of Rock Mechanics and Tunneling, Technique, India, L-2, 69- 108, 1996.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 248-252
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
Araştırma makalesi / Research article
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Yangının mod birleştirme analizi sonuçlarına etkisi

Effect of fire on mode superposition analysis results

Hakan Erdem[1,*], Emine Erdem[2]

[1] Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye
[2] Metropol İnşaat, Adana, Türkiye

Öz

Yapılarda meydana gelebilecek yangın nedeniyle zamana bağlı olarak artan yüksek sıcaklıklar oluşur. Betonarme yapıları oluşturan elemanların rijitlikleri ve kütleleri de bu yüksek sıcaklık nedeniyle etkilenir ve azalır. Yapının deprem kuvvetlerinin analizinde kullanılan yapının titreşim periyotları ve buna bağlı olarak hesaplanan birçok değer değişir. TS-EN 1992 1-2'de yüksek sıcaklığın malzeme özellikleri üzerindeki etkileri için verilen bağıntılar kullanılarak kütle ve rijitlik matrisleri yeniden oluşturulması gerekir. Bu çalışmada yapının kütlesi ve elastisite modülündeki sıcaklığa bağlı değişimler dikkate alınarak seçilen bir betonarme yapının birinci periyotlarındaki, yatay elastik tasarım spektral ivmelerindeki, taban kesme kuvvetlerindeki ve seçilen bir düğüm noktası için yer değiştirmelerindeki değişimler incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Yangın, Yüksek sıcaklık, Birinci periyot, Spektral ivme, Taban kesme kuvveti, Yer değiştirme

Abstract

High temperatures occur that increase over time due to the product emerging in buildings. The stiffness and mass of reinforced concrete structural elements also decrease over time due to this high temperature. Management voting periods used in the analysis of the earthquake forces of the structure and many values calculated accordingly are changing. You need to re-introduce the mass and stiffness matrices in the relations given in TS-EN 1992 1-2 for data on material properties at high temperature. Considering this regime and the temperature-dependent changes in the elastic modulus, in the first periods of a selected reinforced concrete maintenance, the changes in the extreme elastic design spectral accelerations, base shear forces and displacements for a selected node change.

Keywords: Fire, High temperature, First period, Spectral acceleration, Base shear force, Displacement

1 Giriş

Depreme maruz kalan yapılar, deprem öncesi ve/veya sonrasında yangına maruz kalmış olabilir. Bu yapılara artçı depremler veya yeni depremler yeniden etki edebilir. Yangının neden olduğu hasar bazen depremin neden olduğu hasardan çok daha ağır olabilmektedir [1]. 1906 San Francisco, 1994 Northridge, 1995 Kobe ve 2011 Kesennuma depremleri deprem sonrası oluşan yangınların, depremin kendisinden bile daha büyük felaketlere sebep olabileceğini göstermiştir [2]. 1906 San Francisco depreminde 12 km^2 alan içerisinde 28000 bina hasar görmüş ve 3000 kişiden fazla kişi ölmüştür. Bu depremde, deprem sonrası yangından kaynaklanan kaybın yer hareketinden 10 kat daha fazla olduğu tahmin edilmektedir [3]. 1923 yılındaki Tokyo depreminde ise 575000 bina hasar görmüş ve 140000 insan ölmüştür. Bunların %77'sinin yangından kaynaklandığı belirtilmiştir [4].

Yangına maruz kalan betonarme yapı elemanlarının dayanımı ve yüksek sıcaklığın etkileri üzerine bazı çalışmalar yapılmıştır [5-7]. Yangının betonarme yapıların dinamik davranışlarına etkileri üzerine ise literatürde bazı çalışmalar da mevcuttur [8-11].

Bu çalışmada önce seçilen bir yapı için, ISO 834'de verilen bağıntı ile zamana bağlı oluşan yüksek sıcaklıklar hesaplanmıştır. Sonrasında hesaplanan sıcaklıklar için yapının rijitliği ve kütlesindeki değişimler TS-EN 1992 1-2 'de verilen bağıntılar ile hesaplanmış ve yapının Sap2000 ile modal ve dinamik analizi yapılmıştır. Seçilen yapı için farklı sıcaklık değerlerinde, elastisite modülündeki ve kütledeki değişim dikkate alınarak yapının birinci periyotlarındaki, yatay elastik spektral ivmelerindeki, taban kesme kuvvetlerindeki ve seçilen bir düğüm noktasındaki yer değiştirmelerin değişimleri incelenmiştir.

2 Materyal ve metot

Yapı sisteminin mod şekilleri ve titreşim periyotları, dış yükün olmadığı sönümsüz serbest titreşim durumundaki hareket denkleminin çözümünden elde edilir.

$$[m]\{\ddot{x}\} + [k]\{x\} = \{0\} \quad (1)$$

Serbest titreşim hareketi basit harmonik bir harekettir ve sinüs fonksiyonu ile ifade edilir. Bu durumda yer değiştirmeler $\{x\}$ aşağıdaki denklem ile elde edilir.

$$\{x\} = \{A\}sin(\omega t) \quad (2)$$

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: herdem@ohu.edu.tr (H. Erdem)
Geliş / Recieved: 29.09.2023 Kabul / Accepted: 29.11.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngmuh.1368595

Bu denklemde $\{A\}$ hareketin genlik vektörünü ve ω açısal frekansı göstermektedir. $\{x\}$ kullanılarak ivme $\{\ddot{x}\}$ ifadesi elde edilir ve hareket denklemi içerisinde yerlerine yazılırsa öz değer problemi elde edilir.

$$-\omega^2[m]\{A\} + [k]\{A\} = \{0\} \quad (3)$$

$$\{A\}([k]-\omega^2[m]) = \{0\} \quad (4)$$

Elde edilen homojen lineer denklem sisteminin sıfırdan farklı bir çözümünün olması katsayılar matrisinin determinantının sıfır olması ile mümkündür.

$$|\,[k]-\omega^2[m]\,| = \{0\} \quad (5)$$

Determinantın açılımının yapılması durumunda i. dereceden bir polinom elde edilir. Bu polinomun kökleri ω_i^2 öz değerleri verir. Sonuç olarak çok serbestlik dereceli bir sistemde çözüm sonucu serbestlik derecesi kadar açısal frekans ω_n ve titreşim periyodu T_n elde edilir.

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (6)$$

Mod birleştirme yönteminde her bir modun katkısı kullanılarak taban kesme kuvvetleri ve diğer parametreler hesaplanır.

2.1 Sıcaklığın zamana göre değişimi

Yangınların neden olacağı sıcaklığın belirlenmesinde yangının gerçekleştiği ortama göre değişen farklı modeller kullanılmaktadır. Yangının ürettiği sıcaklığın zamana göre değişiminin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan yangın modellerinden ISO834'de verilen sıcaklık-zaman eğrisi,

$$T = T_0 + 345\log(8t + 1) \quad (7)$$

şeklinde ifade edilmektedir [12]. Burada T_o santigrat cinsinden ortam sıcaklığını, t ise dakika cinsinden yangın etkime süresini tanımlamaktadır.

2.2 Beton elastisite modülünün sıcaklıkla değişimi

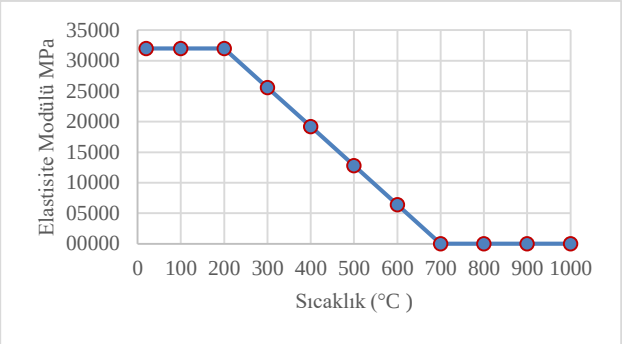
Elastisite modülünün değeri 200°C'ye kadar değişmezken, sıcaklığın artmasıyla azalmaya başlar. Bu değişimi ifade etmek TS-EN 1992-1-2'de verilen bağıntı kullanılabilir (Şekil 1) [13]:

$$E_{cT} = E_{c\,20°C} \qquad 20°C \le T \le 200°C \quad (8)$$

$$E_{cT} = \frac{(700 - T)}{500} E_{c\,20°C} \qquad 200°C < T \quad (9)$$

2.3 Yoğunluğun yüksek sıcaklıkla değişimi

Sıcaklığa bağlı olarak betondaki serbest su moleküllerinin buharlaşması sonucu betonun yoğunluğu azalır. Yoğunluğun sıcaklığa bağlı değişimi için TS-EN 1992-1-2'de bağıntılar verilmiştir [13]. Yoğunluğun 115°C'ye kadar değişmediği sıcaklığın artmasıyla ise değerinin bir miktar azaldığı görülmektedir (Şekil 2).



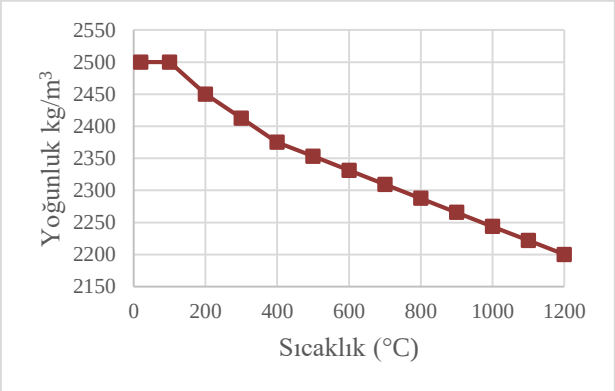
Şekil 1. Zamana bağlı sıcaklığın değişimi

$$\rho_T = \rho_{20°C} \qquad 20°C \le T \le 115°C \quad (10)$$

$$\rho_T = \rho_{20°C}\left[1 - 0.02\frac{T - 115}{85}\right] \qquad 115°C < T \le 200°C \quad (11)$$

$$\rho_T = \rho_{20°C}\left[0.98 - 0.03\frac{T - 200}{200}\right] \qquad 200°C < T \le 400°C \quad (12)$$

$$\rho_T = \rho_{20°C}\left[0.95 - 0.07\frac{T - 400}{800}\right] \qquad 400°C < T \le 1200°C \quad (13)$$



Şekil 2. Yoğunluğun sıcaklığa bağlı değişimi

2.4 Yatay elastik tasarım spektral ivmesi

TBDY, gözönüne alınan herhangi bir deprem yer hareketi düzeyi için yatay elastik tasarım ivme spektrumunun ordinatı olan yatay elastik tasarım spektral ivmesi $S_{ae}(T)$, doğal titreşim periyoduna bağlı olarak yerçekimi ivmesi $[g]$ cinsinden tanımlanmıştır [14].

$$S_{ae}(T) = \left(0.4 + 0.6\frac{T}{T_A}\right) S_{DS} \qquad 0 \le T \le T_A \quad (14)$$

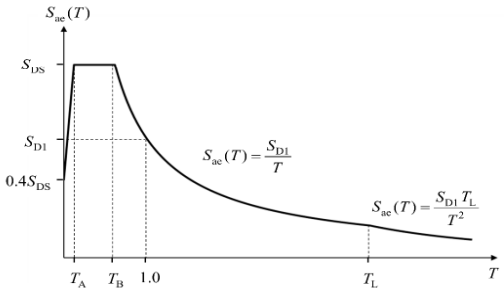
$$S_{ae}(T) = S_{DS} \qquad T_A \le T \le T_B \quad (15)$$

$$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1}}{T} \qquad T_B \le T \le T_L \quad (16)$$

$$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1}T_L}{T^2} \qquad T_L \le T \quad (17)$$

Burada S_{DS} ve S_{D1} tasarım spektral ivme katsayılarını, T ise doğal titreşim periyodunu göstermektedir. Yatay tasarım spektrumu köşe periyotları T_A ve T_B, S_{DS} ve S_{D1}'e bağlı olarak tanımlanır. Sabit yer değiştirme bölgesine geçiş periyodu $T_L = 6sn$ alınır.

Şekil 3'den görüleceği üzere maksimum ivme spektrumu yapının periyodunun, T_A ve T_B aralığında bulunması durumunda gerçekleşmektedir.



Şekil 3. Yatay elastik tasarım ivme spektrumu

$$T_A = 0.2\frac{S_{D1}}{S_{DS}} \tag{18}$$

$$T_B = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \tag{19}$$

Yatay elastik tasarım spektral ivmesi $S_{ae}(T)$, doğal titreşim periyodu, yapının enlem boylam bilgileri, deprem yer hareketi düzeyi ve yapının zemin sınıfına bağlı olarak belirlenir. Deprem kuvveti de bu değer kullanılarak hesaplanacak azaltılmış tasarım spektral ivmesi $S_{aR}(T)$ ile hesaplanır.

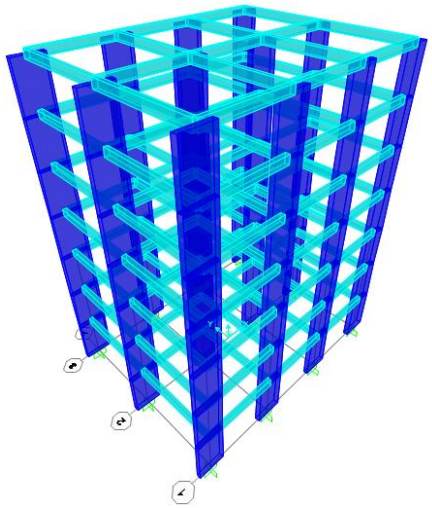
3 Bulgular ve tartışma

Yangın nedeniyle oluşan sıcaklıktaki artış malzemenin elastisite modülünün ve kütlesinin azalmasına neden olur. Yapının modal analizi sonucu elde edilen periyotlar da buna bağlı olarak değişir. Periyotların ve kütlelerin değişmesi mod birleştirme yönteminde her bir modun taban kesme kuvvetine katkısının alınması ile hesaplanan yapıya etkiyecek taban kesme kuvveti değerlerinin de değişmesine neden olur. Deprem kuvvetlerinin değişmesi de yapının yapacağı yer değiştirmelerin değerlerini etkiler.

Bu çalışmada Şekil 4'de verilen yapının, yüksek sıcaklığa bağlı olarak azalan elastisite modülü ve birim hacim ağırlığı değerleri kullanılarak Tablo 1'deki değerler kullanılarak modal ve dinamik analizi Sap2000 programı ile yapılmıştır. Yapının bütün katlarında, her elemana aynı sıcaklığın etkidiği kabul edilmiştir.

İncelenen yapı her biri 3m olan 7 kata, x yönünde 5m olan üç açıklığa ve y yönünde 6m olan iki açıklığa sahiptir. Ara katlardaki kirişlere $10\,kN/m$ sabit yük, $5\,kN/m$ hareketli yük, son kattaki kirişlere ise $5\,kN/m$ sabit yük ve $5\,kN/m$ hareketli yük etkimektedir. C30/37 betonundan yapılmış olan kirişler $25/50cm$, perdeler ise $180/30cm$ boyutlarındadır. Etkin kesit rijitliği çarpanı perde için 0.50, kiriş için ise 0.35 olarak alınmıştır.

Yapının zemin sınıfı ZC, kullanım amacı konuttur. Yapı 37.977862° enlem 34.652006° boylamda bulunmaktadır. Deprem yer hareketi düzeyi DD2 seçilmiştir.

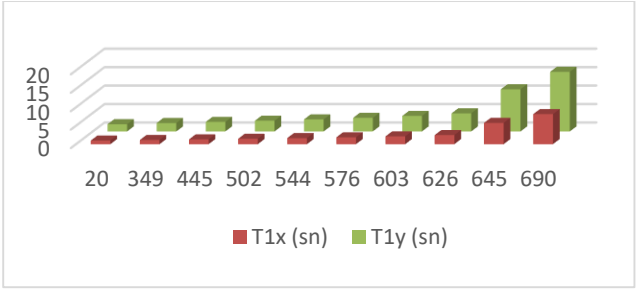


Şekil 4. Analiz edilen yapı

Tablo 1. Elastisite modülünün ve birim hacim ağırlığının sıcaklıkla değişimi

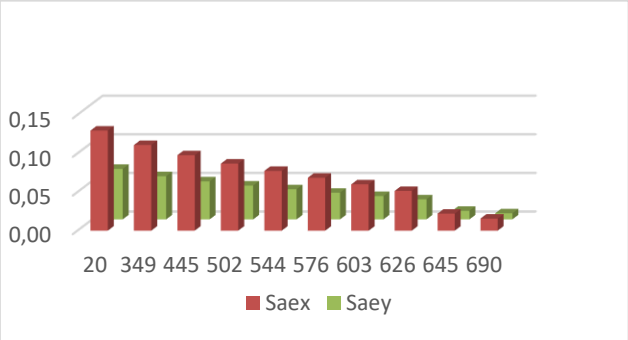
t (dakika)	T (°C)	E_c (MPa)	γ ($\frac{kN}{m^3}$)
0	20	32000	25.00
1	349	22450	23.94
2	445	16352	23.65
3	502	12653	23.53
4	544	9991	23.44
5	576	7910	23.36
6	603	6200	23.31
7	626	4750	23.26
8	645	3491	23.19
…	690	640	23.12
…	695	320	23.10
12	705	0	23.08

Yapının periyotları modal analiz ile elde edilmiş, x ve y doğrultularına ait birinci periyotlar farklı sıcaklık değerleri için Şekil 5'de verilmiştir. Yapı x doğrultusunda y'ye göre daha rijit olduğundan, x yönüne ait periyotlar y'ye göre daha küçük değere sahiptir.



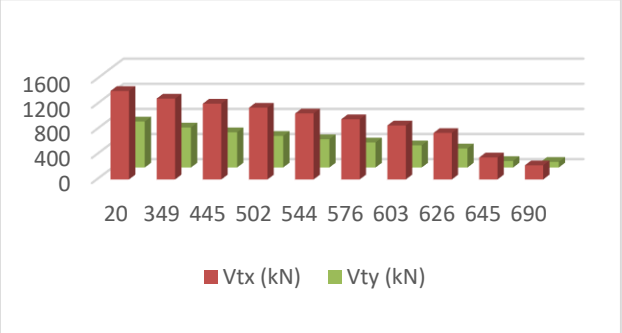
Şekil 5. Yapının x ve y doğrultularında birinci periyotlarının sıcaklığa bağlı değişimleri

Yapının x ve y yönlerinde yapının elastik yatay spektral ivme katsayıları hesaplanmış ve farklı sıcaklık değerleri için değişimleri Şekil 6'de verilmiştir.



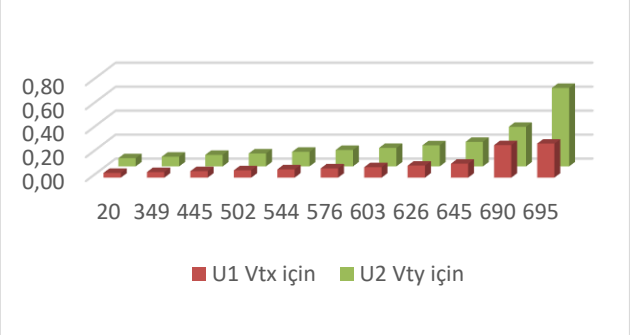
Şekil 6. Yapının elastik yatay spektral ivme katsayılarının sıcaklığa bağlı değişimleri

Yapının x ve y yönlerinde EX ve EY deprem yüklemelerinde geçerli taban kesme kuvvetleri hesaplanmış ve farklı sıcaklık değerleri için değişimleri Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Yapının taban kesme kuvvetlerinin sıcaklığa bağlı değişimleri

Yapının x ve y yönlerinde EX yüklemesi için U1 ve EY yüklemesi için U2'deki değişimler yapının son katında seçilen bir düğüm noktası için hesaplanmış ve farklı sıcaklık değerleri için değişimleride Şekil 8'da verilmiştir.



Şekil 8. EX ve EY deprem yüklemesi için seçilen düğüm noktasında sıcaklığa bağlı x ve y doğrultularında yer değiştirmeler

4 Sonuçlar

Yapılarda teknik nedenler, kullanıcı hataları ve deprem gibi değişik nedenlerle yangın meydana gelebilmektedir. Yapıyı oluşturan elemanların bazı özelliklerinde değişimler olabilmektedir. Bu çalışmada elastisite modülü ve kütledeki değişim dikkate alınarak yapının sap2000 programı ile modal ve dinamik analizleri farklı sıcaklık değerleri için yapılmış ve elde edilen değerler incelenmiştir.

İncelenen yapı, rijitliğin etkisini görebilmek için bir doğrultuda diğer yöne göre daha rijit oluşturulmuştur. Betonun elastisite modülünün azalması yapı rijitlik matrisinin, kütlesinin azalması da kütle matrisinin değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Sıcaklığın artmasıyla kütledeki azalmanın etkisi, rijitliğin azalmasındakine göre çok düşük kaldığından yapının periyotlarının değerleri artmıştır. İvme değerleri ve buna bağlı olarak da taban kesme kuvvetleri, yapının birinci periyotlarının T_B 'den daha büyük olması nedeniyle sıcaklık artışıyla azalmıştır. Ancak yapının yatay yer değiştirmeleri sıcaklığa bağlı olarak rijitlikteki azalma nedeniyle sıcaklık artışıyla artmıştır. Yer değiştirmelerin artması yapıda bazı düzensizlikler oluşumuna neden olabilir. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, yüksek sıcaklık artışlarının yapısal düzensizliklere etkisi ve farklı katlarda yangın etkime durumları incelenebilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %18

Kaynaklar

[1] S. Chen, G.C. Lee and M. Shinozuka, Hazard mitigation for earthquake and subsequent fire. ANCER Annual Meeting: Networking of Young Earthquake Engineering researchers and Professionals, Honolulu, Hawaii, 2004.

[2] J. Mohammadi, S. Alysian, Analysis of post-earthquake fire hazard, Tenth World Conference Earthquake Engineering, Chicago, 1992.

[3] J Charles Scawthorn, Fire following earthquakes, Earthquake Engineering Handbook, W.F. Chen (editör), 2003.

[4] T. Usami, N. Higai and J. Soran, List of damaging Japanese earthquakes, University of Tokyo Press, Tokyo, 1996.

[5] H. Erdem, Prediction of the moment capacity of reinforced concrete slabs in fire using artificial neural networks, Advances in Engineering Software, 41(2), 270-276, 2010. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.07.006.

[6] H. Erdem, Predicting the moment capacity of RC beams exposed to fire using ANNs, Construction and Building Materials, 101(1), 30-38, 2015. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.049.

[7] E. Güvenç, Kolonların taşıma gücü kapasitesi üzerinde yangının etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 2019.

[8] E. Yılmaz, Yangına maruz kalan betonarme yapının dinamik davranışı. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 2022.
[9] H. Erdem ve E. Erdem, Yangının betonarme yapının birinci periyotlarına etkisi. 23. Ulusal Mekanik Kongresi, Konya Teknik Üniversitesi, 04-08 Eylül 2023.
[10] H.R. Ronagh, and B. Behnam, Investigating the effect of prior damage on the post-earthquake fire resistance of reinforced concrete portal frames, International Journal of Concrete Structures and Materials, 6(4), 209–220, 2012. https://doi.org/10.1007/s40069-012-0025-9
[11] H.O. Şentürk, Betonarme binalarda depremlerin ve yangınların binaya etkisinin incelenmesi ve bir uygulama örneği. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
[12] SO834, Fire resistance tests elements of building construction Part 1–9. International Standards Organisation, Geneva, 1975.
[13] TS-EN 1992-1-2, Betonarme Yapıların Tasarımı-Bölüm 1-2: Genel Kurallar-Yapısal Yangın Tasarımı (Eurocode2), Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, 2006.
[14] TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Yürürlülük tarihi: Ocak 2019, 416 sayfa, 2018.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 253-261
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
Araştırma makalesi / Research article
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Kesikköprü baraj gölü havzası yayılı kirlilik kaynaklarının ve kirlilik yüklerinin tahmini

Estimating of non-point pollution sources and pollution loads in Kesikköprü reservoir basin

Kağan Cebe[1,*], Olcay Gülçiçek Uysal [2]

[1] *Ondokuz Mayıs Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye*
[2] *Mersin Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye*

Öz

Bu çalışmanın amacı Kesikköprü baraj gölü havzasında yayılı kirlilik kaynaklarının belirlenmesi ve yayılı kaynaklardan yüzey akışları ile rezervuara taşınan kirlilik miktarının tahmin edilmesidir. Kesikköprü baraj gölündeki su kalitesi, çevresindeki havzadaki yayılı kirlilik kaynaklarından gelen yüklerden olumsuz etkilenmektedir. Bu kaynaklar, arazi kullanım uygulamaları (tarım alanları, kentsel alanlar, çayırlar, meralar ve doğal bitki örtüsü alanları), tarımsal faaliyetler için gübre kullanımı, hayvancılık faaliyetleri, bireysel sızdırmalı fosseptikler ve atmosferik birikimlerden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Yayılı kaynaklardan göle ulaşan kirliliği tahmin etmek için Kesikköprü baraj gölünün mevcut havza sınırları içerisindeki alt havzaların sınırları sayısal yükseklik haritaları kullanılarak oluşturulmuştur. Alt havzalardaki yayılı kaynaklardan gelen toplam azot (TN) ve toplam fosfor (TP) kirlilik yükleri 2022 yılı için hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçların alansal dağılımları ArcGIS 10.8 Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) yazılımı kullanılarak oluşturulan dijital haritalar halinde sunulmuştur. Yayılı kirlilik yüklerinin, alt havzalar içerisinde en büyük alana sahip olan ve antropojenik faaliyetlerin yoğun olarak yürütüldüğü KAH-10 ve KAH-2 alt havzalarında diğer alt havzalara kıyasla daha fazla miktarda oluştuğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Su kalitesi, Kirlilik, Yayılı kirlilik Kaynakları, Havza, CBS,

Abstract

The purpose of this study is to determine non-point pollution sources in the Kesikköprü Reservoir basin as well as to estimate the amount of pollution carried into the reservoir by surface flows from non-point sources. Water quality at the Kesikköprü reservoir has been negatively affected by nutrients from non-point pollution sources in the surrounding basin. These sources are identified as actions caused by land use practices (agricultural areas, urban zones, meadows, pastures, and natural vegetation areas), fertilizer use for agricultural activities, livestock activities, leaks from individual septic tanks, and atmospheric deposition in the basin. To estimate the pollution from non-point sources, sub-basin boundaries were established by using digital elevation maps within the existing basin boundaries of Kesikköprü Reservoir. The pollution loads namely, total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) from non-point sources in sub-basins are calculated for the year of 2022. The areal distributions of the obtained results are presented as digital maps generated by using ArcGIS 10.8, a Geographic Information System (GIS) software. Non-point pollution loads have been found to occur to a greater extent in the KAH-10 and KAH-2 sub-basins, which have the largest areas among the sub-basins and have a high intensity of anthropogenic activities, in comparison to other sub-basins.

Keywords: Water quality, Pollution, Non-point pollution sources, Basin, GIS

1 Giriş

Göl suyu kalitesini değerlendirmede havzaların rolü oldukça önemlidir. Aşırı besin girdileri göllerde ötrofikasyona neden olarak su kalitesinin ve ekolojik bütünlüğün bozulmasına sebep olabilmektedir. Göl suyu kalitesi değerlendirmede fosfor ve azot konsantrasyonları sınırlayıcı element olarak değerlendirilir [1].

Birçok kirletici türü kentsel, endüstriyel ve tarımsal alanlardan yüzey sularına girmektedir. Tarıma elverişli alanların kullanılması nedeniyle, tarımsal faaliyetler besinlerin ve zararlı kimyasalların ana sağlayıcısıdır [2]. Bu da göl suyu kalitesinin hızla bozulmasına neden olmaktadır. Antropojenik kaynaklardan kaynaklanan kirlilik miktarı dünyanın bazı bölgelerinde artmakta ve yüzey sularındaki doğal azot ve fosfor yüklerini büyük ölçüde aşmaktadır [3].

Araştırmacılar geleneksel olarak göl içi süreçlerin çalışmasına odaklanmışlardır ancak besin kirliliğinin başarılı bir şekilde önlenmesi, gölleri ve havzalarını birbirine bağlayan bağlantıların doğasına bağlıdır [4]. Son yıllarda nehirlerin ve göllerin su kalitesi üzerindeki havza etkisine ilgi olduğunu gösteren birçok çalışma bulunmaktadır [5,6,7].

Antropojenik kirliliğe sebep olan kirletici kaynaklarının çoğu yayılı kirlilik kaynakları sınıfına girmektedir. Yayılı kirlilik kaynakları ise belirli ve tek bir kaynağı olmayan, yayılmış durumdaki atıklardan kaynaklanan kirleticiler olarak değerlendirilmektedir. Yoğun yerleşim yerlerinin ya

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: kagan.cebe@omu.edu.tr (K. Cebe)
Geliş / Recieved: 05.09.2023 Kabul / Accepted: 04.12.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1355285

da endüstriyel alanların olmadığı bölgelerde su kütleleri etkileyen kirleticilerin büyük çoğunluğu arazi kullanımı, tarım ve hayvancılık gibi yayılı kaynaklardan su kütlesine ulaşan kirleticilerdir.

Bu çalışmada, Ankara ve Kırşehir il sınırında yer alan Kesikköprü baraj gölünün su kalitesini etkileyebilecek bölge yayılı kirlilik kaynakları ortaya konulmuş ve göl suyu kalitesinde belirleyici parametre olan fosfor ve azot için mevcut kirlilik yükleri hesaplanmıştır. Bölgede yerleşim birimlerinin seyrek ve düşük nüfuslu olması ve göle herhangi bir noktasal kaynaktan boşaltım yapılmaması sebebiyle noktasal kaynaklar bu çalışma dışında tutulmuştur. Hesaplanan yüklerin alansal dağılımını gösteren tematik haritalar bir CBS programı olan ArcGIS 10.8 yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur.

1966 yılında enerji üretimi ve sulama amaçlı inşa edilen Kesikköprü Barajı, 2014 yılından itibaren Ankara'ya içme suyu sağlamaktadır ve artan su talebi nedeniyle gelecekte de içme suyu temininde kullanılması planlanmaktadır. Bu nedenle baraj gölünü besleyen havzadaki kirlilik kaynaklarının araştırılması ve tespit edilen kirlilik kaynaklarından göle taşınan yüklerin azaltılması için gerekli tedbirlerin alınması önemlidir. Daha önce baraj gölünün su kalitesi durumunu izlemek ve tespit etmek için bazı çalışmalar yapılmıştır, ancak gölün su kalitesini etkileyen kirlilik kaynaklarında ortaya çıkan kirletici miktarlarının tahmini amacıyla herhangi bir çalışma yapılmamıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 Çalışma alanı ve alt havzaların belirlenmesi

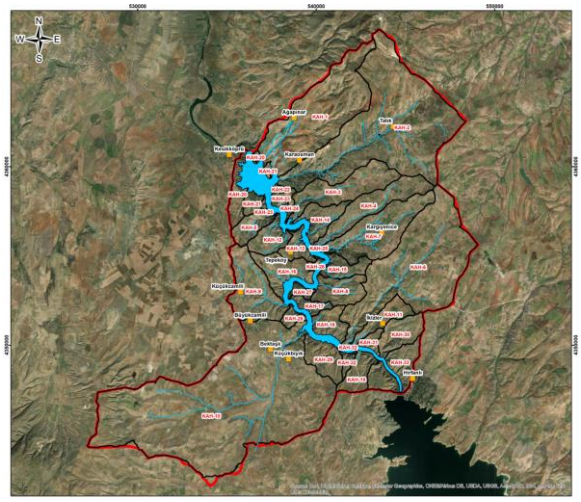
İç Anadolu Bölgesi'nin doğusunda yer alan Kızılırmak havzası, Türkiye'nin ikinci en büyük havzasıdır. 1151 km'lik uzunluğu ile Türkiye akarsularının en uzunu olan Kızılırmak, 82181 km²'lik bir drenaj alanına sahiptir [8].

Kızılırmak nehri üzerinde kurulu 11 barajdan biri olan Kesikköprü Barajı, Ankara'nın güney doğusunda bulunmakta olup, Ankara iline 120 km uzaklıktadır.

Başlangıçta yalnızca enerji üretmek amacıyla planlanan baraja, sonradan sulama suyu da eklenmiştir. 1995 tarihli Ankara Su Temin Projesi Master Planı'nda Ankara ilinin gelecekteki içme-kullanma suyu ihtiyacının Kızılırmak üzerinde bulunan Kapulukaya Barajı'ndan karşılanması önerilmiş ancak barajdaki kirlilik nedeniyle, 2000 yılında içme suyunun Kesikköprü Barajı'ndan alınması kararlaştırılmış ve 2014 yılından itibaren baraj gölünden içme suyu temini gerçekleştirilmektedir. Mevcut durumda baraj, enerji üretimi, sulama suyu ve içme suyu temini amacıyla işletilmektedir.

Kesikköprü baraj gölü havzası, 82181 km²'lik yağış alanına sahip Kızılırmak Havzası sınırlarında yer alan ve bu havzanın en batısında bulunan 22264.5 km²'lik yağış alanına sahip Orta Kızılırmak alt havzası sınırları içerisinde yer almaktadır. Kesikköprü baraj gölü havzasının yer aldığı çalışma alanı toplam 252 km²'dir. Çalışma alanının 104.92 km²'lik kısmı Ankara il sınırları içerisinde, Bala ve Şereflikoçhisar ilçelerinde, 138.84 km²'lik kısmı ise Kırşehir il sınırları içerisindeki Kaman ilçesinde, 8.66 km²'lik kısmı ise Kırıkkale il sınırları içerisindeki Çelebi ilçe sınırı içerisinde kalmaktadır.

Havzada su kalitesini etkileyen, yayılı kirletici kaynaklı baskıların, etkilerini ve risklerini belirleyip değerlendirmek için baraj gölü havzası, bölgenin topografik yapısına bağlı olarak alt havzalara bölünmüştür (Şekil 1).



Şekil 1. Kesikköprü baraj gölü alt havzaları

Alt havza sınırlarının oluşturulmasında 1/25000 ölçekli topoğrafik haritada bulunan, Kesikköprü baraj gölü havza sınırlarındaki akarsu kolları temel alınmıştır. Sürekli ve mevsimsel akan akarsu kolları ile baraj gölünü besleyen alt havzalar oluşturulmuştur. Alt havzaları oluşturmak için öncelikle; 1/25000 ölçekli topoğrafik haritada Kesikköprü Barajı havza sınırında yer alan sürekli ve mevsimsel akan, tüm akarsu kolları CBS ortamında sayısallaştırılmıştır. ArcGIS 10.8 sürümünün alt aracı Arc/Hydrology kullanılarak, bu akarsu kollarını besleyen mikro alt havzalar oluşturulmuştur. Baraj gölünü besleyen akarsu kollarının beslenme alanları, membadan mansaba doğru sıralanarak birleştirilmiştir [9,10]. Oluşturulan alt havza sınırları, kısa kodlama ile adlandırılmıştır. Havzaların büyüklükleri ve alt havzada kalan yerleşim yerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Alt havza kodları ve alanları

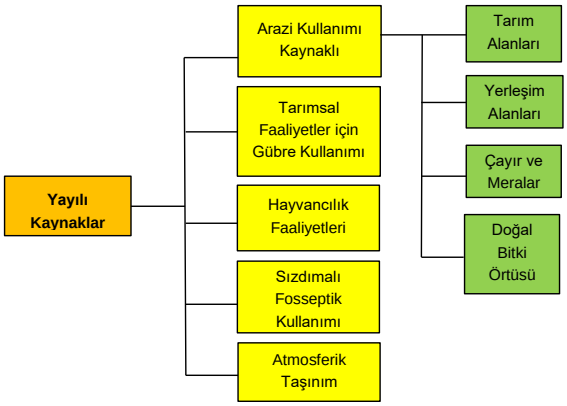
Alt havza kodu	Alt havzada kalan yerleşim yerleri	Alanı (ha)	Alt havza kodu	Alt havzada kalan yerleşim yerleri	Alanı (ha)
KH-1	Ağapınar (Karaosman)	2053	**KH-17**	-	132
			KH-18	-	280
KH-2	Büğüz, Tatık	3765	**KH-19**	-	297
KH-3	-	800	**KH-20**	-	271
KH-4	-	710	**KH-21**	-	147
KH-5	-	267	**KH-22**	-	23
KH-6	-	2782	**KH-23**	-	131
KH-7	Kargınyenice	1084	**KH-24**	-	41
KH-8		419	**KH-25**	-	6
KH-9	Küçükcamili	838	**KH-26**	-	41
KH-10	Büyükcamili, Bektaşlı, Küçükbıyık	6527	**KH-27**	-	87
			KH-28	-	102
			KH-29	-	384
KH-11	İkizler	295	**KH-30**	-	386
KH-12	-	310	**KH-31**	-	104
KH-13	-	208	**KH-32**	-	84
KH-14	-	337	**KH-33**	-	519
KH-15	Tepeköy	261	**TOPLAM**		**24138**
KH-16	-	447			

2.2 Yayılı kirletici kaynakların belirlenmesi

Kesikköprü Baraj Gölü Havzası'nda arazi kullanımı (tarım alanları, kentsel yerleşim, çayır-mera ve orman alanları), tarımsal faaliyetler için gübre kullanımı, hayvancılık faaliyetleri, sızdırmalı fosseptik ve atmosferik taşınım başlıca yayılı kirlilik kaynakları olarak kabul edilmiştir (Şekil 2).

2.2.1 Arazi kullanımı

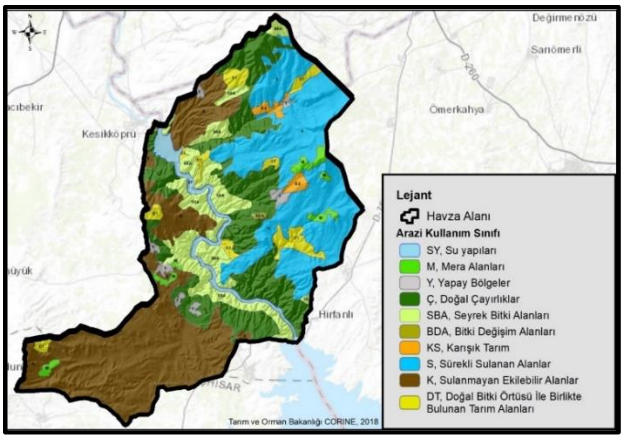
Arazi kullanımından kaynaklanan yayılı kirlilik yüklerini hesaplamak için Tarım ve Orman Bakanlığı, Tarım Reformu Genel Müdürlüğü'nden elde edilen arazi kullanımlarını gösteren Şimdiki Arazi Kullanım (SAK) verileri ile CORINE 2018 yılı (CORINE) alansal verileri karşılaştırılmıştır. SAK ve CORINE verilerine göre ayrı ayrı yapılan hesaplamalar sonucu tarım alanları arazi kullanımından kaynaklanan kirlilik yükleri için CORINE verileri kullanılarak yapılan hesaplamalarda daha yüksek değerler elde edilmiştir. Bu nedenle bu çalışmada arazi kullanımı kaynaklı yayılı yükler için CORINE verilerine göre hesaplanan yayılı kirlilik yükleri kullanılmıştır.



Şekil 2. Havzadaki yayılı kirlilik kaynakları

CORINE, Avrupa Çevre Ajansı kriterlerine göre, uydu görüntüleri kullanılarak çevre koruma amaçlı, çevrenin izlenmesine yönelik arazi örtüsü veya arazi kullanımındaki değişikliklerin uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri yardımıyla tespit edilmesi amacıyla başlatılmış ve Türkiye dâhil 29 Avrupa ülkesinin üye olduğu bir projedir. CORINE, 44 sınıftaki arazi örtüsü envanterinden oluşmaktadır. Çalışmada, alansal kullanımlar için 25 ha minimum haritalama birimi ve doğrusal haritalandırma için minimum 100m genişlik kullanılmaktadır [11]. Kesikköprü Baraj Gölü Havzası CORINE 2018 Arazi Kullanım Haritası Şekil 3'te gösterilmektedir.

CORINE ana sınıflarından 2- Tarım Alanları başlığı altında bulunan tüm alanların toplamı, "Tarım Alanı" olarak, "2.3 Meralar ve 3.2 Maki ve Otsu Bitkiler" başlığı altındaki alt sınıfların alanları toplamı "Çayır ve Mera Alanı" olarak değerlendirilmiştir. CORINE ana sınıflarından 1-Yapay Bölgeler başlığı altında bulunan tüm alanların toplamı ise "Yerleşim Alanı" Kesikköprü Baraj Gölü Havzası içerisinde doğal bitki örtüsü "Orman" olarak değerlendirilebilecek alanlar, Hirfanlı Baraj gövdesinin doğusunda kalan ve santral arazisi içerisinde sonradan ağaçlandırma yapılan arazi ve Kesikköprü Baraj gövdesinin batısında ve Kesikköprü Mahallesi'nin güneyinde kalan, sonradan ağaçlandırma yapılan araziler olarak sıralanabilir.



Şekil 3. Kesikköprü baraj gölü havzası CORINE 2018 arazi kullanım haritası

Ağaçlandırma yapılan iki arazide de Kızılçam (Pinus brutia) dikimi yapılmıştır. Her iki arazinin toplam alanı 111 ha olarak hesaplanmıştır. Bu oran, 25200 ha büyüklüğündeki havza sınırları içerisinde oldukça küçük bir alanı temsil etmektedir. CORINE 2018 verileri içerisinde bu dikim sahaları gösterilmemiştir. Bu nedenle bahsi geçen alanlar CORINE verilerinde tanımlandığı gibi değerlendirilmiştir. CORINE 2018 yılı verilerinde bölgenin doğal bitki örtüsünü (orman) tanımlayan Doğal Çayırlıklar, Bitki Değişim Alanları ve Seyrek Bitki Alanları; Çayır (otlaklar) ve Mera Alanı olarak değerlendirilmiştir. Arazi kullanımı kaynaklı kirletici miktarı benzer çalışmalarda [12,13] kullanılan birim değerlere göre hesaplanmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Arazi kullanımı kaynaklı kirlilik yükleri

Yayılı kaynak	Birim yük (kg/ha.yıl)	
	TN	TP
Yerleşim alanı	3.00	0.50
Tarım alanı	9.50	0.90
Çayır ve mera alanı	5.00	0.10

2.2.2 Tarımsal gübre kullanımı

Kesikköprü Baraj Gölü Havzası'nda yürütülen tarımsal faaliyetler, havzanın en önemli geçim kaynaklarından birisini oluşturmaktadır. Tarım alanlarında kullanılan gübreler toprağın yapısına, yetiştirilen bitkiye ve bölgenin iklimine bağlı olarak değişmektedir. Gübre kullanımından sonra kullanılan gübre ekilen bitkilerin bünyesine alınmakta ancak bir kısmı yağışlarla birlikte eriyerek süzülüp yeraltı suyuna karışabilmekte ya da yüzeysel akışla birlikte su kaynaklarına ulaşabilmektedir. Sızma ve yüzeysel akış sebebiyle oluşan bu kayıpların hesaplanmasında gübrede bulunan besin maddelerinin (azot ve fosfor) bitkilerin bünyesine alınma oranları önemlidir. Bünyeye alınma oranları da toprağın yapısına, yetiştirilen bitkiye ve bölgenin iklimine bağlı olarak değişmekle birlikte azot için %40-80, fosfor için %5-20 arasındadır. Sızma ve yüzeysel akış ile

oluşan kayıplar ise uygulanan gübrenin bünyesinde bulunan toplam azot miktarının %5-30'u, fosfor miktarının ise %0.5-5'i arasındadır [13,14,15].

2.2.3 *Hayvancılık faaliyetleri*

Kesikköprü Baraj Gölü Havza'sında büyük ölçekli hayvancılık işletmeleri bulunmamaktadır. Genellikle bölgede yaşayan bireylerin kendi ahır ve kümeslerinde besledikleri hayvanlar, bölgedeki hayvancılık faaliyetlerini oluşturmaktadır. Baraj Gölü Havzası içerisindeki yerleşim yerlerinde bulunan büyükbaş, küçükbaş, kümes hayvan sayıları İlçe Tarım ve Orman Müdürlükleri'nden elde edilmiştir. Hayvancılık faaliyetlerinden kaynaklanan yayılı yüklerin hesaplanmasında literatürden elde edilen birim kirlilik yükleri kullanılarak hesaplanmıştır. Ortalama besi hayvanı ağırlıkları kümes hayvanları için 2kg, küçükbaş hayvanlar için 45kg ve büyükbaş hayvanlar için 500kg alınmıştır. Hayvancılık faaliyetlerinde yüzeysel sulara karışan kirlilik oranları azot parametresi için %10, fosfor parametresi için %2.5 olarak alınmıştır [12,13,16,17].

2.2.4 *Sızdırmalı fosseptik kullanımı*

Kesikköprü Baraj Gölü Havzası içerisinde bulunan yerleşim yerlerinden Kesikköprü Mahallesi'nin atık suları Kesikköprü Paket Atıksu Arıtma Tesisinde arıtılmaktadır. Bunun dışında kalan (İkizler köyü hariç) yerleşim yerlerinin tamamında merkezi fosseptik yapısı bulunmaktadır. Ancak İkizler köyünde merkezi fosseptik sistemi bulunmamaktadır ve evsel atıksular sadece ferdi fosseptikler ile bertaraf edilmektedir. Bu nedenle sadece İkizler köyündeki ferdi fosseptikler yayılı kirlilik kaynakları olarak değerlendirilmiştir. 20.03.2010 tarihli Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği'ne [18] göre nüfusa bağlı atıksu oluşumu ve kirlilik yüklerinin değişimi Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Nüfusa bağlı atıksu oluşumu ve kirlilik yüklerinin değişimi [18]

Nüfus Aralığı	Atısu (L/kişi-gün)	KOİ (g/kişi-gün)	BOİ (g/kişi-gün)	AKM (g/kişi-gün)	TN (g/kişi-gün)	TP (g/kişi-gün)
2000-10000	80	55	40	35	5	0.9

2.2.5 *Atmosferik taşınım*

Atmosferik taşınım ile su kütlelerinin kirlenmesi durumu daha çok fosil kökenli yakıt kullanımı, endüstriyel faaliyetler, yoğun yerleşim bölgelerinde kullanılan odun, kömür vb. yakıtların oluşturduğu kirli hava ortamında gerçekleşmektedir. Bahsi geçen kirleticiler kükürtoksit, azotoksit, karbonmonoksitler ve ağır metal ve organik karbon bileşikleri içeren partiküler maddeler olarak atmosfere bırakılır. Bu kirleticiler, yağışlarla yıkanarak yüzeysel suların bünyelerinde büyük su kütlelerine taşınırlar ve su kaynaklarının kirlenmesine sebep olurlar. Atmosferik taşınımdan kaynaklı yayılı yükler, Bolu şehir merkezine 35 km ve Gerede'ye 15 km mesafede bulunan Yeniçağa gölünü inceleyen TÜBİTAK Projesi'nde [19] yapılan araştırma sonucu elde edilen birim yük değerleri kullanılarak (Tablo 4) hesaplanmış ve bölgede yoğun bir yerleşim ve endüstriyel bölge bulunmadığı için taşınımdan kaynaklı yayılı birim yüklerin toplam havza alanında en fazla %5 oranında etkili olacağı kabul edilmiştir.

Tablo 4. Atmosferik taşınım birim kirlilik yükleri [19]

Birim	Toplam Azot (TN)	Toplam Fosfor (TP)
mg/m^2.gün	1.22000	0.11200
t/km^2.yıl	0.44530	0.04088

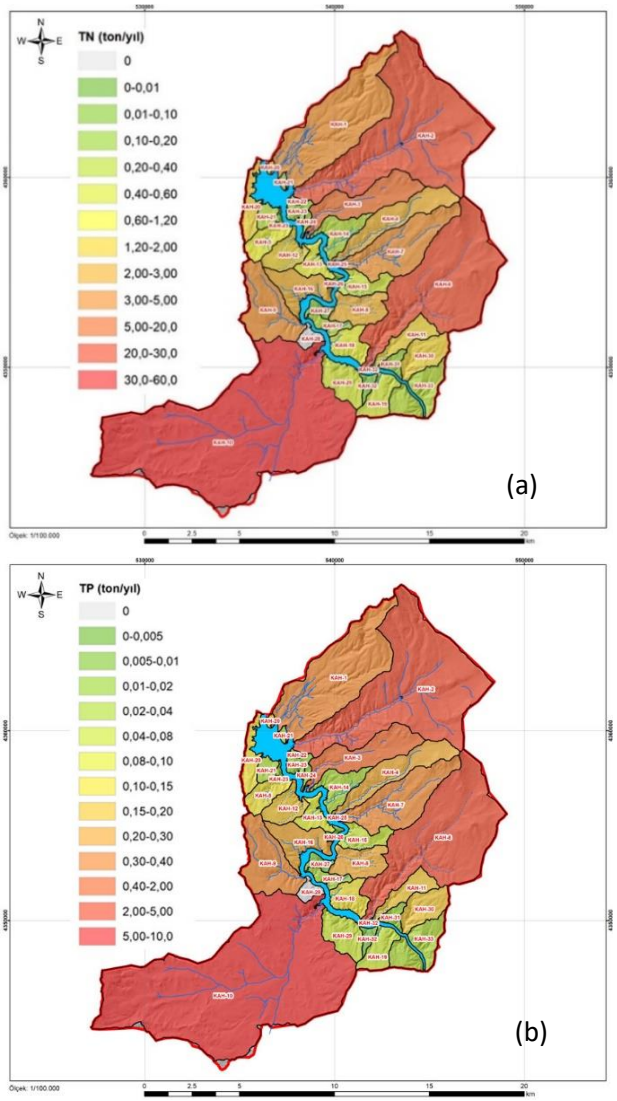
3 Bulgular ve tartışma

Çalışma alanı için belirlenen her bir yayılı kirletici yük çeşidinin, metotta açıklanan kabuller doğrultusunda, alt havza bazında kirletici yükleri hesaplanmıştır. Birim yüklere göre hesaplanan arazi kullanımından kaynaklanan yayılı kirlilik yükleri Tablo 5'te gösterilmektedir.

CORINE 2018 verilerine göre hesaplanan arazi kullanımlarından kaynaklanan TN ve TP kirlilik yüklerinin alt havza bazlı gösterimi Şekil 4'te sunulmaktadır.

Tablo 5. Arazi kullanımı kaynaklı kirlilik yükleri

Alt havza	Toplam Azot (TN, t/yıl)			Toplam Fosfor (TP, t/yıl)		
	Yerleşim alanı	Tarım alanı	Çayır/ Mera alanı	Yerleşim alanı	Tarım alanı	Çayır / Mera alanı
KAH-1	0.074	5.908	7.064	0.012	0.560	0.141
KAH-2	0.252	15.002	10.555	0.042	1.421	0.211
KAH-3	0.023	5.973	0.818	0.004	0.566	0.016
KAH-4	0.039	2.944	1.936	0.007	0.279	0.039
KAH-5	0.014	0.969	0.804	0.002	0.092	0.016
KAH-6	0.044	17.258	4.777	0.007	1.635	0.096
KAH-7	0.132	3.917	3.138	0.022	0.371	0.063
KAH-8	-	1.275	1.424	-	0.121	0.028
KAH-9	0.091	3.634	2.131	0.015	0.344	0.043
KAH-10	0.112	44.903	8.935	0.019	4.254	0.179
KAH-11	0.039	1157	0.804	0.007	0.110	0.016
KAH-12	0.011	2008	0.472	0.002	0.190	0.009
KAH-13	0.054	0.913	0.471	0.009	0.087	0.009
KAH-14	-	1.524	0.883	-	0.144	0.018
KAH-15	0.034	0.535	0.965	0.006	0.051	0.019
KAH-16	0.007	2.467	0.926	0.001	0.234	0.019
KAH-17	-	0.121	0.596	-	0.011	0.012
KAH-18	-	1.162	0.787	-	0.110	0.016
KAH-19	0.005	0.428	1.254	0.001	0.041	0.025
KAH-20	0.045	0.918	0.377	0.008	0.087	0.008
KAH-21	0.008	0.888	0.255	0.001	0.084	0.005
KAH-22	0.000	0.023	0.103	0.000	0.002	0.002
KAH-23	0.005	0.344	0.464	0.001	0.033	0.009
KAH-24	0.002	0.251	0.068	0.000	0.024	0.001
KAH-25	-	-	0.028	-	-	0.001
KAH-26	0.010	0.143	0.111	0.002	0.014	0.002
KAH-27	-	0.017	0.428	-	0.002	0.009
KAH-28	0.008	-	0.498	0.001	-	0.010
KAH-29	0.028	0.492	1.616	0.005	0.047	0.032
KAH-30	-	2.024	0.865	-	0.192	0.017
KAH-31	0.016	0.271	0.350	0.003	0.026	0.007
KAH-32	0.013	0.021	0.387	0.002	0.002	0.008
KAH-33	0.009	0.370	2.287	0.002	0.035	0.046
TOPL.	**1.075**	**117.861**	**56.577**	**0.179**	**11.166**	**1.132**



Şekil 4. Alt havzalarda arazi kullanımlarından kaynaklanan (a) TN ve (b) TP kirlilik yükü dağılımı.

Gübre kullanımından kaynaklanan yayılı yüklerin hesabında Tarım ve Orman Bakanlığı'ndan elde edilen 2021 yılı Bala ve Kaman ilçelerindeki gübre kullanım miktarları değerlendirilmiştir. Kullanılan gübrenin alt havzalardaki tüm tarım alanlarında eşit şekilde kullanıldığı kabul edilmiştir ve gübre türünün içeriğinde bulunan azot ve fosforun yüzeysel sulara sırasıyla %10 ve %2.5 oranında karıştığı kabul edilmiştir. Gübre kullanımından kaynaklanan kirlilik yükleri Tablo 6'de gösterilmektedir.

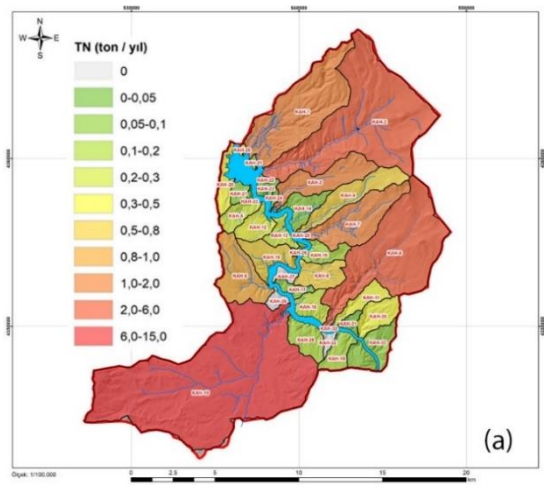
Tablo 6 incelendiğinde tarım arazilerinin en yoğun olarak bulunduğu KAH-10 alt havzasında gübre kullanım miktarının diğer alt havzalardan daha fazla çıktığı görülmektedir. Kullanılan gübre miktarının fazla olmasından dolayı suya karışan TN ve TP oranları da en fazla bu alt havzada ortaya çıkmaktadır.

Kesikköprü Baraj Gölü Havzası'nda 2021 yılı gübre kullanım miktarlarına göre hesaplanan gübre kullanımından kaynaklı TN kirlilik yükleri Şekil 5'te TP yükleri ise alt havza bazlı olarak Şekil 6'de gösterilmektedir.

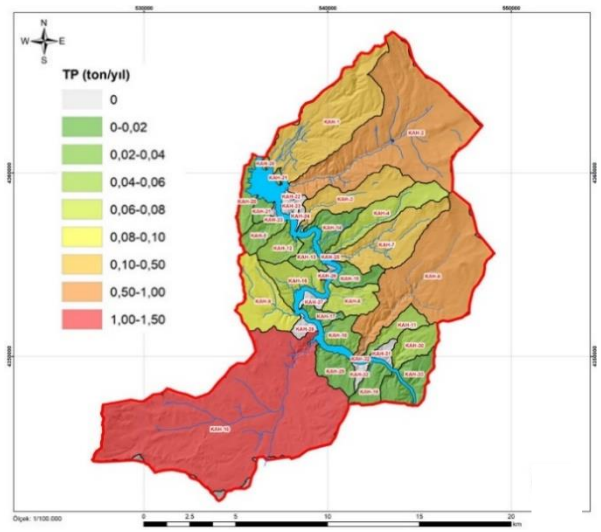
İki şekilde de koyu renkle gösterilen bölgenin doğu ve batısında kalan, tarım alanlarının yoğun olduğu büyük alt havzalarda, sarı ya da yeşil renk ile gösterilen ve tarım arazilerinin daha seyrek olduğu diğer alt havzalardan daha fazla miktarda gübre kaynaklı TN ve TP yüklerinin baraj gölüne deşarj edildiği anlaşılmaktadır.

Tablo 6. Gübre kullanımı kaynaklı kirlilik yükleri

Alt havza	Tarım alanı (ha)	Kul. top. azot (TN) (t/yıl)	Kul. top. fosfor (TP) (t/yıl)	Suya kar. TN (t/yıl)	Suya kar. TP (t/yıl)
KAH-1	444.98	10.67	4.37	**1.07**	**0.11**
KAH-2	2527.01	60.60	24.82	**6.06**	**0.62**
KAH-3	618.52	14.83	6.08	**1.48**	**0.15**
KAH-4	273.02	6.55	2.68	**0.65**	**0.07**
KAH-5	117.67	2.82	1.16	**0.28**	**0.03**
KAH-6	2330.01	55.88	22.89	**5.59**	**0.57**
KAH-7	432.97	10.38	4.25	**1.04**	**0.11**
KAH-8	235.06	5.64	2.31	**0.56**	**0.06**
KAH-9	353.51	8.48	3.47	**0.85**	**0.09**
KAH-10	5840.06	140.06	57.37	**14.01**	**1.43**
KAH-11	172.20	4.13	1.69	**0.41**	**0.04**
KAH-12	196.16	4.70	1.93	**0.47**	**0.05**
KAH-13	96.97	2.33	0.95	**0.23**	**0.02**
KAH-14	38.57	0.93	0.38	**0.09**	**0.01**
KAH-15	44.13	1.06	0.43	**0.11**	**0.01**
KAH-16	250.19	6.00	2.46	**0.60**	**0.06**
KAH-17	41.78	1.00	0.41	**0.10**	**0.01**
KAH-18	116.96	2.81	1.15	**0.28**	**0.03**
KAH-19	44.44	1.07	0.44	**0.11**	**0.01**
KAH-20	127.46	3.06	1.25	**0.31**	**0.03**
KAH-21	26.16	0.63	0.26	**0.06**	**0.01**
KAH-22	5.56	0.13	0.05	**0.01**	**0.00**
KAH-23	12.30	0.29	0.12	**0.03**	**0.00**
KAH-24	13.31	0.32	0.13	**0.03**	**0.00**
KAH-26	5.69	0.14	0.06	**0.01**	**0.00**
KAH-27	1.10	0.03	0.01	**0.00**	**0.00**
KAH-29	44.14	1.06	0.43	**0.11**	**0.01**
KAH-30	203.36	4.88	2.00	**0.49**	**0.05**
KAH-31	19.59	0.47	0.19	**0.05**	**0.00**
KAH-32	0.57	0.01	0.01	**0.00**	**0.00**
KAH-33	27.71	0.66	0.27	**0.07**	**0.01**
Toplam	**14661.16**	**351.61**	**144.02**	**35.16**	**3.60**



Şekil 5. Alt havzalarda gübre kullanımlarından kaynaklanan TN kirlilik yükü dağılımı.

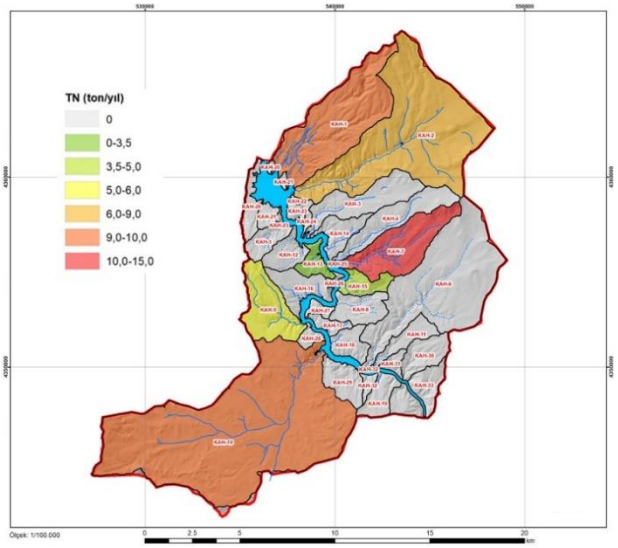


Şekil 6. Alt havzalarda gübre kullanımlarından kaynaklanan TP kirlilik yükü dağılımı.

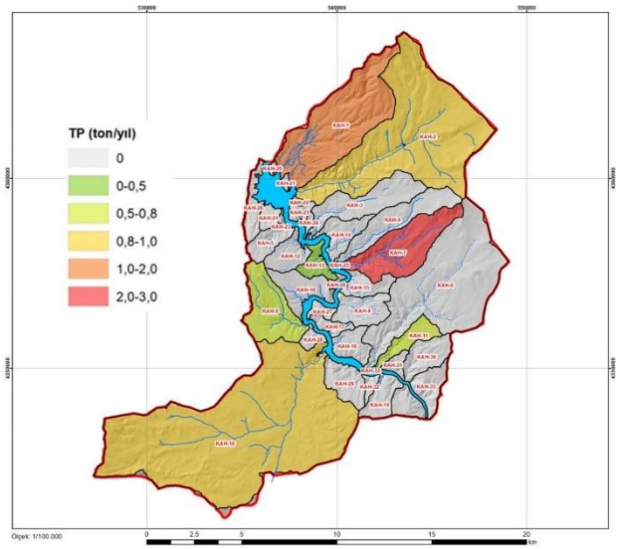
Kesikköprü Baraj Gölü alt havzalarında hesaplanan hayvancılık faaliyetlerinden kaynaklanan yayılı kirlilik yükleri Tablo 7'de sunulmaktadır. Hesaplanan hayvansal faaliyetlerden kaynaklanan yayılı TN-kirlilik yükleri Şekil 7'de, TP kirlilik yükleri ise Şekil 8'de sunulmaktadır.

Tablo 7. Hayvancılık faaliyetlerinden kaynaklanan yayılı kirlilik yükleri

Alt havza	Yerleşim adı	TN yükü (t/yıl)	TP yükü (t/yıl)
KAH-1	Ağapınar, Karaosman	9.43	1.28
KAH-2	Tatık, Büğüz	6.42	0.84
KAH-7	Kargıyenice	14.60	2.31
KAH-9	Küçükcamili	5.21	0.50
KAH-10	Büyükcamili, Bektaşlı, Küçükbıyık	9.44	0.89
KAH-11	İkizler	3.78	0.54
KAH-13	Tepeköy	3.59	0.27



Şekil 7. Alt havzalarda hayvancılıktan kaynaklanan TN kirlilik yükü dağılımı.



Şekil 8. Alt havzalarda hayvancılıktan kaynaklanan TP kirlilik yükü dağılımı

Ferdi Fosseptiklerden kaynaklı kirlilik yükleri Tablo 8'de gösterilmektedir.

Tablo 8. Ferdi fosseptiklerden kaynaklanan kirlilik yükleri

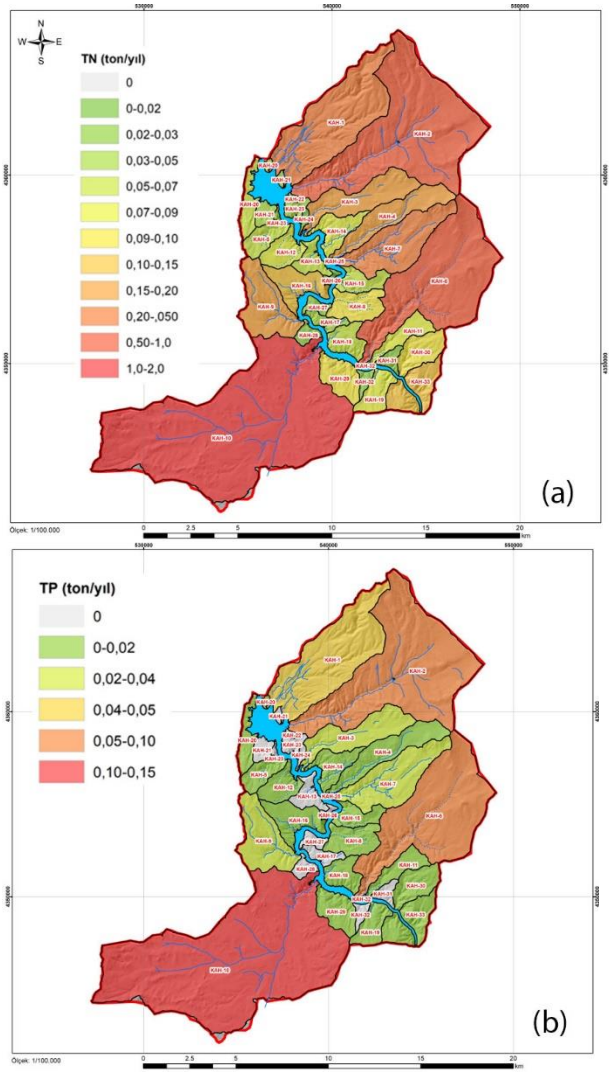
Köy nüfusu (2022)	Atıksu debisi (m^3/yıl)	KOİ (t/yıl)	BOİ (t/yıl)	AKM (t/yıl)	TN (t/yıl)	TP (t/yıl)
75	3285.00	0.753	0.548	0.479	0.110	0.017

Birim kirlilik yükleri kullanılarak elde edilen baraj havzasındaki atmosferik taşınım kaynaklı kirlilik yükleri Tablo 9'da gösterilmektedir.

Kesikköprü Baraj Gölü Havzası'nda hesaplanan atmosferik taşınım kaynaklı TN-TP kirlilik yükleri alt havzalara göre Şekil 9'da gösterilmektedir.

Tablo 9. Kesikköprü baraj gölü havzası atmosferik taşınım kaynaklı kirlilik yükleri

Alt havza	Toplam Azot (TN) (t/yıl)	Toplam Fosfor (TP) (t/yıl)	Alt havza	Toplam Azot (TN) (t/yıl)	Toplam Fosfor (TP) (t/yıl)
KAH-1	0.46	0.04	**KAH-18**	0.06	0.01
KAH-2	0.84	0.08	**KAH-19**	0.07	0.01
KAH-3	0.18	0.02	**KAH-20**	0.06	0.01
KAH-4	0.16	0.01	**KAH-21**	0.03	0.00
KAH-5	0.06	0.01	**KAH-22**	0.01	0.00
KAH-6	0.62	0.06	**KAH-23**	0.03	0.00
KAH-7	0.24	0.02	**KAH-24**	0.01	0.00
KAH-8	0.09	0.01	**KAH-25**	0.00	0.00
KAH-9	0.19	0.02	**KAH-26**	0.01	0.00
KAH-10	1.46	0.13	**KAH-27**	0.02	0.00
KAH-11	0.07	0.01	**KAH-28**	0.02	0.00
KAH-12	0.07	0.01	**KAH-29**	0.09	0.01
KAH-13	0.05	0.00	**KAH-30**	0.09	0.01
KAH-14	0.08	0.01	**KAH-31**	0.02	0.00
KAH-15	0.06	0.01	**KAH-32**	0.02	0.00
KAH-16	0.10	0.01	**KAH-33**	0.12	0.01
KAH-17	0.03	0.00	**TOPLAM**	**5.39**	**0.49**

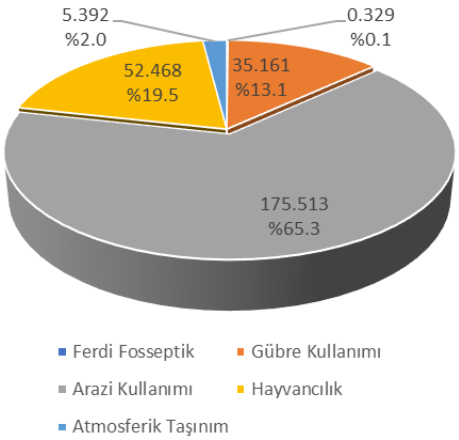


Şekil 9. Alt havzalarda atmosferik taşınımdan kaynaklanan (a) TN ve (b) TP kirlilik yükü dağılımı

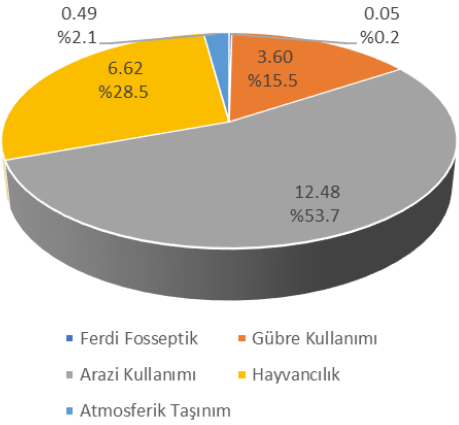
Kesikköprü Baraj Gölü Havzası'nda yayılı kirlilik yükü kaynakları dikkate alınarak, alıcı ortama ulaşan toplam azot (TN) ve toplam fosfor (TP) yükleri üzerinden değerlendirilmiştir. Belirlenen yayılı kirlilik kaynaklarından hesaplanan TN ve TP yükleri ve yüzdesel dağılımı Şekil 10 ve Şekil 11'de gösterilmiştir.

Yayılı kirlilik yükü kaynaklarının tespiti ve değerlendirmesi amacıyla yapılan bu çalışma sonucunda Kesikköprü Baraj Gölüne yüzeysel sular ile ulaşan toplam azot ve toplam fosfor yüklerinin baskın olarak arazi kullanımından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Tarımsal gübre kullanımı, hayvancılık faaliyetleri ve sızan fosseptik sularının ise baraj gölünü kirleten diğer yayılı kirlilik yükleri arasında yer aldığı ortaya konulmuştur. Çalışılan alanlarda kentsel atıksu arıtma tesislerinin varlığında toplam fosfor yükünün azaldığı gözlenmiştir [13,20,21,22].

Kesikköprü Baraj Gölü Havzası'nda yürütülen tarımsal faaliyetler, havzanın en önemli geçim kaynaklarından birini oluşturmaktadır. Gübreleme faaliyetleri ve tarımsal arazi kullanımı verileri birlikte değerlendirildiğinde, tarımsal faaliyetlerinin diğer kaynaklar arasında birincil yayılı kirletici kaynak olduğu ortaya konulmuştur. Alanda yayılı kirlilik kaynağı sınıfına giren fosseptik kullanımı ise sadece düşük nüfusa sahip bir yerleşim alanında bulunsa da ilerleyen zamanda nüfus artışı göz önüne alınarak tekrar değerlendirilmesi gerekmektedir.



Şekil 10. 2022 yılı toplam TN kirlilik yükü (ton) ve yüzdesel dağılımı



Şekil 11. 2022 yılı TP kirlilik yükü (ton) ve yüzdesel dağılımı

Bölgedeki hayvancılık faaliyetlerinden gelen kirlilik yükleri, yayılı kirletici kaynakları arasında 2. sırada olduğu tespit edilmiş olup, bu durum literatürde benzer çalışmalar ile paraleldir

Tüm kirlilik yükü dağılım haritaları incelendiğinde, çalışma alanını ikiye ayıran Kızılırmak Nehri'nin karşılıklı iki yakasında bulunan ve alt havzalar içerisinde en büyük alana ve antropojenik faaliyetlerin yoğun olarak yürütüldüğü KAH-10 ve KAH-2 alt havzalarında yayılı kirlilik yüklerinin diğer alt havzalara kıyasla daha fazla miktarda oluştuğu ortaya çıkmaktadır.

4 Sonuçlar

Yayılı kirlilik kaynaklarından gelen yüklerin tamamen ortadan kalkması mümkün olmamakla birlikte, çalışma alanının su kalitesinin ve doğal yapısının korunması için yayılı kirlilik kaynaklarından gelen yüklerin azaltılmasına yönelik tedbirlerin alınması elzemdir.

Arazi kullanımından kaynaklı yüklerin azaltılabilmesi amacıyla yerleşim yerlerinin, ticari ve endüstriyel bölgelerin havza alanı dışına doğru genişlemeleri desteklenmeli, havza alanı içerisinde doğal arazilerin korunması ve bu bölgelerin erozyonla mücadele kapsamında ağaçlandırılması, teraslama ve eğim düzenlemeleri yapılması uygun olacaktır. Benzer şekilde mera alanlarında da yüzeysel deşarj ile kirlilik yükü taşınımı ve erozyonu engellemek amacıyla teraslama ve eğim düzenlemeleri yapılması uygun olacaktır.

Tarım faaliyetlerin getirdiği yüklerinin azaltılmasına yönelik yapılacaklar arasında uygun sulama teknikleri, ürün seçimi, gübre uygulamalarının zaman, sıklık ve miktarının belirlenmesi çalışmaları sıralanabilir [23]. Bölgedeki çiftçiler gübreleme faaliyetleri konusunda bilinçlendirilmeli ve doğal gübre kullanımına özendirilmelidir.

Hayvancılık faaliyetlerinin getirdiği yüklerin azaltılmasına yönelik ise çiftliklerde hayvan atıklarının toplanıp, geçirimsiz zemin üzerinde depolanarak uygulamalarda kullanımına özendirilmelidir.

Evsel atıksuların çevreye vereceği zararı minimize edebilmek ve insan sağlığına kötü etkilerini bertaraf edebilmek için Kesikköprü Baraj Gölü Havzası'nda kanalizasyon altyapısı bulunmayan tek yerleşim yeri olan İkizler köyünün atıksularının da bir kanalizasyon şebekesi ile toplanıp, standartlara uygun şekilde kirlilik yükleri azaltılarak alıcı ortama deşarj edilmesi gerekmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Ankara Büyükşehir Belediyesi Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü tarafından hazırlatılan "Kesikköprü Barajı Havza Koruma Planı ve Özel Hüküm Belirleme Projesi" kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

[1] W. Sobolewski, Effect of agricultural land use on the water quality of Polish Lakes: A regional approach, Polish Journal of Environmental Studies, 25(6), 2705-2710, 2016. https://doi.org/10.15244/pjoes/63654.

[2] E. Köse, C. Tokatli and A. Çiçek, Monitoring stream water quality: A statistical evaluation, Polish Journal of Environmental Studies, 23(5), 1637-1647, 2014.

[3] V.H. Smith, Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems: a global problem. Environmental Science and Pollution Research 10, 126, 2003. https://doi.org/10.1065/espr2002.12.142.

[4] R.C. Ferrier and A. Jenkins, The Catchment Management Concept. in: Handbook of Catchment Management, R. C. Ferrier and A. Jenkins. (Eds), Wiley-Blackwell, 560, pp.1-18, Oxford, 2009.

[5] M. Matysik., D Absalon. and M Ruman, Surface water quality in relation to land cover in agricultural catchments (Liswarta River Basin Case Study), Polish Journal of Environmental Studies, 24(1), 175-184, 2015. https://doi.org/10.15244/pjoes/26203.

[6] S. Yang, O. Büttner, R. Kumar, C. Jäger, J. W. Jawitz, P.S.C. Rao and D. Borchardt, Spatial patterns of water quality impairments from point source nutrient loads in Germany's largest national River Basin (Weser River), Science of the Total Environment, 697, 2019. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134145.

[7] J. Wang, J. Shao, D. Wang, J. Ni and D. Xie, Identification of the "source" and "sink" patterns influencing non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir Area, Journal of Geographical Sciences, 26, 1431–1448, 2016. https://doi.org/10.1007/s11442-016-1336-6.

[8] Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, İklim Değişikliğinin Su Kaynaklarına Etkisi Projesi, Proje Nihai Raporu, T.C. Tarım, Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, 2016.

[9] A.N. Strahler, Hypsometric (Area-Altitude) Analysis of Erosional Topography, GSA Bulletin (1952) 63 (11): 1117–1142, http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2

[10] A.N. Strahler, Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks. in: Handbook of Applied Hydrology, V.Chow (Ed), McGraw Hill, pp.439-476, New York, 1964.

[11] E.Sertel , N. Musaoğlu , G. Alp , I. Yay Algan , Ş. Kaya, B.Yüksel ve A. Yilmaz , 1:25.000 Ölçekli Ulusal Arazi Örtüsü/Kullanımı Sınıflandırma Sistemi ile HGK TOPOVT Veritabanının Karşılaştırılması, Harita Dergisi, 160, 34-46, 2018.

[12] N Erdoğan, Doğu Karadeniz Havzası'nda kirlilik yüklerinin değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Sakarya, Türkiye, 2017.

[13] B.H. Gürsoy Haksevenler ve S. Ayaz, Noktasal ve yayılı kirletici kaynaklarının yüzeysel su kalitesi üzerinde etkisi, Alaşehir Çayı alt havzası örneği, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 11(4), 1258-1268, 2021. https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.882693.

[14] O. Oenema and C.W.J. Roest, Nitrogen and phosphorus losses from agriculture into surface waters; the effects of policies and measures in the Netherlands, Water Science and Technology, 37(2): 19–30, 1998. https://doi.org/10.1016/S0273-1223(98)00052-3.

[15] D. Bottcher, and D. Rhue, Fertilizer management – key toa sound water quality program, circular 816, Florida Coopera-tive Extension Service, Institute of Food and AgriculturalSciences, University of Florida, 2000.

[16] S. Tırınk, Iğdır ili ve ilçelerindeki hayvansal atıkların çevresel etkileri ve yayılı kirletici yükü hesabı. Black Sea Journal of Engineering and Science, 4(2), 43-50. 2021. https://doi.org/10.34248/bsengineering.841821.

[17] S. Hacısalihoğlu, Hayvansal kaynaklı yayılı kirlilik yükleri hesabı, Bursa örneği, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 27(1), 361-373, 2022. https://doi.org/10.17482/uumfd.1059035.

[18] Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği, Resmî Gazete, 27527, 20.03.2010. Erişim adresi:

https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2010/03/20100320-7.htm.

[19] N. Karakaya, H. Cebel, S. Akgül, K. Güngör, F. Evrendilek, O. Başkan ve D. Karakaş, "Yeniçağa gölü'nün ötrofikasyonuna neden olan fosfor kaynaklarının ve kritik kaynak alanlarının kütle dengesi ve fosfor endeksi yöntemleriyle belirlenmesi", Proje Raporu, 110Y204, TÜBİTAK, ÇAYDAG, 2014.

[20] D. Özalp, Doğu Karadeniz Havzası'nda yayılı kirletici kaynakların belirlenmesi ve yönetim önerileri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009.

[21] B. Yontar, Aras Havzası'nda yayılı kirletici kaynakların belirlenmesi ve yönetim önerileri", Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. 2009.

[22] C. Ayyıldız, Estimation of diffuse pollution loads of pesticides in Tersakan Sub-Basin of Yeşilırmak River, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 2019.

[23] D. Öztürk, A. Tanık, D. Z. Şeker, K. Alp, M. Gürel, A. Ertürk, A. Ekdal, Ç. Tavşan ve Y. Zorlutuna, Su Kalitesi Nihai Fizibilite Raporu, Büyük İstanbul Su Temini Melen Sistemi II. Merhale Projesi Büyük Melen Havzası Entegre Koruma ve Su Yönetimi Master Planı, İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul. 2007.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 262-278

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Çeşitli görüntülerin sınıflandırılması için yeni bir Evrişimsel Sinir Ağı önerisi

A new Convolutional Neural Network proposal for classifying various images

Yeşim Tiraki[1], Hasan Temurtaş[2], Soydan Serttaş[3], Çiğdem Bakır[4,*]

[1] *Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 43000, Kütahya Türkiye*
[2,3] *Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 43000, Kütahya Türkiye*
[4] *Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, 43000, Kütahya Türkiye*

Öz

Günümüzde derin öğrenme metotları robotik, ses işleme, tıp ve görüntü gibi birçok alanda yaygın kullanılmaktadır. Bu çalışmada literatürde yapılan görüntü sınıflandırma ve analizine yönelik çalışmalar detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca yapılan çalışmada CNN kullanılarak derin öğrenme metotlarının MNIST, Fashion MNIST, CIFAR-10 ve CIFAR-100 ismindeki 4 farklı veri seti üzerinde performans analizleri yapılmıştır. Oluşturulan derin öğrenme modellerinin yapıları, eğitim için kullanılan parametre değerleri, kullanılan katmanlar, doğrulama verileri için elde edilen karmaşıklık matrisleri, doğruluk ve kayıp grafikleri ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Çalışmamız 3 adet konvolüsyon katmanı, 3 adet batch normalizasyon katmanı, 2 adet maxpooling katmanı, 1 flatten, 2 droupout, 2 dense katmanından oluşan farklı bir ağ yapısı ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca önerdiğimiz modelle görüntü sınıflandırılmasının farklı veriler üzerindeki performansı artırılmıştır. Test sonunda çalışmamız çeşitli değerlendirme metriklerine göre doğruluk sonuçları karşılaştırılmıştır. Kullanılan tüm veri setleri için en iyi ve en kötü bulunan görüntüler tespit edilmiştir. Önerilen CNN modeli ile MNIST ve Fashion MNIST veri setleri için yüksek doğruluk oranları gözlemlenmiş olup bu değerler sırasıyla %99.22 ve %99.21'dir.

Anahtar kelimeler: Derin öğrenme, Evrişimli Sinir Ağı, CIFAR-10, CIFAR-100, MNIST, Fashion MNIST

Abstract

Nowadays, deep learning methods are widely used in many fields such as robotics, sound processing, medicine and imagery. In this study, studies on image classification and analysis in the literature were examined in detail. In addition, performance analyzes of deep learning methods were carried out using CNN on 4 different data sets named MNIST, Fashion MNIST, CIFAR-10 and CIFAR-100. The structures of the created deep learning models, the parameter values used for training, the layers used, the complexity matrices obtained for the validation data, accuracy and loss graphs are shown in detail. Our study was carried out with a different network structure consisting of 3 convolution layers, 3 batch normalization layers, 2 maxpooling layers, 1 flatten, 2 droupout, 2 dense layers. In addition, the performance of image classification on different data has been increased with our proposed model. At the end of the test, the accuracy results of our study were compared according to various evaluation metrics. For all the data sets used, the best and worst images were determined. With the proposed CNN model, high accuracy rates were observed for MNIST and Fashion MNIST datasets, with these values being 99.22% and 99.21%, respectively.

Keywords: Deep learning, Convolutional Neural Networks, CIFAR-10, CIFAR-100, MNIST, Fashion MNIST

1 Giriş

Görüntü işleme çeşitli görüntülerin iyileştirilmesi, görüntü kalitesini artırma, görüntü kodlama, görüntüyü dönüştürme, görüntüdeki kenarları tespit etme, bölütleme, nesne tanıma, görüntüyü dönüştürme, örüntü tanıma ve bilgisayarla görü gibi birçok bilgisayar biliminde yaygın kullanılan bir alandır [1]. Nesne takibi, trafik kontrol, plaka tanıma, ultrason, tomografi, biyomedikal uygulamalar, nesne takibi, yüz tanıma, uzaktan algılama, tarımsal, endüstriyel uygulamalar, coğrafi sistemler, astronomi, askeri ve güvenlik uygulamalarında sıklıkla kullanılır. Özellikle de görüntü işleme teknikleri kullanılarak gerçekleştirilen iris ve parmak izi tanıma güvenlik alanında oldukça önemli bir yere sahiptir.

Kamera gibi farklı yollarla elde edilen görüntülerden anlamlı bilgiler elde edilerek yorumlanması için renk dönüştürme, kenar algılama, filtreleme, morfolojik işlemler gibi birtakım görüntü işleme teknikleri kullanılır [2]. Elde edilen görüntüler ham olarak değerlendirilmez. Görüntünün netleşmesi, görüntünün bulanıklığının ortadan kaldırılması ve görüntünün kalitesini artırmak için filtreleme gibi birtakım ön işleme adımları uygulanır. Ön işlemeden geçirilen görüntüler üzerinden nesnelerin doğru tespit edilebilmesi amacıyla önemli özelliklerin belirlenmesi için doğrusal ya da doğrusal olmayan özellik çıkarımı gerçekleştirilir. Bu adımdan sonra görüntüden anlamlı bilgileri çıkarmak amacıyla görüntü analizi gerçekleştirilir. Görüntü analizi ile görüntünün hesaplamalı algoritmalar kullanılarak işlenmesi sonucunda elde edilen bulgular ve

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: cigdem.bakir@ dpu.edu.tr (Ç. Bakır)
Geliş / Recieved: 05.09.2023 Kabul / Accepted: 04.12.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1355726

değerlendirmeler görselleştirilir. Böylelikle elde edilen sonuçlar kişilere daha kolay ve hızlı bir şekilde sunulur.

Hızla gelişen teknolojinin önemli konularından biri de yapay zekâ ve alt dalı olan makine öğrenmesine bağlı derin öğrenmedir. Derin öğrenme, yapay sinir ağları ve makine öğrenme algoritmalarını kapsayarak verilen veri seti ile sonuçlar tahmin edilebilmektedir [3].

Derin öğrenme, görüntü, ses, video ve biyomedikal görüntü işleme alanında sıklıkla kullanılan katmanlı mimariye sahip bir yöntemdir. Derin öğrenme yapısı girdiler, gizli katmanlar ve çıktılardan oluşur. Bir katmanın girdisinin kendisinden önce gelen katmanın çıktısı olması prensibine dayanır. Tekrarlayan Sinir Ağları (RNN), Sınırlı Boltzman Makineleri (RBM), Derin Oto-Kodlayıcıları (AE), Uzun-Kısa vadeli Hafıza Ağları (LSTM) ve Evrişimli Sinir Ağları (CNN- Convolutional Neural Networks) başlıca derin öğrenme metotlarıdır [4].

Çalışmamızda çeşitli görüntülerin sınıflandırılması ve analiz edilmesi amacıyla derin öğrenmeye dayalı bir model önerilmiştir. Önerdiğimiz modelde literatürde kullanılan modellerin tersine farklı yeni bir ağ yapısı ile daha derin katmanlar kullanılarak daha önemli öznitelikler çıkarılmıştır. Böylelikle daha doğru bir sınıflandırma yöntemi geliştirilmiştir. Derin öğrenme metotları görüntü sınıflandırma üzerinde başarılı olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmamızda önerdiğimiz CNN ağı farklı veri setleri üzerinde denenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

2 İlgili çalışmalar

Literatürde CIFAR-10 veri setini kullanan çalışmalara baktığımızda; Abouelnaga yapmış olduğu çalışmasında [5] Lojistik Regresyon, K-En Yakın Komşular (KNN), Destek Vektör Makinesi (SVM) gibi çeşitli geleneksel makine öğrenimi algoritmaları ve bu algoritmaların Temel Bileşen Analizi (PCA) ile bir kombinasyonu tarafından elde edilen doğruluğu incelemiştir. Aynı zamanda CNN'leri incelemeyi amaçlamış ve dört CNN sınıflandırıcısı ve bir KNN sınıflandırıcısı kullanarak %94.03'lük bir doğruluk elde etmiştir. Goyal çalışmasında [6] özellikle CIFAR-10 veri seti için sıfırdan tasarlanmış, son derece popüler son teknoloji CNN'lerden büyük ölçüde ilham alan bazı CNN'leri incelemeyi ve aralarında adil bir karşılaştırma sunmayı amaçlamıştır. Çeşitli CNN'lerin artırılmamış CIFAR-10 veri kümesi üzerindeki performansını değerlendirmiş ve daha basit ağların karmaşık ağlardan daha iyi performans gösterebileceğini bulmuştur. Düzenlileştirmeyi kullandıktan sonra bile daha derine inmenin her zaman işe yaramayabileceği sonucuna varılmıştır. Ho-Phuoc çalışmasında [7], CIFAR-10 veri setinde derin sinir ağları ile insanların karşılaştırmasını tartışmıştır. Bazı ağların %93.91'lik insan doğruluğunu aşabileceğine dair sonuçlar elde etmiştir. Yang Ju ve arkadaşları, Raspberry Pi mobil cihazında kolayca çalışabilen hafif evrişimli sinir ağı TripleNet ile CIFAR-10, SVHN veri setleri üzerinde görüntü sınıflandırma gerçekleştirmişlerdir [8]. Blok bağlantılarından uyarlanan TripleNet yeni önerilen ağ modelinin doğruluk ve çıkarım açısından performans sonuçları hesaplanmıştır. Ayrıca zamansal olarak MobileNet, ThreshNet, EfcientNet ve HarDNet ile karşılaştırıldığında TripleNet'in görüntü başına çıkarım süresinin sırasıyla %16, %17, %24 ve %30 oranında kısaldığını göstermişlerdir. ImageNet'in büyük veri kümesinden farklı olarak, CIFAR-10 ve SVHN gibi küçük veri kümeleri, hesaplama açısından maliyetli sinir ağları gerektirmez. Bu sebeple performans açısından önerilen model kötü sonuçlar doğurabilir.

Literatürde CIFAR-10 ve CIFAR-100 veri setlerini kullanan çalışmalara baktığımızda; Liu ve arkadaşları, CIFAR-10 ve CIFAR-100 verilerini aktivasyon fonksiyonu ve farklı ağa dayalı Inception modeli ile sınıflandırmışlardır [9]. Çok büyük katmanlarda ResNet yönteminin derin katmanları yeni aktivasyon fonksiyonuyla değiştirilmiştir. Önerdikleri modelde başlangıç bloklarında uygun ayarlamaları yaptıktan sonra, ResNet'in daha derin katmanlarını başlangıçta kullandıkları bloklarla ve Relu katmanını da farklılaştırılmış aktivasyon fonksiyonuyla değiştirmişlerdir. Parametre sayısını azaltmak için 1x1 evrişim katmanı kullanılmıştır. Bu iki yöntemle parametre sayısı azaltılarak çalışma süresinin kısaltılması sağlanmıştır. Gürültü içermeyen veriler için Relu katmanında küçük negatif değerler verilerek doğruluk artırılmıştır. Ancak gürültülü verilerde başarı oranı düşüktür. Gürültülü veriler için Gauss gürültüsü eklenebilir. Zhou ve arkadaşları [10], CIFAR-10 ve CIFAR-100 veri setlerinde görüntüyü tanımak amacıyla Discrete Wavelet Transform (DWT) ve Wavelet-Attention (WA) bloğu tasarlamışlardır. Önerdikleri modelin başarısını karşılaştırmalı olarak göstermişlerdir. Özellik alanlarını ayrıştırmak için DWT'yi kullanan WA bloğu, düşük frekans alanındaki gereksiz bilgileri filtrelemek için yönlendirebilir. Ayrıca bu yöntem yüksek frekans alanındaki özelliklerin ayrıntılı bilgilerini entegre ederek eğitim aşamasında modelin öğrenme yeteneğini artırabilir. Ancak önerilen bu yöntemin büyük görüntü verilerinde aynı başarıyı gösterip göstermeyeceği belirsizdir. Zhang ve arkadaşları, görüntüdeki özellikleri belirlemek amacıyla MFR-DenseNet yöntemi önermişlerdir [11]. MFR-DenseNet, farklı evrişimsel özelliklerin karşılıklı bağımlılıkları açık bir şekilde modelleyen DenseNet'in geliştirilmiş halidir. Çalışmanın ilk aşamasında katmanlar arası özelliği ağırlıklandırmak için DenseNet oluşturmuş, sonrasında CFR-DenseNet yönteminin topluluk öğrenme yaklaşımı birleştirerek MFR-DenseNet elde edilmiştir. Oluşturulan 100 katmanlı MFR-DenseNet yöntemi CIFAR-10 ve CIFAR-100 veri setleri üzerinde eğitilmiş ve önerilen modelin başarısı ölçülmüştür.

Literatürde MNIST veri setini kullanan çalışmalara baktığımızda; Shou ve arkadaşları, kişilerin el yazısındaki farklılıklar ve el yazılarının özelliklerini karakteristik analizinin zorluğundan dolayı MNIST veri seti üzerinde derin öğrenme yöntemleriyle görüntü tanıma çalışması yapmışlardır [12]. Çok sayıda parametre değerleri kullanarak eğitim verisinde hızlı bir yakınsama oranı ile iyileştirme sağlamışlardır. Yaptıkları çalışmayla MNIST veri seti kullanarak el yazısı dijital tanıma ile sınıflandırma için DNN ağını geliştirmeyi amaçlamışlardır. Diğer bir çalışmada Plesovskaya ve Ivanov SVD ve Kernel Yoğunluk Tahmini kullanarak MNIST veri seti üzerinde görüntü sınıflandırma

yapmışlardır [13]. Bu yöntemlerin görüntü işlemdeki doğruluğunu artırmak için hiyerarşik sınıflandırma yöntemi geliştirmişlerdir. Önerdikleri yöntem birçok alanda sıklıkla kullanılan makine öğrenimi algoritması SVD'den daha başarılı sonuç vermiştir. Bu çalışmada boyut azaltma ve kernel yoğunluk tahminine dayalı yöntem kullanılmıştır. Hiyerarşik sınıflandırma yönteminin başarısı ve analizi SVM ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Pei ve Ye MNIST veri setini eğitmek için kümeleme yöntemlerini kullanmışlardır [14]. Eğitim veri setindeki görüntüleri 60000×785 satırlık iki boyutlu matris verilerine dönüştürmüşlerdir. Daha sonrasında ise test verilerini K-means kümeleme yöntemiyle 10 kümeye bölerek MNIST veri setini sınıflandırmışlardır. T-SEN ile veri seti boyutunu azaltmışlardır. K-means kümeleme dışında farklı kümelerin bu veri seti üzerindeki performansını araştırmak amacıyla MiniBatchKMeans algoritması da kullanmışlardır. MiniBatchKMeans algoritması K-means kümeleme yöntemine göre daha başarılıdır.

Literatürde Fashion MNIST veri setlerini kullanan çalışmalar da mevcuttur. Çalışmalarında Dropout değeri açısından farklı CNN mimarilerini karşılaştıran Henrique vd. [15] düşük Dropout değeri içeren CNN-Dropout-3 modelinin %99 doğruluk değeri ile en başarılı model olduğu belirtmişlerdir. Birim [16] moda görsellerinin başarıyla sınıflandırılması konusunu içeren çalışmasında Fashion MNIST veri setini kullanarak farklı mimarilerde CNN algoritmalarını incelemiştir. Bu CNN mimarileri, temel CNN, Dropout düzenleyici içeren, L2 düzenleyici içeren ve son olarak her iki düzenleyiciyi de içeren mimarilerdir. Çalışma sonucunda Dropout içeren CNN algoritmasının %94.3 doğruluk oranı ile en iyi performansı verdiğini belirtmiştir. Farklı CNN mimarileri inceleyen bir diğer çalışmada Bhatnagar vd. [17], ürün sınıflandırması yapmıştır. Yine üç farklı CNN mimarisi incelenmiştir. Bu mimariler temel CNN mimarisi, batch normalizasyon mimarisi ve hem batch normalizasyon hem de residual skip connections içeren mimaridir. Sonuçlara göre en iyi performansı doğruluk değeri %92.54 olan batch normalizasyon ve residual skip connections birlikte birlikte kullanıldığı mimarinin verdiği belirtilmiştir. Meshkini vd. [18], CNN modellerinden VGG, GoogleNet, DenseNet, AlexNet, SqueezeNet ve ResNet algoritmalarının sınıflandırma başarılarını incelemiştir. Batch normalizasyon kullanan SqueezeNet algoritmasının %93.43 ile en başarılı doğruluk oranını verdiği belirtilmiştir. Greeshma çalışmasında [19] veri büyütme (Data Augmentation) kullanarak Dropout düzenleyicinin ve hiperparametre optimizasyonunun CNN sınıflandırma başarısındaki rolünü incelemiştir. Çalışmada bu modelin %93.99 doğruluk oranı gösterdiği bulunmuştur. Kayed ve arkadaşları [20] CNN tabanlı LeNet-5 yapısını incelemiş ve %98 doğruluk değeri ile sınıflandırma yaptığı belirtmiştir. Yine Hur benzer çalışmasında [21] Kuantum CNN yapısını incelemiş ve %93.6 doğruluk değeri ile sınıflandırma ortaya çıkarmıştır. Seo ve Shin giysi sınıflandırması için hiyerarşik yapıyı kullanan çalışmalarında [22] VGGNet CNN mimarisinin hiyerarşik olmayan modele göre daha doğru sonuç verdiğini ve kaybın küçüldüğünü belirtmişlerdir. Çalışmada %93.52 doğruluk değeri bulunmuştur. Khanday ve arkadaşları [23] ise CIFAR-10 ve Fashion MNIST veri setlerini kullanarak filtre boyutu açısından CNN mimarilerini incelemişlerdir. Mimari başarısının filtre boyutu ile ters orantılı olduğu sonucuna varılmıştır. Her iki veri setinde de 3x3 filtrenin en iyi başarıyı gösterdiği belirtilmiş ve Fashion-MNIST için %93.68 değerinin en iyi doğruluk değeri olduğu söylenmiştir. Nocentini ve arkadaşları Fashion MNIST veri seti üzerinde 15 evrişimli katman içeren bir ağ kullanarak görüntü sınıflandırması gerçekleştirmişlerdir [24]. Bu veri setinde gerçekleştirdikleri doğruluk sonuçlarını çalışmalarında kullandıkları iki farklı moda-ürün veri seti ile birlikte karşılaştırmışlardır. Bu iki farklı veri setinde %60 ve %40 oranında doğruluk elde etmişlerdir. Ayrıca, farklı fully connected layers, batch size ve stride kullanarak önerdikleri modelin performansını değerlendirmişlerdir. Derin öğrenme algoritmaları görüntü işlemede kullanılan yaygın olarak kullanılmaktadır. Vijayaraj ve arkadaşları, farklı model görüntülerinin stillerini tahmin edebilmek amacıyla Fashion MNIST CNN ağlarıyla verilerini sınıflandırmışlardır [25]. Farklı aktivasyon fonksiyonları, öğrenme oranları ve parametreler kullanarak önerdikleri modeli test etmişlerdir. Giysi tanıma ve sınıflandırma amacıyla farklı veri setleri kullanmışlardır.

Literatürde CIFAR-10, CIFAR-100 ve MNIST veri setlerini birlikte kullanan çalışmalar da mevcuttur. Da Silva ve arkadaşları çalışmalarında [26] düşük karmaşıklıktaki evrişimli sinir ağlarını geliştirmek ve optimize etmek için çok amaçlı bir gramer evrimi çerçevesi önermişlerdir. Önerilen model beş görüntü veri setinde değerlendirilmiştir. Bunlar CIFAR-10, CIFAR-100, MNIST, KMNIST ve EuroSAT'tır. Önerilen model CIFAR-10 ve EuroSAT veri setlerinde görüntü sıralamasında birinciliği elde etmiştir. Ayrıca sonuçlar, oluşturulan modellerin CIFAR-100, MNIST ve KMNIST veri kümeleri için en iyi CNN'lere istatistiksel olarak benzer sonuçlar elde ettiğini ve son teknoloji ağlara kıyasla ortalama %95 daha az eğitilebilir parametreye sahip olduğunu göstermiştir. Rashno çalışmasında [27] görüntü sınıflandırması için Neutrosophic Convolutional Neural Networks (NCNN) olarak adlandırılan, nötrozofik (NS) alanda veri belirsizliği işleyen yeni bir evrişimli sinir ağı yapısı önermiştir. Bu yöntem, 20 seviyeli Gauss gürültüsü ile kirlenmiş MNIST, CIFAR-10 ve CIFAR-100 veri setleri üzerinde değerlendirilmiştir. Sonuçlar, iki yollu NCNN'nin, MNIST ve CIFAR-10 veri setlerinde farklı gürültü seviyelerine sahip 5 çiftte (eğitim, test) sırasıyla %5.11 ve %2.21 oranında CNN'den daha iyi performans elde ettiğini göstermektedir. Son olarak, NVGG-Net, CIFAR-10 ve CIFAR-100 veri setlerinde doğruluğu VGG-Net'e kıyasla sırasıyla %3.09 ve %2.57 oranında artırmıştır. Güler'in çalışmasında [28] nesne sınıflandırması için CNN ile bir kapsül ağ tekniği kullanılarak hibrit bir model tasarlanmıştır. 14 farklı el hareketini içeren HG14 isimli bir veri seti kullanılmıştır. Modelin nesne tanıma performansına bakmak için Fashion MNIST, HG14 ve CIFAR-10 veri setleri üzerinde eğitim gerçekleştirilmiştir. Ayrıca HG14, Fashion MNIST ve CIFAR-10 veri kümelerindeki görüntüleri sınıflandırmak için VGG16, ResNet50, DenseNet ve CapsNet modelleri kullanılmıştır.

Eğitim sonuçları karşılaştırılmış ve önerilen model, HG14, Fashion MNIST ve CIFAR-10 verisetlerinde sırasıyla %90, %93.88 ve %81.42 değerleri ile en yüksek doğruluğa ulaşmıştır. Ryu çalışmasında [29] derin sinir ağlarında temiz görüntülere küçük bozulmalar ekleyerek düşmanca örnekler oluşturan düşmanca saldırılara (adversarial attacks) karşı gürültü giderici bir ağ önermiştir. MNIST, CIFAR-10, CIFAR-ve 100 veri kümeleri üzerinde yürütülen deneylerin sonuçları yüksek bir sınıflandırma doğruluğu ile sonuçlandığını göstermektedir. Önerilen yöntemin eğitimin son teknoloji rakip eğitim yöntemiyle karşılaştırıldığında, düşman saldırılarına karşı sağlamlıkta ortalama %0.84, %27.33, %28.99 ve %17.61'lik iyileştirmeler sağladığını belirtmiştir. Siebert çalışmasında [30] bir çeşit evrişimli sinir ağı olan DenseNet için yapılmış yeni bir optimizasyon yöntemi önermiştir. Yöntemin amacı, ağın içinde bulunduğu ana göre karakteristik haritaların üretimini kontrol etmek ve doğrulukta minimum kayıpla ağın boyutunu azaltmaktır. Önerilen modelin davranışını doğrulamak için MNIST, Fashion MNIST, CIFAR-10, CIFAR-100, CALTECH-101, Cats vs Dogs ve TinyImageNet veri setleri ile deneyler yapılmıştır. MNIST ve Fashion MNIST veri seti için %43 parametre azalması ve CIFAR-10 ağ parametrelerinde %44 azalma elde edilirken, CIFAR-100 bazında parametre düşüşü %43 olmuştur. Assunção çalışmasındaki [31] ağ önerisini CIFAR-10 veri kümesi ile test etmiş ve %95.22 doğruluğa ulaşmıştır. Ayrıca, bu ağı MNIST, Fashion-MNIST ve CIFAR-100'ü sınıflandırmak için de uygulamış ve en etkileyici sonucun CIFAR-100 veri kümesindeki %78.75'lik sınıflandırma doğruluğu olduğunu belirtmiştir. Hafiz ve arkadaşları, ImageNet, Natural Images, CIFAR-10, CIFAR-100, MNIST ve Fashion-MNIST veri setlerini ResNet-50, DenseNet, WRN-28-10 ve NSGANetV1 ile adlandırılan ensemble yöntemlerle eğitmişlerdir [32]. Önerilen ensemble yöntemler karar ağaçlarından esinlenerek gerçekleştirilmiştir. Ensemble yöntemler büyük ve karmaşık problemlerde ortaya çıkan düşük performans sorununu çözmek amacıyla kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarla kullanılan ensemble yöntemlerin başarısı ve performansı karşılaştırılmıştır.

3 Materyal ve metot

Derin öğrenme, görüntü ile videodan nesne tanıma, nesne takibi ile nesne algılama, genomik, konuşma tanıma tavsiye sistemleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır [33]. Makine öğrenimi yöntemleri çok fazla zaman ve emek harcamaya sebep olan ön işlem ve özellik çıkarımı metotlarıyla uğraşırken; derin öğrenme yöntemleri veriyi ham bir şekilde kullanır. Ön işleme ve özellik çıkarımı ağın içerisinde otomatik olarak gerçekleştirilir. Genellikle görüntü analizinde kullanılan derin öğrenme yöntemleri farklı filtreler ile görüntünün özniteliklerini belirler. Derin öğrenme metotlarında bir görüntünün tespit edilmesi için gizli katmanlar kullanılır.

Derin öğrenme, çok katmanlı sinirsel ağlardan oluşan makine öğreniminin bir alt dalıdır. Bir veya birden fazla gizli katman bulunduran makine öğrenimi yöntemidir [34]. Girilen veri setlerinin gizli katmanlarda işlenerek hangi çıkış katmanına çıkacağını tahmin etmesi mantığı ile çalışır. Her bitişik katman, kendinden önceki çıktıyı girdi olarak alır. Çıktı olarak olasılığı en yüksek olan çıkış seçilir. Derin öğrenme yöntemleri gözetimli ve gözetimsiz olarak iki şekilde gerçekleşebilir. Gözetimli; girilen veriler ve çıkış verisi makineye tanımlanır ve sonuç buna göre beklenir. Hatalı bir sonuç çıkarsa tekrar algoritma ya da hesaplamalara göz atıp hata düzeltilebilir. Gözetimsiz; sonucun ne olduğunu makine kendisi karar verir. Girilen karmaşık verileri makine kendisi çözmeye çalışarak olasılıklar dahilinde çözdüğü verileri bir çıkış verisi haline getirir. Üç derin öğrenme modeli vardır [35]:

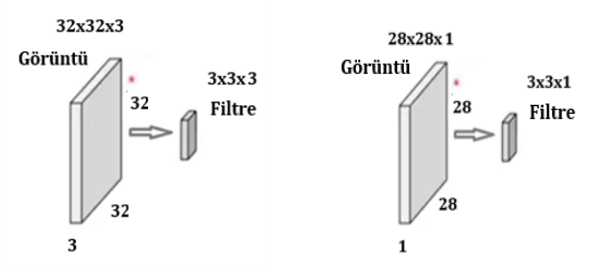
- Çok katmanlı Perceptron (Multilayer Perceptrons-MLP)
- Evrişimsel Sinir Ağı (Convolutional Neural Networks-CNN)
- Tekrarlamalı Sinir Ağı (Recurrent Neural Networks-RNN)

MLP, delta öğrenme metodu kullanan çok katmanlı bir derin öğrenme metodur [36]. Tek nöron yerine çok sayıda nöron kullanılmaktadır ve bu nöronlar katmanlar şeklinde ifade edilir. Giriş, gizli katmanlar ve çıktı katmanından oluşur. En az bir gizli katman mevcuttur ve gizli katmanlar problemin karmaşıklığına göre artırılabilir. Her katmanın çıktısı kendisinden önceki katmanların girdileri işlenerek belirlenir. MLP özellikle genelleme ve sınıflandırma problemlerinde etkin bir şekilde çalışır.

CNN yüksek doğruluk oranı ile görüntüleri algılayabilen, sınıflandırabilen ve yeniden yapılandırabilen derin öğrenmeli bir evrişimsel sinir ağıdır. Bu modelin amacı öğrenme işlemlerinin gerçekleştirilmesi ve öğrenilen yapıların sistem tarafından doğru bir şekilde yorumlanmasını amaçlar. Farklı görselleri işleyen ve bu görsellere sınıflandırma işlemleri yapan birçok katmandan oluşan algoritmadır. Görüntü ve video üzerinde gösterdiği başarı performans sebebiyle yaygın bir şekilde tercih edilmektedir.

RNN sisteme yeni verilen giriş bilgilerinin yanı sıra daha önceden verilen ve sonradan verilecek giriş bilgilerini de kullanan, zamana dayalı bir derin öğrenme metodur [37]. Eski verilerle yeni verileri karşılaştırarak bir tahmin üretir ve doğal dil işleme gibi alanlarda sıklıkla kullanılır. Her zaman aralığında yapılan işlemler tespit edilerek ağın yapısı oluşturulur. RNN ağ yapısı gizli durumları, verinin şimdiki zaman adımına kadarki tüm geçmiş bilgilerini içerir. Ancak her zaman artırımında kullanılan parametre sayıları değişmez.

Evrişimsel sinir ağları çalışma prensibi gereği girdi olarak matris formatında görüntü ya da videolar almaktadır. Bu çalışmada Şekil 1-a'da CIFAR-10 ve CIFAR-100 veri setleri için 32x32 ve 3x3'lük matrisler kullanılmıştır. MNIST ve Fashion MNIST veri setleri için ise Şekil 1-b'de gösterilen 28x28 ve 3x3'lük matrisler kullanılmıştır. Böylelikle matrise uyguladığımız filtre ile görüntü üzerinden belli özellikler elde edilmiştir.



(a) (b)

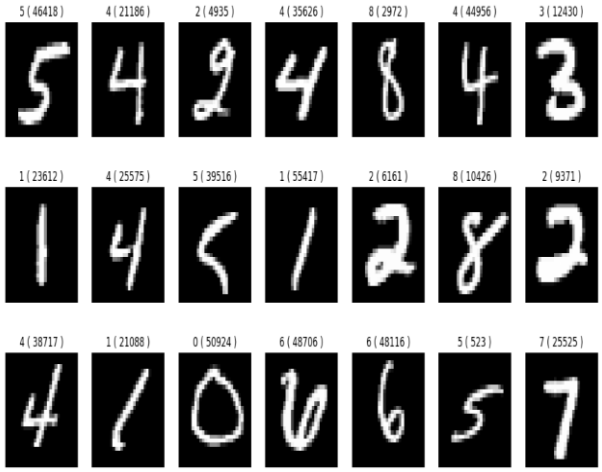
Şekil 1. a) CIFAR-10, CIFAR-100 veri setleri için matrise uygulanan filtre. b) MNIST ve MNIST Fashion veri setleri için matrise uygulanan filtre.

3.1 Veri setleri

Çalışmada kullanılan veri setlerinin özellikleri aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

3.1.1 MNIST veri seti

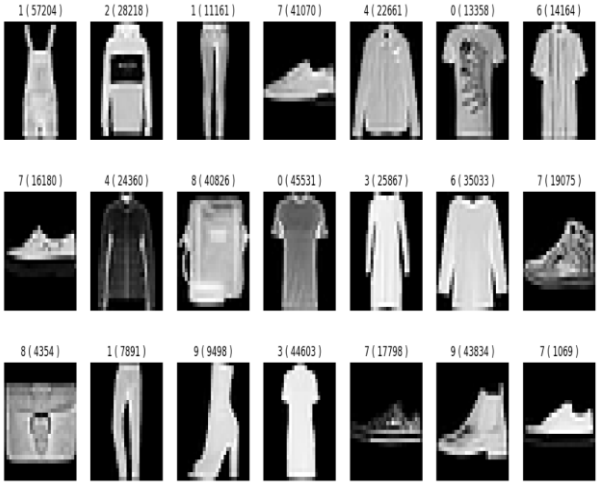
Derin öğrenmede temel veri setlerinden biri olarak kabul edilen bu veri seti el yazısı rakamlarından oluşmaktadır [38]. Başlangıç seviyesindeki birçok uygulama bu veri setini kullanmaktadır. Veri seti 60000 eğitim ve 10000 test görüntüsü olmak üzere toplamda 70000 görüntü içermektedir. Bu veri setindeki rakamlar 28x28 çözünürlükte siyah beyaz görüntüler olarak kaydedilmiştir. Veri setindeki her bir görüntü Şekil 2'te gösterildiği gibi sayısal değer karşılığıyla etiketlenmiştir.



Şekil 2. MNIST veri seti.

3.1.2 Fashion veri seti

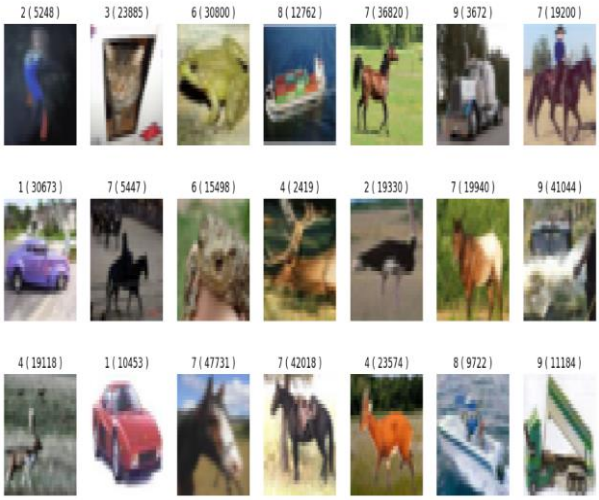
Fashion MNIST veri seti, yine çeşitli makine öğrenimi sistemlerini eğitmek ve test etmek için yaygın ve ücretsiz olarak kullanılan büyük bir moda görüntüleri veritabanıdır. Bu veri seti de 10 kategoriden moda ürünlerinin 28x28 çözünürlükte gri tonlamalı görüntülerini içermektedir. Kategori başına 7,000 olmak üzere toplamda 70000 görüntü içermektedir [39]. Eğitim seti 60000 görüntüden, test seti ise 10000 görüntüden oluşmaktadır. Şekil 3'te Fashion MNIST veri seti görülmektedir.



Şekil 3. Fashion MNIST veri seti.

3.1.3 CIFAR-10 veri seti

Yine temel veri setlerinden biri olan CIFAR-10 veri setinde [40] toplam 10 farklı sınıf bulunmaktadır. Bu sınıfların her biri 32x32 çözünürlükte ve renkli 6000 adet görüntüden oluşmakta ve veri setinde toplamda 60,000 görüntü bulunmaktadır. Bu görüntülerin 50000 tanesi eğitim ve 10000 tanesi de test görüntülerinden oluşmaktadır. Şekil 4'te her bir sınıfta bulunan rastgele veri kümeleri gösterilmiştir.



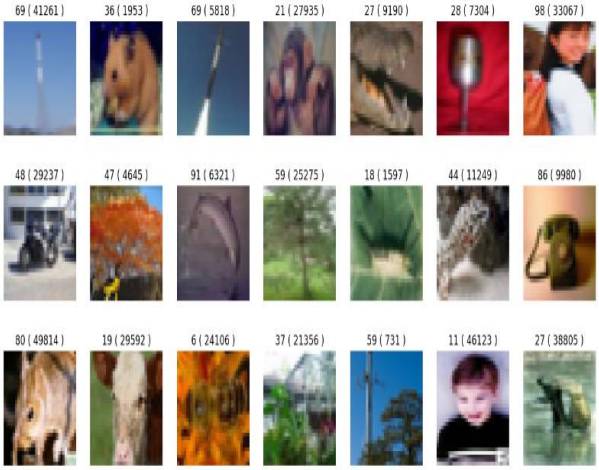
Şekil 4. CIFAR-10 veri seti.

3.1.4 CIFAR-100 veri seti

CIFAR-10 veri setinin geliştirilmiş hali olan CIFAR-100 veri setinde [40] 100 sınıf mevcuttur (Şekil 5). Her sınıf 600 görüntü içermekte olup sınıf başına 500 eğitim görüntüsü ve 100 test görüntüsü bulunmaktadır. Bu veri setindeki 100 sınıf 20 üst sınıfa ayrılmıştır. Her görüntü ait olduğu sınıf ve ait olduğu üst sınıf etiketi ile birlikte gelir. Veri setindeki alt ve üst sınıfların isimleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. CIFAR-100 veri setindeki alt ve üst sınıflar.

Üst Sınıf	Alt Sınıf
suda yaşayan memeliler	kunduz, yunus, su samuru, fok, balina
balık	akvaryum balığı, yassı balık, ray, köpekbalığı, alabalık
çiçekler	orkideler, gelincikler, güller, ayçiçekleri, laleler
gıda kapları	şişeler, kaseler, kutular, bardaklar, tabaklar
meyve ve sebzeler	elma, mantar, portakal, armut, tatlı biber
elektrikli ev aletleri	saat, bilgisayar klavyesi, lamba, telefon, televizyon
ev eşyası	yatak, sandalye, kanepe, masa, gardırop
böcekler	arı, böcek, kelebek, tırtıl, hamamböceği
büyük etoburlar	ayı, leopar, aslan, kaplan, kurt
insan yapımı büyük dış mekan yapıları	köprü, kale, ev, yol, gökdelen
büyük doğal dış mekan sahneleri	bulut, orman, dağ, ova, deniz
büyük omnivorlar ve otçullar	deve, sığır, şempanze, fil, kanguru
orta boy memeliler	tilki, kirpi, opossum, rakun, kokarca
böcek olmayan omurgasızlar	yengeç, ıstakoz, salyangoz, örümcek, solucan
insanlar	bebek, oğlan, kız, erkek, kadın
sürüngenler	timsah, dinozor, kertenkele, yılan, kaplumbağa
Küçük memeliler	hamster, fare, tavşan, kır faresi, sincap
ağaçlar	akçaağaç, meşe, palmiye, çam, söğüt
araçlar 1	bisiklet, otobüs, motosiklet, kamyonet, tren
araçlar 2	çim biçme makinesi, roket, tramvay, tank, traktör

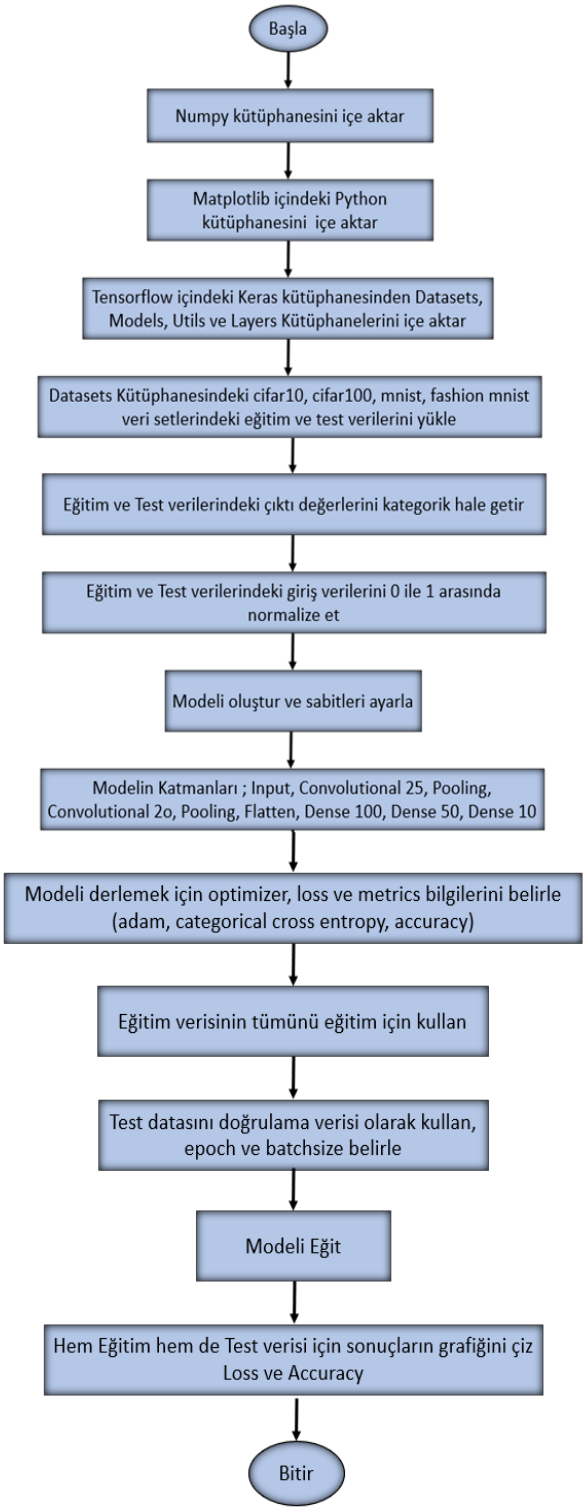


Şekil 5. CIFAR-100 veri seti

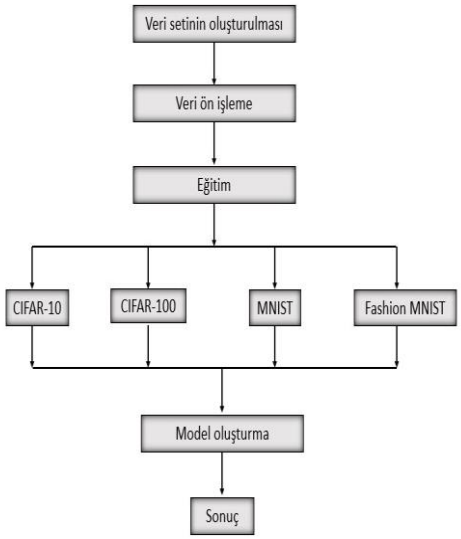
3.2 Önerilen model

Önerdiğimiz modelin işlem basamakları Şekil 6'da verilmiştir. Kullanılan dört veri setinin eğitim ve test verileri kategorik hale getirilmiş ve normalize edilmiştir. Önerdiğimiz ağ yapısına göre oluşturulan modelin başlangıç değerleri ile modelin katmanları ve parametreleri belirlenmiştir. Farklı iterasyon ve farklı epoch değerleri ile oluşturulan model eğitilmiş ve test verilerinin sınıflandırma sonuçları hesaplanmıştır.

Önerilen modelin iş akış şeması Şekil 7'de gösterilmiştir. Sinir ağı modellerinde her ne kadar çok katmanlı bir yapı kullanılabilse de bazı durumlarda doğruluk ve performans kaybı gözlemlenebilmektedir. Bu sorunları çözmek için çalışmamızda CNN ağları önerilmiştir. CNN ağları yapay sinir ağlarından farklı olarak evrişim ve havuzlama katmanları içermektedir. Böylelikle fazla katman eklenerek modelin performansı artırılabilir.



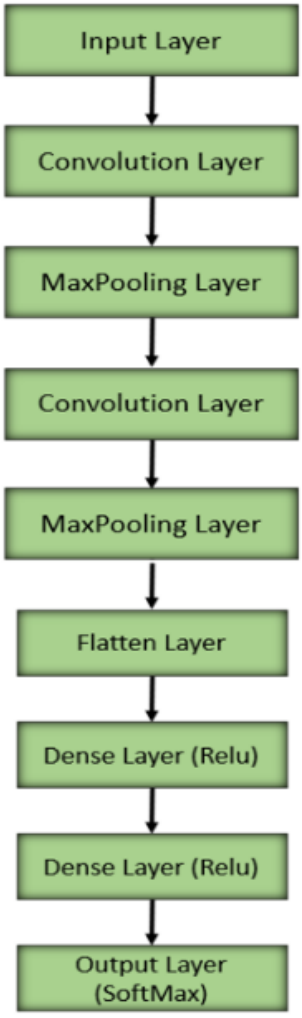
Şekil 6. Önerilen modelin işlem basamakları



Şekil 7. İş akış şeması

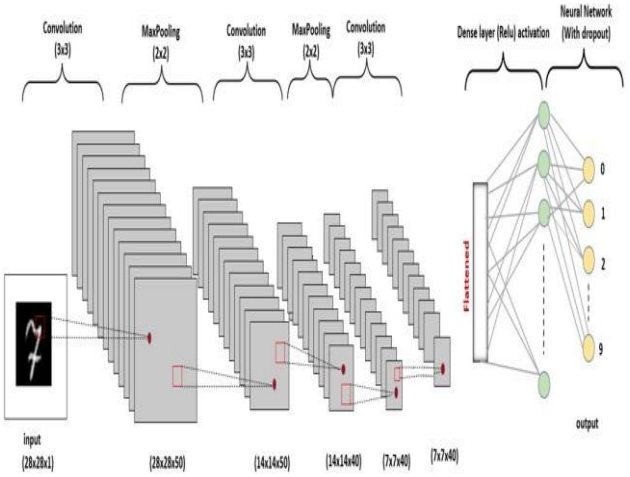
Şekil 8'de CNN katmanları gösterilmektedir.

- **Giriş Katmanı (Input Layer):** CNN'de giriş katmanı görüntü, ses ve sinyal verilerini gösterir. Giriş katmanında görüntü verisi 3 boyutlu matris ile ifade edilir. Girdi katmanın aldığı veri tipine göre, sinir ağında yapılacak işlemler de değişir. Sinir ağının yapısında bulunan katmanlar arası nöronların bağlantılarının ağırlıkları hesaplanılarak çıktı değeri bulunur. Her bir nöronun girdi değeri ağırlıkları ile çarpılır.
- **Evrişim Katmanı (Convolution Layer):** CNN'in temel katmanı olarak adlandırılabilir. Bu katmanda çeşitli filtreler kullanılarak verilen giriş görüntüsü üzerinden özellik çıkarımı gerçekleştirilir. Bu özellik çıkarımı matrisler biçiminde gösterilir ve görüntüye ait bilgiler matristeki değerlerle ifade edilir. Bu katmanda özelliklerin belirlenmesi için orijinal görüntü üzerinden bir filtre dolaşır. Bu katman görüntünün özelliklerini belirlemekten sorumludur. Evrişim katmanında orijinal görüntü üzerinde küçük bir filtre dolaşır ve görüntüdeki önemli özellikleri belirlemeye çalışır.
- **Maksiumum Havuzlama Katmanı (MaxPooling Layer):** Havuzlama katmanın amacı boyutu indrgemektir. Böylelikle işlem gücü azalır ve görüntüdeki daha önemli özellikler belirlenmiş olunur. CNN modellerinde çoğunlukla Max (Maksimum) ve Average (Ortalama) pooling olmak üzere iki tür havuzlama katmanı bulunmaktadır. Konvolüsyon yerine havuzlama tekniği uygulanır. Eğer maksiumum havuzlama uygulanıyorsa filtrenin en büyük değerini; ortalama havuzlama uygulanırsa filtredeki değerlerin ortalmasını alır.
- **Tam Bağlantılı Katman (Fully Connected Layer):** Bu katmanda havuzlama ve evrişimli katmanda oluşan görseller düz bir vektör halinde gösterilir. Bu katmanın kullanımından önce düzleştirme yapılır. Böylelikle bu katmanın girdileri oluşur.
- **Düzleştirici Katman (Flatten Layer):** En son katman için (Fully Connected Layer) verileri hazırlar. Evrişim ve Pooling katmanından gelen değerlerin tek boyutlu halini gösterir. Bundan önceki katmanlarda gerçekleştirilen işlemler matrisler şeklinde gerçekleştirilirken, bu katmanda ise işlemler tek boyutlu yapıda gerçekleştirilir.
- **Yoğun Katman (Dense Layer):** Relu, Sigmoid ve Tanh gibi aktivasyon fonksiyonlarıyla çıkışı belirler. Girdinin her bir düğümü çıkıştaki düğüme bağlıdır. Her bir katmanın girişi kendisinden önceki katmanın çıkışı ile belirlenir.
- **ReLU (Rectified Linear Unit):** Relu, doğrusal olmayan f(x) = max(0,x) şeklinde bir fonksiyondur. Örneğin -50 değerini alan bir ReLU fonksiyonu çıktı olarak 0'ı, 50 değerini alan bir fonksiyon ise 50'i verir. Temel fikir negatif değerlerden kurtulmak olan ReLU CNN'lerde oldukça önemli bir aktivasyon fonksiyonudur.
- **Çıkış Katmanı (Output Layer):** CNN sonucu elde edilen çıkış görüntüsünü gösterir.



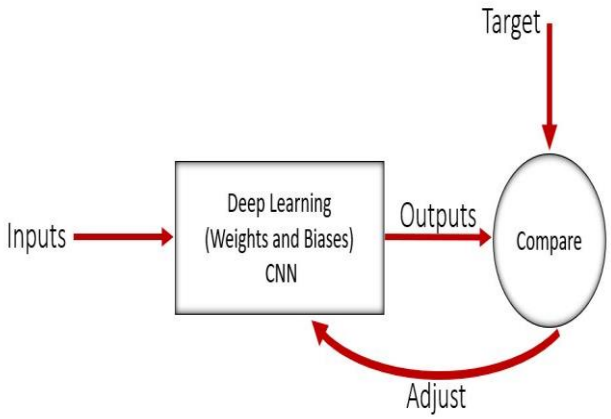
Şekil 8. CNN katmanları

Şekil 9'da önerdiğimiz modelin ağ yapısı gösterilmektedir. 3x3'lük bir filtre giriş görüntüsü üzerinde gezdirilerek öznitelikler tespit edilmeye çalışılır. Ağırlık ve bias değerleri sürekli güncellenerek öğrenme süreci oluşturulur. Çok sayıda evrişim katmanı arasında havuzlama katmanı bulunur. Bu katmanın amacı görüntünün boyutunu küçültmektir. 2x2'lik maksimum havuzlama katmanı ile görüntü boyutu dörtte bire indirgenir. Sonuç olarak görüntü sınıflandırılır.



Şekil 9. CNN ağı.

CNN ağlarındaki öğrenme süreci Şekil 10'da görüldüğü üzere ağırlık ve bias değerlerinin sürekli güncellenmesiyle gerçekleşir. Nöronlar verilen girdi değerlerini güncellenen ağırlıklar ile çarpıp bias değeriyle toplayarak üretilen sonucu aktivasyon fonksiyonundan geçirip bir sonraki nörona iletilerek çıktı görüntüsü elde edilir. Bulunan çıktı görüntüsü eğitim setindeki görüntüyle karşılaştırılarak test verisinin sınıfı tespit edilir.



Şekil 20. Genel ağırlıkların değişiminin gösterilmesi.

4 Bulgular ve tartışma

Tablo 2'de gösterilen Karışıklık Matrisine göre True Positive ve True Negative sınıfın doğru olarak bulunduğuunu, False Positive ve False Negative ise sınıfın yanlış bulunduğunu gösterir. Karışıklık Matrisi verilen gerçek sınıflar ile sınıflandırma işlemi sonucu doğru ya da yanlış olarak tahmin edilen sınıfları gösterir.

Tablo 2. Karışıklık matrisi.

		Tahmin edilen durumlar	
		Pozitif Durumlar	Negatif Durumlar
Gerçek durumlar	Pozitif	TP	FP
	Negatif	FN	TN

- **Doğruluk:** Tüm doğru tahminlerin tüm tahminlere oranı ile bulunur.

$$Doğruluk = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (1)$$

- **Kesinlik:** Positive doğru tahmin edilen bir durumdaki değerlerin başarısını gösterir.

$$Kesinlik = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

- **Duyarlılık:** Positive durumların ne kadar başarılı tahmin edildiğini gösterir.

$$Duyarlılık = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

- **F_1 Score:** Doğruluk gibi değerlendirme ölçütü olarak kullanılabilir. Kesinlik ve duyarlılık değerlerinin harmonik ortalaması alınarak bulunur.

$$F_1 = 2 * \frac{Kesinlik * Duyarlılık}{Kesinlik + Duyarlılık} \quad (4)$$

MNIST, Fashion MNIST, CIFAR-10 ve CIFAR-100 veri setleri için önerilen sistemin kesinlik (precision), duyarlılık (recall), doğruluk (accuracy) ve F1-skor değerlendirme kriterlerine göre sonuçları aşağıda sunulmuştur.

4.1 MNIST sonuçları

MNIST veri seti için kullandığımız katmanlar ve kullanılan parametre sayıları Tablo 3'te verilmiştir. Çalışmamızda öğrenme katsayısı 0.001, batch size 100, optimizasyon için adam optimizer algoritması ve değerlendirme metriği olarak da doğruluk kriteri belirlenmiştir. Tablo 4'te eğitim verisi için %99.88 başarı elde edildiği görülürken, test verisi için de %99.22 başarı elde edildiği Tablo 5'de görülmüştür.

Tablo 3. Kullanılan katmanlar ve parametreler.

Layer (type)	Output shape	Param #
Conv1 (Conv2D)	(None, 28, 28, 100)	1000
Batchnorm1 (Batchnormalization)	(None, 28, 28, 100)	400
Maxpool1 (Maxpooling2D)	(None, 14, 14, 100)	0
Conv2 (Conv2D)	(None, 14, 14, 100)	90100
Batchnorm2 (Batchnormalization)	(None, 14, 14, 100)	400
Maxpool2 (Maxpooling2D)	(None, 7, 7, 100)	0
Conv3 (Conv2D)	(None, 7, 7, 100)	90100
Batchnorm3 (Batchnormalization)	(None, 7, 7, 100)	400
Flatten1 (Flatten)	(None, 4900)	0
Dense1 (Dense)	(None, 100)	490100
Dropout1 (Dropout)	(None, 100)	0
Dense2 (Dense)	(None, 100)	10100
Dropout2 (Dropout)	(None, 100)	0
Dense3 (Dense)	(None, 10)	1010
Total params: 683,610		
Trainable params: 683,010		
Non-trainable params: 600		

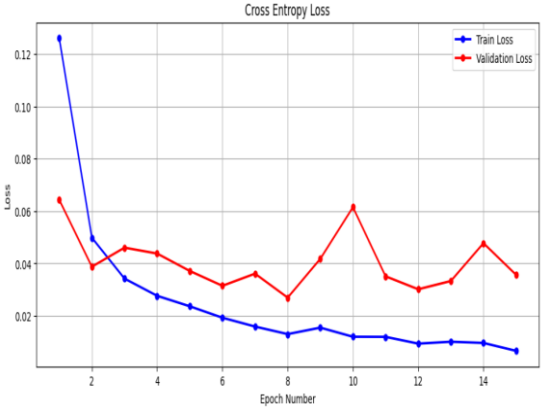
Tablo 4. Eğitim verisi başarı oranı.

Train Loss	Train Accuracy
0.0039570387452840805	0.9988833069801331

Tablo 5. Test verisi başarı oranı.

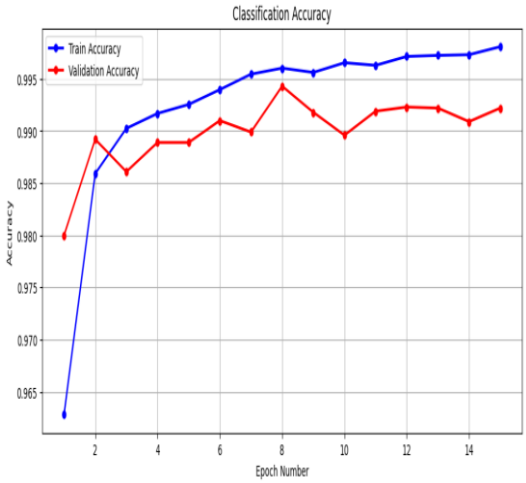
Test Loss	Test Accuracy
0.035637471824884415	0.9922000169754028

Kullandığımız veri seti için çapraz entropi (cross entropy) hata değerlerinin değişimi Şekil 11'de epoch değerlerine göre gösterilmiştir. Grafikte anlaşıldığı üzere 10. epoch da hata en yüksek ,15. epoch da hata en düşük olmaktadır.

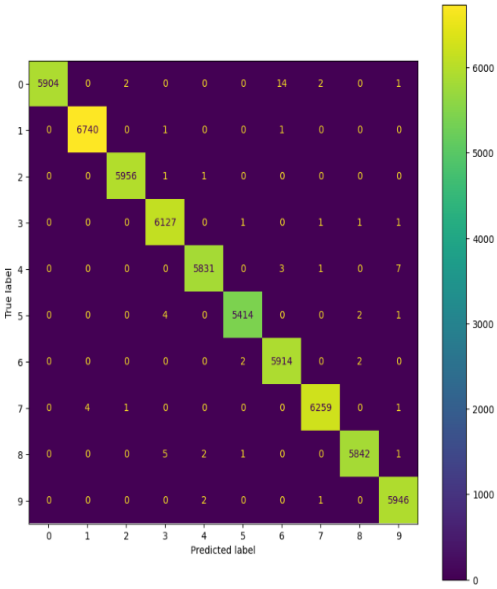


Şekil 31. Çapraz entropi hata grafiği.

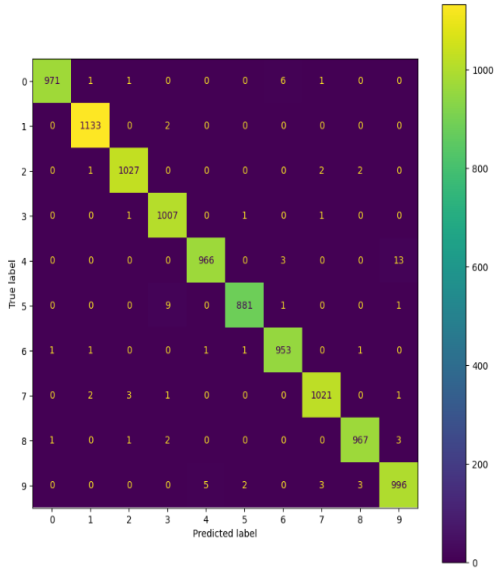
Ağırlıklar sürekli güncellenmekte olup, en iyi öğrenmenin 8. Epoch da gerçekleştiği Şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil 42. Sınıflandırma doğruluğu grafiği.



Şekil 53. Eğitim verisi (Karışıklık matrisi).



Şekil 64. Test verisi (Karışıklık matrisi).

Tablo 6 ve Tablo 7'de sırasıyla eğitim ve test verileri için (0'dan 9'a kadar karakterler) görüntülerin belirtilen değerlendirme metriklere göre sınıflandırma sonuçları verilmiştir.

Tablo 6. Eğitim için sınıflandırma raporu.

For train data				
	Precision	Recall	F1-score	Support
0	1.0000	0.9968	0.9984	5923
1	0.9994	0.9997	0.9996	6742
2	0.9995	0.9997	0.9996	5958
3	0.9982	0.9993	0.9988	6131
4	0.9991	0.9981	0.9986	5842
5	0.9993	0.9987	0.9990	5421
6	0.9970	0.9993	0.9981	5918
7	0.9992	0.9990	0.9991	6265
8	0.9991	0.9985	0.9988	5851
9	0.9980	0.9995	0.9987	5949
Accuracy			0.9989	60000
Macro avg	0.9989	0.9989	0.9989	60000
Weighted avg	0.9989	0.9989	0.9989	60000

Tablo 7. Test için sınıflandırma raporu.

For test data				
	Precision	Recall	F1-score	Support
0	0.9979	0.9908	0.9944	980
1	0.9956	0.9982	0.9969	1135
2	0.9942	0.9952	0.9947	1032
3	0.9863	0.9970	0.9916	1010
4	0.9938	0.9837	0.9887	982
5	0.9955	0.9877	0.9916	892
6	0.9896	0.9948	0.9922	958
7	0.9932	0.9932	0.9932	1028
8	0.9938	0.9928	0.9933	974
9	0.9822	0.9871	0.9871	1009
Accuracy			0.9922	10000
Macro avg	0.9922	0.9921	0.9921	10000
Weighted avg	0.9922	0.9922	0.9922	10000

4.2 MNIST fashion sonuçları

MNIST fashion veri seti için kullandığımız katmanlar ve kullanılan parametre sayıları Tablo 8'de verilmiştir. Çalışmamızda öğrenme katsayısı 0.001, batch size 100, optimizasyon için adam optimizer algoritması ve değerlendirme metriği olarak da doğruluk kriteri belirlenmiştir. Tablo 9'da eğitim verisi için %98.49 başarı elde edildiği görülürken, test verisi için de %92.21 başarı elde edildiği Tablo 10'da görülmüştür.

Tablo 8. Kullanılan katmanlar ve parametreler.

Layer (type)	Output shape	Param #
Conv1 (Conv2D)	(None, 28, 28, 100)	1000
Batchnorm1 (Batchnormalization)	(None, 28, 28, 100)	400
Maxpool1 (Maxpooling2D)	(None, 14, 14, 100)	0
Conv2 (Conv2D)	(None, 14, 14, 100)	90100
Batchnorm2 (Batchnormalization)	(None, 14, 14, 100)	400
Maxpool2 (Maxpooling2D)	(None, 7, 7, 100)	0
Conv3 (Conv2D)	(None, 7, 7, 100)	90100
Batchnorm3 (Batchnormalization)	(None, 7, 7, 100)	400
Flatten1 (Flatten)	(None, 4900)	0
Dense1 (Dense)	(None, 100)	490100
Dropout1 (Dropout)	(None, 100)	0
Dense2 (Dense)	(None, 100)	10100
Dropout2 (Dropout)	(None, 100)	0
Dense3 (Dense)	(None, 10)	1010
Total params: 683.610		
Trainable params: 683.010		
Non-trainable params: 600		

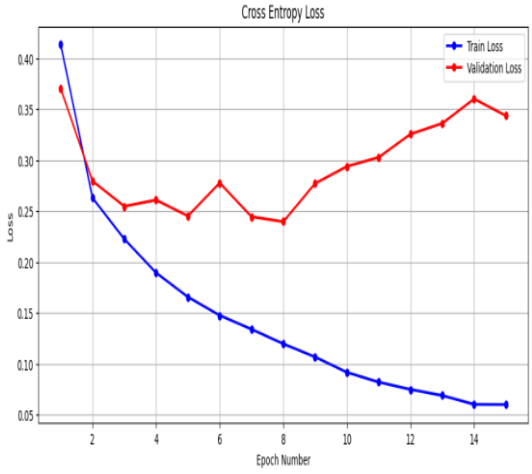
Tablo 9. Eğitim verisi başarı oranı.

Train Loss	Train Accuracy
0.04257245734333992	0.9849333167076111

Tablo 10. Test verisi başarı oranı.

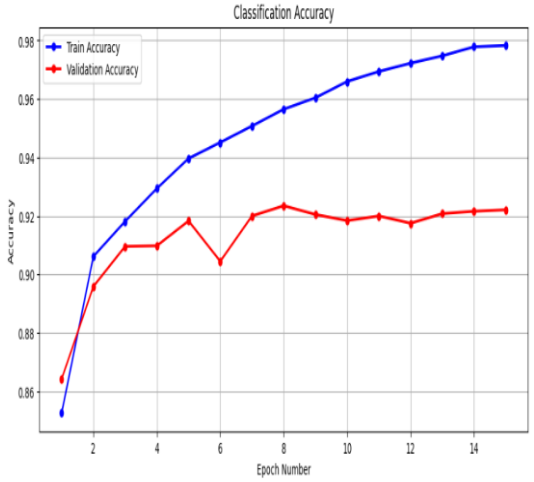
Test Loss	Test Accuracy
0.34361010789871216	0.9221000075340271

Kullandığımız veri seti için çapraz entropi (cross entropy) hata değerlerinin değişimi Şekil 15'te epoch değerlerine göre gösterilmiştir. Grafikte anlaşıldığı üzere 14. epoch da hata en yüksek,15. epoch da hata en düşük olmaktadır.



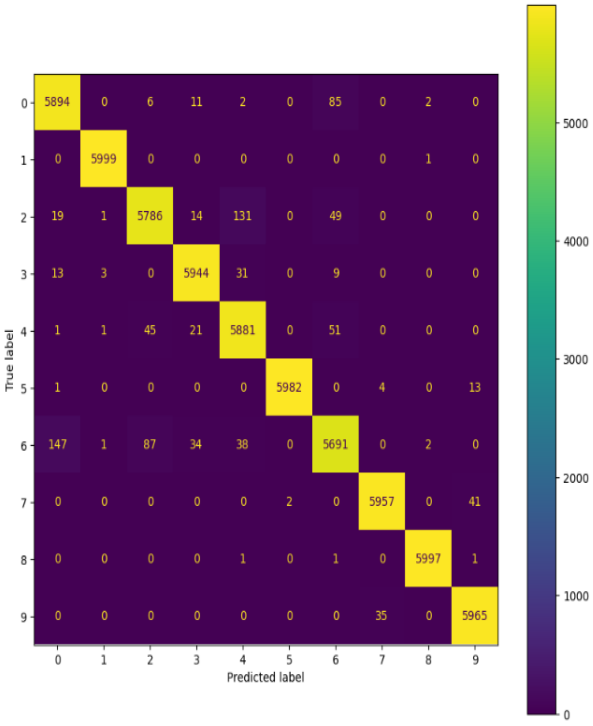
Şekil 75. Çapraz entropi hata grafiği.

Ağırlıklar sürekli güncellenmekte olup, en iyi öğrenmenin 8. Epoch da gerçekleştiği Şekil 16'da gösterilmiştir.



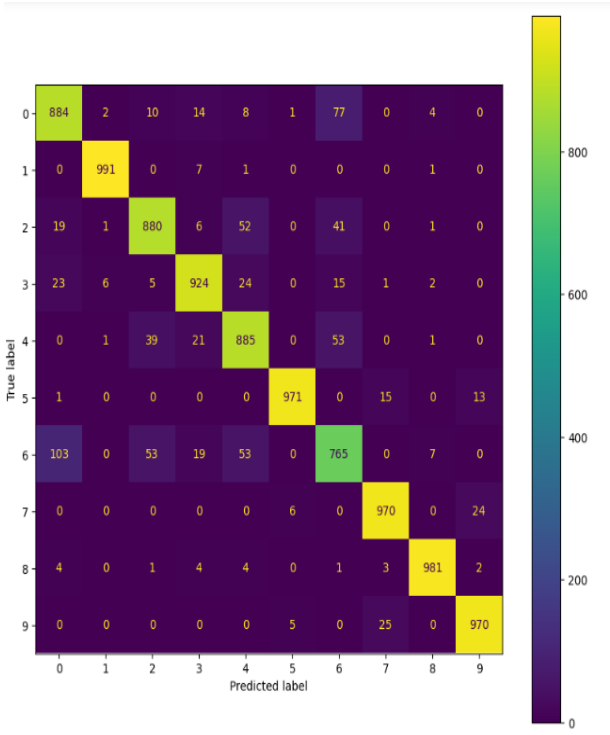
Şekil 86. Sınıflandırma doğruluğu grafiği.

Önerilen modelin eğitim ve test karışıklık matrisleri Şekil 17 ve Şekil 18'de gösterilmiştir. Buna göre eğitim ve test için en başarılı görüntü 2. görüntü iken en başarısız görüntü ise 7. görüntüdür.



Şekil 97. Eğitim verisi (Karışıklık matrisi).

Tablo 11 ve Tablo 12'de sırasıyla eğitim ve test verileri için (0'dan 9'a kadar karakterler) görüntülerin belirtilen değerlendirme metriklere göre sınıflandırma sonuçları verilmiştir.



Şekil 108. Test verisi (Karışıklık matrisi).

Tablo 11. Eğitim için sınıflandırma raporu.

For train data				
	Precision	Recall	F1-score	Support
0	0.9702	0.9823	0.9762	6000
1	0.9990	0.9998	0.9994	6000
2	0.9767	0.9643	0.9705	6000
3	0.9867	0.9907	0.9887	6000
4	0.9666	0.9802	0.9734	6000
5	0.9997	0.9970	0.9983	6000
6	0.9669	0.9485	0.9576	6000
7	0.9935	0.9928	0.9932	6000
8	0.9992	0.9995	0.9993	6000
9	0.9909	0.9942	0.9925	6000
Accuracy			0.9849	60000
Macro avg	0.9849	0.9849	0.9849	60000
Weighted avg	0.9849	0.9849	0.9849	60000

Tablo 12. Test için sınıflandırma raporu.

	For test data			
	Precision	Recall	F1-score	Support
0	0.8549	0.8840	0.8692	1000
1	0.9900	0.9910	0.9905	1000
2	0.8907	0.8800	0.8853	1000
3	0.9286	0.9240	0.9263	1000
4	0.8617	0.8850	0.8732	1000
5	0.9878	0.9710	0.9793	1000
6	0.8036	0.7650	0.7838	1000
7	0.9566	0.9700	0.9633	1000
8	0.9840	0.9810	0.9825	1000
9	0.9613	0.9700	0.9657	1000
Accuracy			0.9221	10000
Macro avg	0.9219	0.9221	0.9219	10000
Weighted avg	0.9219	0.9221	0.9219	10000

4.3 CIFAR-10 sonuçları

CIFAR-10 veri seti için kullandığımız katmanlar ve kullanılan parametre sayıları Tablo 13'te verilmiştir. Çalışmamızda öğrenme katsayısı 0.001, batch size 100, optimizasyon için adam optimizer algoritması ve değerlendirme metriği olarak da doğruluk kriteri belirlenmiştir. Tablo 14'te eğitim verisi için %95.64 başarı elde edildiği görülürken, test verisi için de %74.63 başarı elde edildiği Tablo 15'te görülmüştür.

Tablo 13. Kullanılan katmanlar ve parametreler.

Layer (type)	Output shape	Param #
Conv1 (Conv2D)	(None, 32, 32, 100)	2800
Batchnorm1 (Batchnormalization)	(None, 32, 32, 100)	400
Maxpool1 (Maxpooling2D)	(None, 16, 16, 100)	0
Conv2 (Conv2D)	(None, 16, 16, 100)	90100
Batchnorm2 (Batchnormalization)	(None, 16, 16, 100)	400
Maxpool2 (Maxpooling2D)	(None, 8, 8, 100)	0
Conv3 (Conv2D)	(None, 8, 8, 100)	90100
Batchnorm3 (Batchnormalization)	(None, 8, 8, 100)	400
Flatten1 (Flatten)	(None, 6400)	0
Dense1 (Dense)	(None, 100)	640100
Dropout1 (Dropout)	(None, 100)	0
Dense2 (Dense)	(None, 100)	10100
Dropout2 (Dropout)	(None, 100)	0
Dense3 (Dense)	(None, 10)	1010
Total params: 835.410		
Trainable params: 834.810		
Non-trainable params: 600		

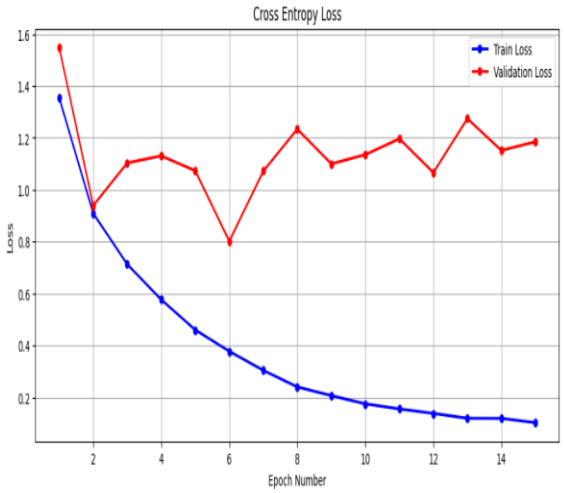
Tablo 14. Eğitim verisi başarı oranı.

Train Loss	Train Accuracy
0.1318219006061554	0.9564200043678284

Tablo 15. Test verisi başarı oranı.

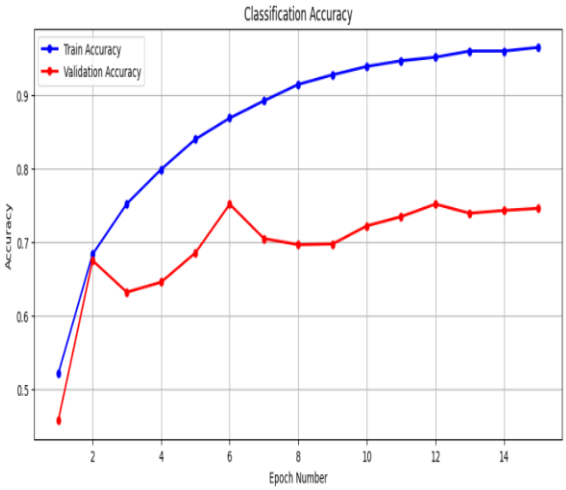
Test Loss	Test Accuracy
1.185105323791504	0.746399998664856

Kullandığımız veri seti için çapraz entropi (cross entropy) hata değerlerinin değişimi Şekil 19'da epoch değerlerine göre gösterilmiştir. Grafikte anlaşıldığı üzere 14. epoch da hata en yüksek,15. epoch da hata en düşük olmaktadır.



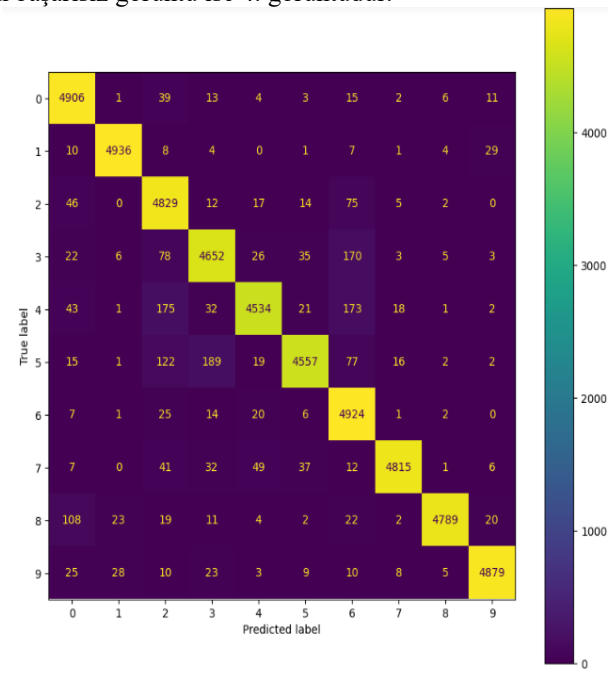
Şekil 119. Çapraz entropi hata grafiği.

Ağırlıklar sürekli güncellenmekte olup, en iyi öğrenmenin 6. Epoch da gerçekleştiği Şekil 20'de gösterilmiştir.

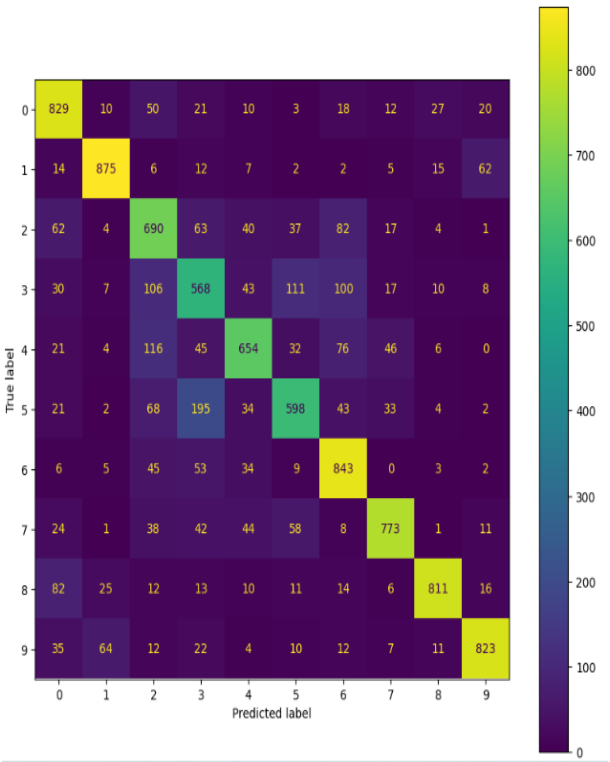


Şekil 20. Sınıflandırma doğruluğu grafiği.

Önerilen modelin eğitim ve test karışıklık matrisleri Şekil 21 ve Şekil 22'de gösterilmiştir. Buna göre eğitim için en başarılı görüntü 2.görüntü iken, en başarısız görüntü ise 5. görüntüdür. Test için ise en başarılı görüntü 2.görüntü iken, en başarısız görüntü ise 4. görüntüdür.



Şekil 212. Eğitim verisi (Karışıklık matrisi).



Şekil 22. Test verisi (Karışıklık matrisi).

Tablo 16 ve Tablo 17'de sırasıyla eğitim ve test verileri için (0'dan 9'a kadar karakterler) görüntülerin belirtilen değerlendirme metriklere göre sınıflandırma sonuçları verilmiştir.

Tablo 16. Eğitim için sınıflandırma raporu.

For train data				
	Precision	Recall	F1-score	Support
0	0.9455	0.9812	0.9630	5000
1	0.9878	0.9872	0.9875	5000
2	0.9033	0.9658	0.9335	5000
3	0.9338	0.9304	0.9321	5000
4	0.9696	0.9068	0.9372	5000
5	0.9727	0.9114	0.9410	5000
6	0.8977	0.9848	0.9392	5000
7	0.9885	0.9630	0.9756	5000
8	0.9942	0.9578	0.9757	5000
9	0.9853	0.9758	0.9805	5000
Accuracy			0.9564	50000
Macro avg	0.9578	0.9564	0.9565	50000
Weighted avg	0.9578	0.9564	0.9565	50000

Tablo 17. Test için sınıflandırma raporu.

For test data				
	Precision	Recall	F1-score	Support
0	0.7375	0.8290	0.7806	1000
1	0.8776	0.8750	0.8763	1000
2	0.6037	0.6900	0.6440	1000
3	0.5493	0.5680	0.5585	1000
4	0.7432	0.6540	0.6957	1000
5	0.6866	0.5980	0.6392	1000
6	0.7037	0.8430	0.7671	1000
7	0.8439	0.7730	0.8069	1000
8	0.9092	0.8110	0.8573	1000
9	0.8709	0.8230	0.8463	1000
Accuracy			0.7464	10000
Macro avg	0.7526	0.7464	0.7472	10000
Weighted avg	0.7526	0.7464	0.7472	10000

4.4 *CIFAR-100 sonuçları*

CIFAR-100 veri seti için kullandığımız katmanlar ve kullanılan parametre sayıları Tablo 18'de verilmiştir. Çalışmamızda öğrenme katsayısı 0.001, batch size 100, optimizasyon için adam optimizer algoritması ve değerlendirme metriği olarak da doğruluk kriteri belirlenmiştir. Tablo 19'da eğitim verisi için %87.73 başarı elde edildiği görülürken, test verisi için de %40.00 başarı elde edildiği Tablo 20'de görülmüştür.

Tablo 18. Kullanılan katmanlar ve parametreler.

Layer (type)	Output shape	Param #
Conv1 (Conv2D)	(None, 32, 32, 100)	2800
Batchnorm1 (Batchnormalization)	(None, 32, 32, 100)	400
Maxpool1 (Maxpooling2D)	(None, 16, 16, 100)	0
Conv2 (Conv2D)	(None, 16, 16, 100)	90100
Batchnorm2 (Batchnormalization)	(None, 16, 16, 100)	400
Maxpool2 (Maxpooling2D)	(None, 8, 8, 100)	0
Conv3 (Conv2D)	(None, 8, 8, 100)	90100
Batchnorm3 (Batchnormalization)	(None, 8, 8, 100)	400
Flatten1 (Flatten)	(None, 6400)	0
Dense1 (Dense)	(None, 100)	640100
Dropout1 (Dropout)	(None, 100)	0
Dense2 (Dense)	(None, 100)	10100
Dropout2 (Dropout)	(None, 100)	0
Dense3 (Dense)	(None, 10)	10100
Total params: 844.500		
Trainable params: 843.900		
Non-trainable params: 600		

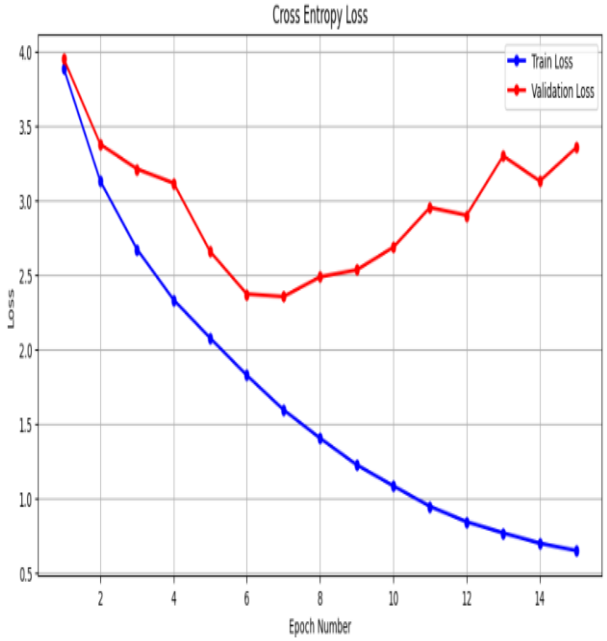
Tablo 19. Eğitim verisi başarı oranı.

Train Loss	Train Accuracy
0.41445985436439514	0.8773599863052368

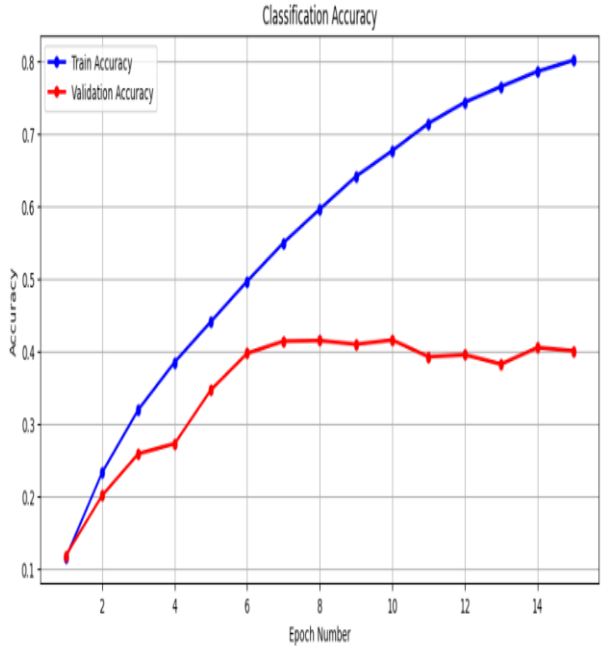
Tablo 20. Test verisi başarı oranı.

Test Loss	Test Accuracy
3.354889392852783	0.4000000059604645

Kullandığımız veri seti için çapraz entropi (cross entropy) hata değerlerinin değişimi Şekil 23'te epoch değerlerine göre gösterilmiştir. Grafikte anlaşıldığı üzere 14. epoch da hata en yüksek,15. epoch da hata en düşük olmaktadır. Ağırlıklar sürekli güncellenmekte olup, en iyi öğrenmenin 6. Epoch da gerçekleştiği Şekil 24'te gösterilmiştir.

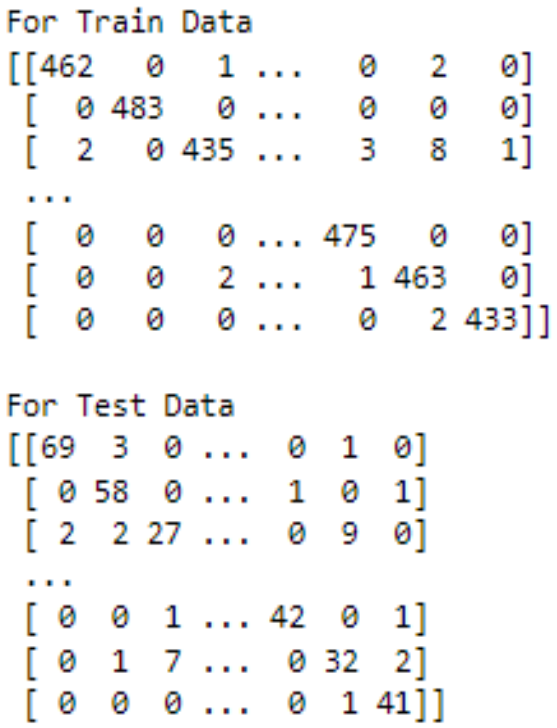


Şekil 23. Çapraz entropi hata grafiği.

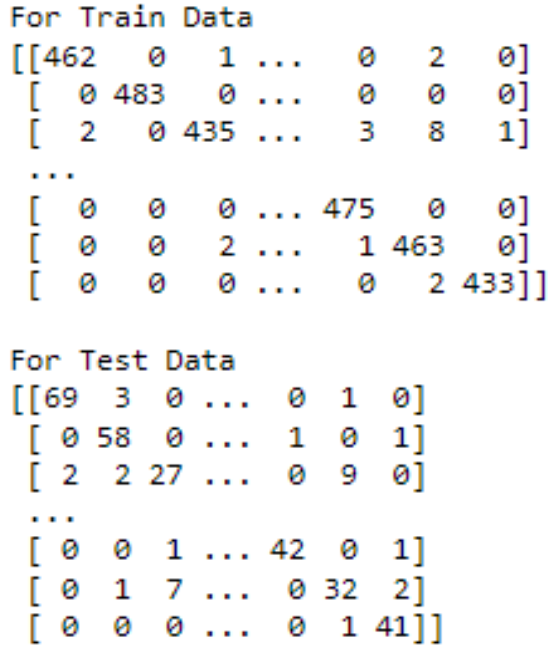


Şekil 24. Sınıflandırma doğruluğu grafiği.

Önerilen modelin eğitim ve test için karışıklık matrisi Şekil 25'te gösterilmiştir. Buna göre eğitim için en başarılı görüntü 24.görüntü iken, en başarısız görüntü ise 45. görüntüdür. Test için ise en başarılı görüntü 37.görüntü iken, en başarısız görüntü ise 14. görüntüdür.



Şekil 25. Eğitim ve test verisi için karışıklık matrisi.



Şekil 26. Eğitim ve test verisi için karışıklık matrisi.

Tablo 21 ve Tablo 22'de sırasıyla eğitim ve test verileri için (0'dan 99'a kadar karakterler) görüntülerin belirtilen değerlendirme metriklere göre sınıflandırma sonuçları verilmiştir.

Tablo 21. Eğitim için sınıflandırma raporu.

For Train Data				
	precision	recall	f1-score	support
0	0.9277	0.9240	0.9259	500
1	0.9200	0.9660	0.9424	500
2	0.8398	0.8700	0.8546	500
3	0.9117	0.8260	0.8667	500
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
97	0.8290	0.9500	0.8854	500
98	0.7578	0.9260	0.8335	500
99	0.7901	0.8660	0.8263	500
accuracy			0.8774	50000
macro avg	0.8838	0.8774	0.8772	50000
weighted avg	0.8838	0.8774	0.8772	50000

Tablo 22. Test için sınıflandırma raporu.

For Test Data				
	precision	recall	f1-score	support
0	0.6765	0.6900	0.6832	100
1	0.4496	0.5800	0.5066	100
2	0.2647	0.2700	0.2673	100
3	0.2500	0.2200	0.2340	100
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
97	0.3590	0.4200	0.3871	100
98	0.1916	0.3200	0.2397	100
99	0.3280	0.4100	0.3644	100
accuracy			0.4000	10000
macro avg	0.4211	0.4000	0.4015	10000
weighted avg	0.4211	0.4000	0.4015	10000

5 Sonuçlar

Çalışmamız farklı bir ağ yapısı ile modellenerek bu modelin dört veri seti için eğitim ve testlerdeki sınıflandırma başarısı doğruluk, duyarlılık, kesinlik ve F1 skoru metrikleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Önerdiğimiz CNN modeli görüntü sınıflandırma ve tahmin edilmesinde başarılı sonuçlar vermiştir. MNIST ve Fashion MNIST veri setleri için doğruluk oranları sırasıyla %99.22 ve %99.21 olarak gözlemlenmiştir.

Ayrıca, hem eğitim hem de test verilerinin doğruluk sonuçlarının grafikleri çalışmamızda ayrı ayrı gösterilmiş

olup kullanılan tüm veri setleri için en iyi ve en kötü bulunan görüntüler de tespit edilmiştir.

CIFAR-100 sonuçları istenilen değerlerin altında çıktığı için ilerleyen çalışmalarda daha derin bir ağ ya da hibrit yöntemlerin tasarlanıp kullanılması hedeflenmektedir.

Diğer çalışmalardan farklı olarak önerilen yeni ağ modeli ile farklı görüntülerde hem performans hem de hız olarak başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Daha fazla değerlendirme kriteri ile önerilen modelin daha fazla analiz edilmesi sağlanmıştır. Önerilen ağ modelinin amacı ileride biyomedikal görüntülerde, tıbbi verilerde hastalık tespiti ve sınıflandırılmasını daha doğru bir biçimde gerçekleştirmektir. İleride bu amaca yönelik çalışmalar yapılacaktır. Ayrıca gelecekte her hastalığa özgü farklı ağ modeline sahip yöntemler geliştirilecektir. Bu önerilen model gelecekte yapılacak çalışmaların temelini oluşturacaktır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir. Bu çalışma Yeşim TİRAKİ'nin yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %15

Kaynaklar

[1] E. Moen, D. Bannon, T. Kudo, W. Graf, M. Covert and D.Valen, Deep learning for cellular image analysis, Nature Metots, 16(12), 1233-1246, 2019.

[2] F. Cevik, Z. Kilimci, Derin öğrenme yöntemleri ve kelime yerleştirme modelleri kullanılarak Parkinson hastalığının duygu analiziyle değerlendirilmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 27(2), 151-161, 2020. https:// doi: 10.5505/pajes.2020.74429.

[3] Z. Pekoz and T. İnkaya, Derin öğrenme ile talep tahmini: Bir üçüncü parti lojistik firması için covid-19 döneminde vaka analizi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 1000(1000), 1-8, 2022. https:// doi: 10.5505/pajes.2022.73537.

[4] T. Karahan and V. Nabiyev, Plant identification with convolutional neural networks and transfer learning, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 27(5), 638-645, 2021. https:// doi: 10.5505/pajes.2020.84042.

[5] O. Abouelnaga and H. Ali, Cifar-10: knn-based ensemble of classifiers, 2016 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence, Las Vegas, Nevada, USA, 15-17 December 2016.

[6] G. Tushar, Comparative study of various convolutional neural networks on cifar-10, International Journal for Modern Trends in Science and Technology, 6(12), 402-406, 2020.

[7] H. Tien, Cifar-10 to compare visual recognition performance between deep neural networks and humans. arXiv, abs/1811.07270, 2018.

[8] R. Ju, Y. Lin and T. Jian, Efficient convolutional neural networks on raspberry pi for image classification, Journal of Real-Time Image Processing, 20(2), 1-9, 2023. https://doi.org/10.1007/s11554-023-01271-1

[9] A.Yahya, K. Liu, A. Hawbani and Y. Wang, A novel image classification metot based on residual network. Inception, and Proposed Activation Function. Sensors, 23(6), 2976, 2023. https:// /doi.org/10.3390/s23062976.

[10] X. Zhao, P. Huang P and H. Shu, Wavelet-attention CNN for image classification, Multimedia Systems, 28(3), 915-924, 2022. https://doi.org/ 0.1007/s00530-022-00889-8.

[11] K. Zhang, Y. X. Guo, 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.

[12] H. Shao, E. Ma, M. Zhu, X. Deng, S. Zhai, Mnist handwritten digit classification based on convolutional neural network with hyperparameter optimization, Intelligent Automation & Soft Computing, 36(3), 2023. https://doi.org/ 10.32604/iasc.2023.036323.

[13] E. Plesovskaya and S. Ivanov, Hierarchical classification on the mnist dataset using truncated svd and kernel density estimation, Procedia Computer Science, 212, 368-377, 2022.

[14] Y. Pei and L.Ye, Cluster analysis of mnist data set, In Journal of Physics: Conference Series, 2181(1), 12-12, 2022. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2181/1/012035.

[15] A. Henrique, Classifying garments from fashion-mnist dataset through CNNs, Journal Advances in Science Technology and Engineering Systems, 6(1), 989-994, 2021. https://doi.org/ 10.25046/aj0601109.

[16] Ş. Öztürk, Moda görseli sınıflandırma: düzenleyici teknikler ile evrişimsel sinir ağları uygulaması, Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi, 15(1), 66-76, 2022.https://doi.org/ 10.54525/tbbmd.1077432.

[17] S. Bhatnagar, D. Ghosal and MH. Kolekar, Classification of fashion article images using convolutional neural networks. Fourth International Conference on Image Information Processing, 357-362, India, 21-23 December 2017.

[18] K. Meshkini, J. Platos and H. Ghassemain, An analysis of convolutional neural network for fashion images classification (fashion-mnist). International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry, 85-95, Ostrava–Prague, Czech Republic, 2–7 December 2019.

[19] K. Greeshma and K. Sreekumar, Hyperparameter optimization and regularization on fashion-mnist classification, International Journal of Recent Technology and Engineering, 8(2), 3713-3719, 2019.https://doi.org/ 10.35940/ijrte.B3092.078219.

[20] M. Kayed, A. Anter and H. Mohamed, Classification of garments from fashion mnist dataset using cnn lenet-5 architecture. International Conference on Innovative Trends in Communication and Computer Engineering, 238-243, Aswan, Egypt, 8-9 February 2020.

[21] T. Hur, L. Kim and D. Park, Quantum convolutional neural network for classical data classification,

Quantum Machine Intelligence, 4(3), 1-18, (2022). https://doi.org/10.1007/s42484-021-00061-x.
[22] Y. Seo and K. Shin, Hierarchical convolutional neural networks for fashion image classification, Expert Systems with Applications, 116, 328-339, 2019. https://doi.org/ 10.1016/j.eswa.2018.09.022.
[23] OM. Khanday, S. Dadvandipour S and MA. Lone, Effect of filter sizes on image classification in cnn: a case study on cfar10 and fashion-mnist datasets, International Journal of Artificial Intelligence, 10(4), 872-878, 2021. https:// doi: 10.11591/ijai.v10.i4.pp872-878 .
[24] O. Nocentini, J. Kim and F. Cavallo, İmage classification using multiple convolutional neural networks on the fashion-mnist dataset, Sensors, 22(23), 9544, 2022. https:// doi: 10.3390/s22239544 .
[25] A. Vijayaraj, V. Raj and R. Dhanagopal, Deep learning image classification for fashion design, Wireless Communications and Mobile Computing, 2022, 1-10, 2022. https://doi.org/ 10.1155/2022/7549397.
[26] AC. Cleber, A novel multi-objective grammar-based framework for the generation of convolutional neural networks, Expert Systems With Applications, 212, 2023. https://doi.org/ 10.1016/j.eswa.2022.118670.
[27] R. Elyas, A. Akbari and B. Nasersharif, Uncertainty handling in convolutional neural networks. Neural Computing and Applications, 34, 16753-16769, 2022. https://doi.org/ 10.1007/s00521-022-07313-2.
[28] O. Güler and İ. Yücedağ, Hand gesture recognition from 2d images by using convolutional capsule neural networks, Arabian Journal for Science and Engineering, 47, 1211-1225, 2022. https://doi.org/ 10.1007/s13369-021-05867-2.
[29] G. Ryu and D. Choi, A hybrid adversarial training for deep learning model and denoising network resistant to adversarial examples, Applied Intelligence, 53, 1-14, 2022.
[30] AT. Silva and RS. Siebert, Densenet-dc: optimizing densenet parameters through feature map generation control, Revista de Informática Teórica e Aplicada, 27, 25-39, 2020.
[31] F. Assunção, N. Lourenço and P. Machado, Denser: deep evolutionary network structured representation, Genetic Programming and Evolvable Machines, 20, 5-35, 2019.
[32] AM. Hafiz, RA. Bhat RA and M. Hassaballah, Image classification using convolutional neural network tree ensembles, Multimedia Tools and Applications, 82(5), 6867-6884, 2023. https://doi.org/ 10.1007/s11042-022-13604-6.
[33] H. Gürkan ve A. Hanilçi, Evrişimsel sinir ağı ve qrs imgeleri kullanarak ekg tabanlı biyometrik tanıma yöntemi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 26(2), 318-327, 2020.
[34] P. Shinde ve S. Shah, A review of machine learning and deep learning applications, 2018 Fourth International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA), Pune, India, 16-18 August 2018.
[35] G. Ciaburro and B. Venkateswaran, Neural Networks with R: Smart Models using CNN, RNN, Deep Learning, and Artificial Intelligence Principles, Packt Publishing Ltd, Birmingham, 2017.
[36] M. Khishe and A. Safari, Classification of sonar targets using an mlp neural network trained by dragonfly algorithm, Wireless Personal Communications, 108(4), 2241-2260, 2019. https://doi.org/ 10.1007/s11277-019-06520-w.
[37] P. Zhang, J. Xue, C. Lan, W. Zeng, Z. Gao and N. Zheng, Eleatt-rnn: adding attentiveness to neurons in recurrent neural networks, IEEE Transactions on Image Processing, 29, 1061-1073, 2019. https://doi.org/ 10.1109/TIP.2019.2937724.
[38] CIFAR-10 and CIFAR-100, https://yann.lecun.com/exdb/MNIST/ (10. 05.2023)
[39] H. Xiao, R. Kashif and R.Vollgraf, Fashion-mnist: a novel image dataset for benchmarking machine learning algorithms. arXiv preprint arXiv:1708.07747, 2017.
[40] MNIST and Fashion MNIST, https://www.cs.toronto.edu/~kriz/cifar.html (10. 05.2023)

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 279-293

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Examining the environmental and economic dimensions of producing fuel from medical waste plastics

Tıbbi atık plastiklerden yakıt üretiminin çevresel ve ekonomik boyutlarının incelenmesi

Çağrı Ün[1,*]

[1] *Adana Metropolitan Municipality, 01120, Adana, Türkiye*

Abstract

The increasing challenge of managing medical waste plastics has spurred the exploration of various waste management strategies. This comprehensive study delves into the environmental and economic aspects of different approaches to medical waste management; incineration, landfilling, and pyrolysis, with a specific focus on plastics-to-fuels conversion. The study provides a critical assessment of these methods, highlighting their sustainability and environmental implications. In this study, it was conducted a Life Cycle Assessment (LCA), with a particular focus on comparing greenhouse gas (GHG) emissions. Notably, landfill, a commonly employed method for medical waste disposal, was found to produce lower GHGs than incineration and pyrolysis. However, it does have the drawback of leaving waste as a final product, and its long-term environmental consequences are uncertain, emphasizing the need to explore new technologies. Moreover, this study envisions the conversion of pyrolysis oil from medical waste plastics into a viable fuel source for circular economy, providing a sustainable solution to the growing problem of medical waste plastics. It predicts that in 2030, 799,163 kg of fuel can be obtained from medical waste plastic pyrolysis in the Adana province. As a result, the implementation of a circular economy through the utilization of medical waste plastic pyrolysis oil is projected to yield annual economic profits of up to $4,794,979. Furthermore, this approach has been verified to effectively reduce greenhouse gas (GHG) emissions compared to incineration. Moreover, this innovative strategy has been scientifically validated to substantially reduce greenhouse gas emissions, making it an environmentally responsible and economically promising solution for the future.

Keywords: Pyrolysis oil, Vehicle fuel, Life cycle assessment (LCA), Greenhouse gas (GHG) emissions, Medical waste plastics

Öz

Tıbbi atık plastiklerin yönetiminde giderek artan zorluklar, çeşitli atık yönetimi stratejilerinin araştırılmasını teşvik etmiştir. Bu kapsamlı çalışma; plastiklerin yakıtlara dönüştürülmesine özel olarak odaklanarak, tıbbi atık yönetimine yönelik farklı yaklaşımların (yakma, düzenli depolama ve piroliz) çevresel ve ekonomik yönlerini incelemektedir. Çalışma, bu yöntemlerin detaylı bir değerlendirmesini sunarak sürdürülebilirlik ve çevresel etkilerini vurgulamaktadır. Bu çalışmada, özellikle sera gazı (GHG) emisyonlarının karşılaştırılmasına adına bir Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) yapılmıştır. Özellikle, tıbbi atık bertarafı için yaygın olarak kullanılan bir yöntem olan düzenli depolamanın, yakma ve pirolize göre daha düşük sera gazı ürettiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, atığı nihai ürün olarak doğaya bırakma dezavantajına sahiptir ve uzun vadeli çevresel sonuçları belirsizdir, bu da yeni teknolojilerin araştırılması ihtiyacını ortaya koyar. Ayrıca bu çalışma, tıbbi atık plastiklerden elde edilen piroliz yağının döngüsel ekonomi için uygun bir yakıt kaynağına dönüştürülmesini ve büyüyen tıbbi atık plastik sorununa sürdürülebilir bir çözüm getirilmesini öngörmektedir. Adana ilinde 2030 yılında tıbbi atık plastik pirolizinden 799.163 kg yakıt elde edilebileceği öngörülmektedir. Sonuç olarak, tıbbi atık plastiklerinden elde edilen piroliz yağının kullanılması yoluyla döngüsel bir ekonominin uygulanmasının yıllık 4.794.979 $'a kadar ekonomik kazanç sağlayacağı öngörülmektedir. Ayrıca, bu yaklaşımın sera gazı (GHG) emisyonlarını yakmaya kıyasla etkili bir şekilde azalttığı doğrulanmıştır, bu da yakıt eldesini gelecek için çevresel açıdan sorumlu ve ekonomik açıdan umut verici bir çözüm haline getirmektedir.

Anahtar kelimeler: Piroliz yağı, Taşıt yakıtı, Yaşam döngüsü analizi (YDA), Sera gazı (GHG) emisyonları, Tıbbi atık plastikleri

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: cagri.un@adana.bel.tr (Ç. Ün)
Geliş / Recieved: 27.09.2023 Kabul / Accepted: 15.11.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngmuh.1367080

1 Introduction

In the past 65 years, of the 8.3 billion tons of plastic produced worldwide, only 12% was burned, 9% was recycled, and a staggering 79% remained in the environment. According to the World Economic Forum, without intervention, by 2050, there will be more plastic waste in the oceans than fish [1].

Approximately 33% of plastic waste finds its way into terrestrial environments or freshwater ecosystems. The majority of this plastic undergoes degradation, forming particles smaller than five millimeters, referred to as microplastics, and these degrade even further into nanoparticles, measuring less than 0.1 micrometers in size. The concern lies in the fact that these particles are infiltrating the food chain [2]. With current plastic consumption and waste management practices, it is expected that plastic waste reaching oceans and seas will further increase. After Egypt and Italy, Türkiye ranks as the third-largest contributor of plastic waste to the Mediterranean, according to a 2018 report by the World-Wide Fund for Nature. This report states that 144 tons of plastic waste from Türkiye, enters the Mediterranean daily. Plastics, particularly disposable plastic packaging and items, discarded cigarette filters, abandoned fishing nets, and nearly invisible microplastic particles measuring less than 5 millimeters in size, are frequently encountered in environment. The significant increase in plastic imports in Türkiye, particularly following China's bans on plastic imports in 2018, is a significant factor contributing to plastic pollution [3]. In 2015, while 381 million tons of plastic were produced, 55% of plastic waste was disposed of in landfills, 25% was incinerated (leading to carbon emissions), and only 20% was recycled. Without any intervention, United Nations Environment Programme (UNEP) estimated that by 2040, the annual accumulation of plastic waste in the oceans would increase from the current 11 million tons to 29 million tons, nearly tripling. Heads of state, environmental ministers, and representatives from 175 countries made a historic decision in March 2022 at the UN Environment Assembly in Nairobi, Kenya, to end plastic pollution and create an internationally legally binding agreement by the end of 2024 [4].

The swift build-up primarily results from the exponential growth in virgin plastic manufacturing, the protracted decomposition of discarded plastic waste, and the limited utilization of incineration (12%) and recycling (9%) [5]. It is evident that the world produces huge amount of plastic annually, and most of it poses harm to the environment and society after use. Scaling up the circular economy for plastics requires systematic changes in waste management and recycling, adopting a holistic approach to reduce, reuse, and recycle plastics [6].

1.1 Medical waste

Waste generated within healthcare facilities during diagnostics, treatment, and immunization constitutes a distinct category referred to as healthcare waste [7]. Healthcare waste can be categorized into two primary types; hazardous waste and non-hazardous or general waste. The World Health Organization (WHO) estimates that approximately 10-15% of healthcare waste falls into the hazardous category, encompassing infectious waste, pathological waste, sharps waste, chemical waste, pharmaceutical waste, cytotoxic waste, and radioactive waste [8]. Managing healthcare waste entails a series of steps, including segregation, collection, storage, transportation, treatment, and final disposal. This aspect demands particular attention in developing countries due to a lack of awareness and limited resources [9]. Effective segregation forms the foundation of appropriate healthcare waste management and involves sorting waste at the point of origin. Inadequate segregation leads to the mingling of general waste with hazardous waste, resulting in an increase in the volume of hazardous waste. Consequently, the lack of awareness regarding the benefits of segregation presents a substantial challenge to efficient healthcare waste management [10-13]. The healthcare sector was responsible for a substantial 4.4% of global carbon emissions in 2019, an alarming figure for a single source. Among this, an estimated 70% was attributed to medical waste [14].

Furthermore, the COVID-19 pandemic has significantly increased the amount of plastic waste due to single-use plastic sources such as personal protective equipment, test kits, and vaccine syringes [48]. The COVID-19 pandemic has had a profound impact on the generation and management of medical and plastic waste on a global scale. A stark example is seen in Wuhan, China, where hospitals experienced a daily production of approximately 240 tons of medical waste during the pandemic, a substantial increase from the pre-pandemic daily average of under 50 tons. To address this surge, China initiated the construction of waste facilities and deployed 46 mobile waste treatment plants. Meanwhile, the United Kingdom faced its own waste challenges, as research from University College London estimated that an individual using one disposable mask daily for a year could generate an astonishing 66,000 tons of plastic waste [15]. On a worldwide scale, it is estimated that the pandemic has led to the consumption of approximately 194 billion dis-posable masks and gloves each month, as reported in a study published in the Environmental Science and Technology journal. In response, countries like the UK delivered two billion units of personal protective equipment to healthcare workers within the first few months of the pandemic. Moreover, industries related to acrylic sheets and plexiglass saw a remarkable surge in production and sales, underscoring the global demand for protective materials [16].

The exponential growth in medical and plastic waste during the COVID-19 pandemic has presented an urgent and global challenge. Cities grappling with high COVID-19 infection rates have been strained in managing the massive increase in medical waste generated by healthcare facilities. The scale of waste production has overwhelmed waste management and processing capabilities. Given the persistence and high infectivity of the SARS-CoV-2 virus, many countries classify all hospital waste as infectious, necessitating high-temperature incineration, sterilization, and subsequent storage of the remaining ash. However, uncontrolled incineration of medical waste, often containing

plastics, poses environmental risks, including greenhouse gas emissions and the release of potentially hazardous compounds such as heavy metals, dioxins, polychlorinated biphenyls, and furans. In response to concerns about COVID-19 transmission, some nations have suspended recycling programs and instead prioritized incineration and landfilling for medical waste [17]. Amidst the ongoing COVID-19 pandemic, the generation of medical waste has seen a substantial surge. Effectively managing the disposal of medical waste is vital in order to mitigate the virus's transmission. Given these circumstances, it is imperative to reassess the management of medical waste in urban areas within the context of the COVID-19 pandemic. In numerous hospitals worldwide, a comparative analysis of medical waste generation during the COVID-19 period reveals an escalation ranging from 40% to 50% [18].

The use of single-use plastics has increased significantly with the COVID-19 pandemic. In 2020, it was approximated that 52 billion single-use facial coverings were manufactured, with 72% of these masks disposed of in landfills and 3% finding their way into the oceans [19]. These single-use masks, comprising various polymers such as polypropylene, polyurethane, polyacrylonitrile, polystyrene, polycarbonate, polyethylene, or polyester, contribute significantly to the challenge of managing pandemic-related waste [20].

1.2 Conversion methods of medical waste

In recent times, rapid urbanization has led to a rise in the production of healthcare waste. This upswing is influenced by various socio-economic and environmental factors, including the Human Development Index, life expectancy, mortality rates, and CO_2 emissions [21]. Handling medical waste plastics requires specific strategies due to their health risks. Several methods are employed for the conversion and treatment of medical waste plastics. The selection of waste treatment technologies, such as microwave irradiation, autoclaving, incineration, and chemical disinfection, depends on considerations such as health hazards, environmental consequences, societal acceptance, and economic feasibility. In numerous developing nations, straightforward yet inefficient and high-emission technologies are utilized for healthcare waste treatment due to factors like cost, accessibility, and practicability [22]. In certain instances, medical waste plastics can be incinerated in specialized facilities designed to minimize emissions and recover energy. Incineration is the most well-established and prevalent method for treating healthcare waste; however, it is not environmentally friendly or energy-efficient due to operational inefficiencies in incinerators [23]. Landfilling is a cost-effective and uncomplicated option for waste disposal. Although landfill technologies have progressed in developed nations in recent years, these advancements are limited in developing countries. In these regions, the management of disposal sites is often neglected, and open dumping remains the predominant method of waste disposal. Landfill sites release landfill gases, including methane (CH_4), contributing to global warming, and generate leachate that contaminates underground water sources. Improper landfill management poses risks to both human health and the environment [24]. Landfills can have long-term environmental impacts, including groundwater contamination and space limitations. Landfilling waste plastics has significant and multifaceted environmental consequences. As plastics degrade within landfills, they produce leachate, releasing harmful chemicals into the soil and groundwater, posing risks to water quality. Moreover, anaerobic decomposition of plastics generates methane, a potent greenhouse gas, contributing to climate change. This practice also contaminates soil, rendering it unsuitable for various uses, and poses a threat to wildlife, as animals may ingest or become entangled in plastic debris. Landfills containing plastics are visually unattractive, emit unpleasant odors, and contribute to noise pollution. Additionally, the long-lasting nature of plastics exacerbates their persistence in the environment, making it crucial to reduce plastic consumption, promote recycling, and develop alternative materials while implementing proper waste management practices to mitigate these adverse effects [25].

Autoclaving utilizes high-temperature steam for disinfection and sterilization, this method ensures safety but does not address resource recovery or GHG emissions. Chemical treatment processes neutralize hazardous components in medical waste plastics. Proper disposal of treated waste minimizes environmental impact. Using microwave technology efficiently disinfects medical waste plastics, reducing infection risks. Mechanical recycling involves sorting and recycling medical waste plastics, such as containers and equipment, after proper decontamination [26,27].

Disposing of plastic waste on land or in landfills results in the abiotic and biotic deterioration of plastics, during which plastic additives (such as stabilizers, detrimental colorants, plasticizers, and heavy metals) may seep and eventually penetrate different parts of the environment, resulting in contamination of soil and water. Research indicates that even after five years of being incorporated into sewage sludge and soils, microplastics [28] and synthetic polymer fibers are still observable [29].

The production of oil from waste plastics has faced challenges in commercialization, primarily due to the difficulty of producing liquid fuel on a smaller scale and meeting commercial fuel requirements. The process of obtaining fuel from plastic waste requires highly skilled personnel and advanced technology. Findings also show that the mixed composition of plastic waste and its variable quality pose challenges to producing liquid fuel from plastic waste [30].

Onwudili et al. emphasized the need for pre-processing of plastic waste before it enters the process of producing fuel or oil. The highly volatile nature of these plastics requires vaporization to be carried out at higher safety measures. In these aspects, kinetic models and reaction data are crucial in designing reactors [31].

Hossain et al. reported the highest achievable pyrolysis oil yield from medical plastic waste was 53% by weight, obtained at a temperature of 260 °C with a feed size of 0.65 cm^3. Remarkably, the fuel properties of the resulting

pyrolysis oil were found to be on par with those of diesel and furnace oil [32].

Aydin and Un stated that medical waste plastic oil can be seamlessly blended with diesel fuel at a 10% ratio and employed in waste collection trucks without necessitating any modifications. Furthermore, this 10% oil addition to diesel not only allows for the use of medical waste plastic as an oil source but also leads to a reduction in CO and CO_2 emissions [33].

Pyrolysis stands as a transformative method for managing plastic waste, involving the thermal decomposition of plastics through a process known as destructive distillation. This process essentially reverses the physical phase and chemical composition of waste plastics. Long-chain polymer molecules within plastics undergo conversion into shorter and less complex molecules. Pyrolysis necessitates the application of high temperatures for a brief duration while excluding oxygen. The key determinant of the range of pyrolysis products lies in the design of the pyrolysis reactor itself. Various types of pyrolysis reactors are employed in processing waste plastics through pyrolysis. When crafting a pyrolysis reactor, two primary criteria come into play: the maintenance of efficient heat transfer and the minimization of residence time. A lower heat transfer rate and an extended residence period can lead to an increased production of char and gas products. Among the commonly reviewed types of reactors used in plastic waste treatment through pyrolysis are batch and semi-batch reactors, fixed bed reactors, fluidized bed reactors, conical spouted bed reactors, auger reactors, and microwave-assisted reactors [34,35]. Pyrolysis is a method used to thermally break down large polymeric molecules found in medical waste into smaller molecules, typically in an environment with limited oxygen or completely devoid of oxygen. Plastic waste can be subjected to thermal degradation within the temperature range of 540–830 °C in the absence of oxygen [36]. Thermal pyrolysis requires an energy input since it is an endothermic process. On the other hand, catalytic pyrolysis involves the use of catalysts to accelerate the chain-breaking reactions. Variations in the feedstock and operational conditions during pyrolysis can result in different final product states, including solid, liquid, and gas [37]. Researchers demonstrated that pyrolysis technology has the potential to convert medical waste into valuable products, such as biofuel for alternative energy sources and biochar for adsorption purposes [38]. The pyrolysis of medical waste can yield liquid fuels that can be utilized as an energy source for powering tur-bines and generators, leading to electricity generation [39].

The FTIR analysis indicated that face masks are composed of polypropylene, while gloves are made of PVC thermoplastic polymer. These materials can be readily converted into fuel energy through the process of pyrolysis. Notably, we observed endothermic peaks at approximately 431 ℃ for medical gloves and 175 ℃ for surgical masks, which correspond to the respective melting points of PVC and polypropylene plastic polymers [40]. Singh et al. stated that for studies; at elevated temperatures, a substantial increase in gaseous components were observed, resulting in a reduction in char content and a concurrent rise in the wax fraction within the oil product. Gas production was assessed through time-dependent pressure analysis of the procedure. The primary gases generated were alkene compounds, including methane, ethane, propane, and n-butane [41]. Additionally, it has been suggested that pyrolysis technology could potentially create more job opportunities based on a social management analysis [42].

The oil derived from plastic waste typically contains a higher sulfur content when compared to traditional fuel oil. This necessitates users of pyrolysis oil to install environmental protection devices to cleanse the emitted flue gases. This has raised concerns among users and environmental advocates due to the potential for sulfur emissions leading to increased instances of acid rain. Pyrolysis oil exhibits a higher sulfur content in contrast to conventional gasoline, kerosene, and commercial-grade diesel. As an example, the sulfur content in waste pyrolysis oil was measured at 0.246%, whereas diesel oil contains 0.15% and gasoline just 0.014%. When mixed plastics are utilized, studies have reported a 4.8% sulfur content in thermal pyrolysis and 4.36% in catalytic pyrolysis liquid fuel derived from mixed waste plastics [43,44].

The primary products of plastic pyrolysis include pyrolysis oil, a gas rich in hydro-carbons with a heating value ranging from 25 to 45 MJ/kg, a density ranging from 0.77 to 0.86 g/cm^3, and a cetane number between 40 and 60, making it an ideal source for process energy recovery, as well as char [45,46]. Consequently, the pyrolysis gas can be reintroduced into the process to extract energy for process heating, significantly reducing reliance on external heat sources.

The utilization of pyrolysis oil extends to serving as a viable transport fuel, with applications spanning gas turbine fuels, diesel generators, the aviation industry, and jet propulsion. When adequately mixed with diesel at appropriate proportions, pyrolysis oil can be applied in a variety of scenarios, including as fuel for boiler furnaces, in the production of lubrication oil, waxes, and as a feedstock for plastic production. The process of pyrolyzing waste plastic offers a more sustainable solution to the issue of plastic waste pollution, reducing dependence on fresh oil resources. Increased investment in and the adoption of waste plastic pyrolysis oil will alleviate the demand for newly extracted fossil fuels. Moreover, blending it with renewable fuels for power generation positions plastic waste pyrolysis as a notable contributor to the ongoing energy transition toward low-carbon power generation and consumption. [47].

Policymakers and healthcare facilities should prioritize waste management strategies that prioritize the reduction of GHG emissions, environmental protection, and public health.

Overall, the choice of waste disposal method should consider a broader range of factors, including GHG emissions, resource recovery, energy production, and long-term environmental impact. Pyrolysis holds promise for converting plastic waste into valuable products, but further research and technological advancements are needed to minimize its GHG emissions and maximize its efficiency. Additionally, a comprehensive waste management strategy

may involve a combination of methods to achieve both environmental and resource recovery goals effectively.

1.3 Life cycle assessment (LCA) studies

Life cycle assessment (LCA) serves as a valuable tool for evaluating the environmental impacts associated with waste management scenarios. It encompasses various emission-related factors, including energy and material flows, the effects of inputs and outputs, and aids in result interpretation to make well-informed decisions [69].

The ISO 14040 standard defines Life Cycle Assessment (LCA) as a technique for assessing the environmental aspects and potential impacts associated with a product. LCA involves four main steps Initial step involves defining the specific goals and boundaries of the LCA study. It outlines what is being assessed and what environmental aspects and impacts are of interest. Life Cycle Inventory (LCI) stage encompasses data collection and the development of a calculation procedure to quantify the inputs and outputs of the system under investigation. It involves identifying and quantifying all relevant materials, energy, and emissions associated with the product or process. The results from the LCI are related to environmental impact indicators and categories. This step is where the raw data collected in the LCI are transformed into meaningful environmental impact assessments. The interpretation phase is essential for evaluating the results of the LCA. It involves checking for completeness, consistency, sensitivity, accuracy, and uncertainty of the results obtained. It ensures that the findings are reliable and can be used to inform decision-making [70].

LCA is a versatile approach that can be applied in various contexts, such as to com-pare the environmental performance of two different systems, products, or processes. This might include assessing their energy usage, total life cycle cost, and greenhouse gas (GHG) emissions [71].

LCA provides a systematic framework for assessing and comparing the environmental impacts of different options, allowing stakeholders to make informed decisions that consider the environmental aspects of their choices. In this study, LCA processes related to incineration, pyrolysis, and landfill methods, which are among the disposal methods of medical waste, are examined and compared.

The evaluation of environmental consequences associated with the management of mixed plastic waste reveals significant disparities depending on the chosen disposal method. Pyrolysis process yields a relatively modest release of 0.739 kilograms of carbon dioxide equivalent (CO_2e) for every kilogram of mixed plastic waste processed. In stark contrast, the incineration of mixed plastic waste leads to a much larger carbon footprint, emitting 1.777 kilograms of CO_2e per kilogram of waste. On the other hand, the disposal of mixed plastic waste in landfills results in a notably lower environmental impact, contributing just 0.154 kilograms of CO_2e to the overall environmental balance [22,61].

1.4 Medical waste management in Türkiye and Adana city

According to data from the Ministry of Environment, Urbanization, and Climate Change in Türkiye for the year 2019, approximately 3.7 million tons of plastic waste, which is 12% of the annual 31 million tons of municipal waste produced in Türkiye, are generated each year. Türkiye's per capita plastic consumption has increased by approximately 10% in the last three years, surpassing 90 kilograms [48].

In the context of the 11th Development Plan of the Republic of Türkiye, the following key approaches are recommended for environmental and natural resource management:

- Emphasizing a holistic approach that considers social inclusivity and sustainable environmental practices within the framework of economic development.
- Contributing to the sustainable management of resources through innovation and technological advancements.
- Adopting comprehensive and ecosystem-based approaches in sectoral and project-level planning.
- Transitioning to a new environmental management approach at the macro level, prioritizing sensitive areas.
- Promoting the principles of a circular economy throughout all aspects of life, efficient waste management, and a zero-waste approach [49].

Türkiye recycles approximately 1.1 million tons of plastic waste annually. Türkiye’s plastic raw material sector, which results in a significant trade deficit, relies heavily on imports, accounting for 80%. The plastic recycling sector has the potential to reduce the plastic raw material trade deficit by 36% by 2030. It is expected that the global market size for the plastic recycling sector will reach $900 billion in 2050 at current prices. If Türkiye continues its current growth trajectory, it will have a $3.2 billion industry by 2025 and a $63 billion industry by 2050 [50].

The increasing problem of plastic waste in recent years has created various environmental issues worldwide and in Türkiye. In 2020, it was found that waste services were provided in 1,387 out of 1,389 municipalities in Türkiye. Of the waste collected in municipalities with waste services, 69.4% goes to sanitary landfills, 17% to municipal dumps, and 13.2% to recycling facilities. Only 0.4% is disposed of by burning in the open, burying, or dumping in rivers or land. The average daily waste generated per person in municipalities with waste services is calculated as 1.13 kilograms. Additionally, 110,000 tons of medical waste were collected from healthcare facilities.

Of the total medical waste, 23.7% was collected from healthcare facilities in Istanbul, 7.8% from Ankara, and 5.8% from Izmir. Of the collected medical waste, 90.6% was sterilized and sent to storage areas, while 9.4% was sent to incineration facilities for disposal [51].

The management of medical waste in Türkiye, as outlined in Law No. 5216 on Metropolitan Municipality and the Regulation on the Control of Medical Waste, entails clear responsibilities and procedures. These responsibilities are divided between metropolitan municipalities in metropolitan areas and municipalities in areas without metropolitan municipalities. The Regulation on the Control of Medical

Waste, effective since January 25, 2017, and published in the Official Gazette No. 29959, establishes the fundamental principles for the handling of medical waste generated by healthcare institutions [52].

According to this regulation, medical waste is subject to rigorous control measures throughout its lifecycle. Adana Metropolitan Municipality, as an example, adheres to these guidelines by periodically inspecting waste collection from healthcare institutions within the province. The inspections ensure that medical wastes from hospitals and other healthcare facilities are collected and temporarily stored in compliance with the regulation, utilizing appropriate waste bags. The collected medical wastes are then transported and managed using non-compacting vehicles that conform to the regulation's specifications. Notably, certain items, such as serum bottles and glass items, are collected separately [53].

To render the collected medical waste harmless, a medical waste sterilization unit is employed, with the capacity to process 8-10 tons of medical waste daily in Adana. The sterilization process utilizes pre-shredding autoclave technology and employs steam at a temperature of 135°C. This rigorous sterilization procedure ensures the safe management of medical waste, mitigating potential health and environmental risks [30].

In alignment with the "polluter pays" principle, a financial system has been established under the regulation to manage the expenses associated with medical waste collection, transportation, and disposal. Healthcare institutions, as the generators of waste, bear the responsibility for these costs and make payments to the municipalities accordingly. The determination of fees related to medical waste management is carried out by Provincial Local Environmental Boards.

The collected medical wastes are documented with a receipt at the end of the month, summaries are prepared, and after preparing the summary for all healthcare institutions, the municipality invoices them through the municipal software system. The same procedures for medical waste are also applied to pathological wastes. Pathological waste refers to tissues, organs, body parts, body fluids, and fetuses resulting from surgical procedures, autopsies, anatomy, or pathological studies. Detailed medical waste data of Adana province between 2014 and 2021, are shown in Table 1.

Table 1. Adana province medical waste amount (2014-2021) [30]

Year	Medical waste amount (kg/year)	Amount of Pathological Waste (kg/year)	Total (kg/year)
2014	2,795,975	-	2,795,975
2015	3,018,300	-	3,018,300
2016	3,145,240	12,632	3,157,872
2017	3,190,990	12,133	3,203,123
2018	3,296,083	14,436	3,310,519
2019	3,084,679	14,741	3,099,420
2020	3,730,256	22,017	3,752,273
2021	3,759,115	18,546	3,777,661

The primary objective of this research endeavor was to conduct a comprehensive assessment of the various disposal methodologies for medical waste, which possess the potential for substantial environmental detriment. This evaluation encompassed a detailed analysis of Adana city's medical waste values and sought to provide a forward-looking projection in the context of future environmental impact mitigation. As seen in Figure 1, obtaining a product resulting in a vehicle fuel instead of a disposal method resulting in landfill is the method of approach of this study. The precise research objectives of this investigation encompass; (a) the quantification of the anticipated quantities of medical waste in Adana City and (b) Comprehensive assessment of environmental aspects associated with various approaches to the management of medical waste plastics using LCA.

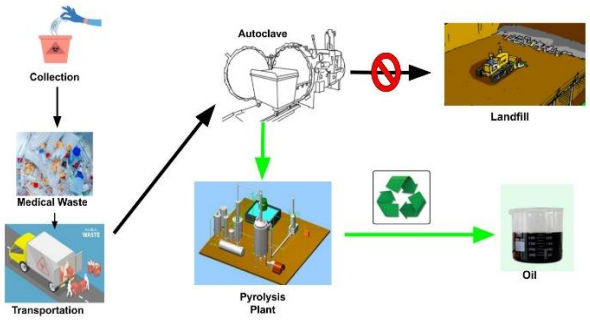


Figure 1. Method of approach

2 Material and method

The estimation of future quantities of medical waste is a critical concern for public health and environmental planning in urban areas like Adana city. Linear regression, a widely employed statistical method, is chosen for this study due to its suitability in modeling the relationship between a dependent variable (medical waste) and an independent variable (population). The selection of this method is rooted in its appropriateness in the context of population growth and its concomitant impact on the generation of medical waste.

In this specific case, linear regression is applied to project medical waste quantities (the dependent variable) based on the temporal variable representing the years from 2014 to 2021. The linear regression equation employed is represented at Equation (1).

$$\text{Medical Waste Amount (kg/year)} = \beta 0+\beta 1.Xi \quad (1)$$

Medical waste amount is the predicted medical waste amount in kilograms per year.

- β0 denotes the intercept, representing the estimated waste amount when the population is zero.
- β1 signifies the slope of the regression line, indicating how the waste amount changes for a unit change in population (Xi).

To conduct this analysis, data is meticulously collected from two primary sources:

- Population Data: Historical population data for Adana city, Türkiye, spanning from the years 2014 to 2021, is obtained. The population data for the city of Adana was sourced from the Turkish Statistical Institute. Additionally, projected population estimates for the years 2022 to 2030 are considered. Population data serves as the independent

variable in the linear regression model, illustrating the effect of the changing population on medical waste generation.

- Medical Waste Data: Historical data on medical waste amounts for Adana city is collected, covering the years 2014 to 2021. This data serves as the dependent variable in the analysis and is crucial for estimating future medical waste quantities.

To estimate the population growth over time, also the simple exponential growth model was used (Equation 2).

$$\text{Population}(t) = \text{Population}(2014) * e \wedge (r * (t - 2014)) \quad (2)$$

where:

- Population (t) is the population in the year 't.'
- Population (2014) is the population in the base year 2014.
- 'r' represents the assumed annual population growth rate.
- 'e' is the base of the natural logarithm (approximately 2.71828).

A simple linear regression model is applied to predict medical waste amounts based on population. The simplicity of this model is suitable for this study as it allows us to discern the direct linear relationship between the population and the generation of medical waste. Using the linear regression equation, the projected population estimates for the years 2022 to 2030 are incorporated. Through this, it is possible to calculate the estimated medical waste amounts for each year. This forecasting of medical waste quantities plays a pivotal role in developing policies and infrastructure for waste management and disposal in Adana city, taking into account the expected population growth and its associated implications for healthcare waste. The utilization of linear regression in estimating future medical waste quantities in Adana city is a scientifically sound approach, grounded in statistical principles. By examining the linear relationship between population and medical waste, this study contributes to informed decision-making for the sustainable management of medical waste in the region.

When examining the examples from around the world, healthcare facilities within the United States produce an approximate daily waste volume of 14,000 tons. It is approximated that within this daily waste output, plastic packaging and plastic items contribute to roughly 20-25 percent. Furthermore, a substantial 85 percent of the generated waste is classified as non-infectious [54].

Medical waste primarily comprises various components, including paper, plastics, cotton, metals, and other materials [55]. The table presented below (Table 2) displays the results obtained from the global content analysis of medical wastes. Among the plastics commonly encountered in medical waste (constituting 33% by weight), one can identify polyethylene terephthalate, polyolefins (such as high density polyethylene, low density polyethylene, and polypropylene), polyurethanes, polystyrene, and polyvinyl chloride (making up 60% of the total plastic content in medical waste). These plastics hold significant potential as hydrocarbon sources for the chemical industry. Medical waste stems from disposable items like syringes, gloves, tubes, bags, trays, prosthetics, medication containers, diapers, and more [56].

Table 2. Global analysis of medical waste content [57]

Material Constituents	Global Composition Range (weight %)	Türkiye Constituent (weight %)
Paper/Carton	15 - 40	21
Plastics	10 - 60	40
Glass	5 - 15	7
Metal	1 - 10	2
Cloth/Cotton/Gauze	10 - 25	10
Other	5 - 25	20

For this study, medical waste generated during an ordinary day in a health facility in Adana was examined. The data obtained from the examination carried out under safety conditions on medical wastes placed in red bags revealed that the composite plastic composition constitutes 35% of the total medical waste. This medical waste consists of various plastic components such as face masks, syringes, infusion sets, medical gloves, blood and infusion bags. All of which are key components of the medical waste plastic spectrum. Upon analyzing medical waste from hospital, the predominant presence of polypropylene and polyvinyl chloride was observed, leading to the consideration of employing a pyrolysis method tailored to these specific materials.

Polypropylene (PP) is widely utilized in various medical applications, primarily within the packaging sector, due to its exceptional chemical resistance, high transparency, toughness, and resistance to bacterial contamination. Medical-grade PP also exhibits excellent performance under steam sterilization conditions. PP is the material of choice for manufacturing disposable syringes, offering numerous advantages over traditional glass syringes, including its lightweight nature, crack resistance, leak-proof design, easy disposability, environmental friendliness, sterilizability, and exceptional clarity. Additionally, PP is employed in the production of non-absorbable surgical sutures, particularly in vascular anastomosis procedures [56].

The findings elucidate the successful chemical conversion of mixed waste plastic samples into volatile fractions with notable yields ranging from 36.9% to 59.6% [58]. Rasul et al. resulted a viscous, brownish liquid oil to be 52% by weight, and the liquid's gross calorific content was measured at 41.32 megajoules per kilogram, a value similar to that of conventional diesel [59]. The extent of this conversion was intricately tied to the composition of the feed polymers present in the samples. This outcome underscores the promise of an efficacious transformation of waste plastics, wherein the inherent polymers play a pivotal role in dictating the outcome of the process. The resulting products manifested a complex composition predominantly characterized by paraffinic, olefinic, and aromatic compounds. These compounds exhibited distinct carbon number distributions, encompassing C_1-C_4 for fuel gases, C_5-C_{17} for gasoline, and C_{11}-C_{28} for light oils. Such variability in carbon numbers reflects the diverse nature of the polymeric constituents within the medical waste plastics, particularly the intertwined presence of PVC and PP. Based on the insights gleaned from the reviewed literature, it has been established that the oil production through pyrolysis is

anticipated to reach 55% owing to the presence of PVC in medical waste plastics.

This study is documented in Supplementary-S.1., which was compiled with a specific focus on non-hazardous medical waste, constituting 85% of the total medical waste stream. It's important to note that the remaining 15% falls under the category of entirely hazardous waste, necessitating distinct disposal techniques. Within the non-hazardous segment, encompassing 85% of the waste, the approach involves the post-sterilization separation of plastics, followed by their transformation into oil through the pyrolysis process.

An initial approximation of the volume of plastics amenable to recycling within a hospital can be derived through the subsequent calculation at Equation 3 [60].

Total Estimated Quantity of Plastics Available for Recycling Annually (in tons) = Total Annual Hospital Waste Amount (in tons) × 35% (Adana City's plastic content od medical waste) × 85% (non-hazardous waste content of total medical waste) (3)

2.1 LCA methods

Establishing a system boundary is a crucial initial stage in the LCA analysis, and it has a direct impact on the data inventory and final results. In this study, it was defined the scope as "cradle-to-gate," which means that the evaluation of a product's environmental impact from raw material extraction to the point of factory gate departure. It focuses on the production stages leading up to manufacturing and packaging, offering insights into how to reduce a product's environmental footprint through process optimization, sustainable material choices, and resource efficiency enhancements. The data inventory includes information related to emissions, energy usage, and materials at this particular stage. These data are then translated into specific effects on human health and the environment through the use of a developed LCA model [72]. Figure 2 shows the system boundary of this LCA study.

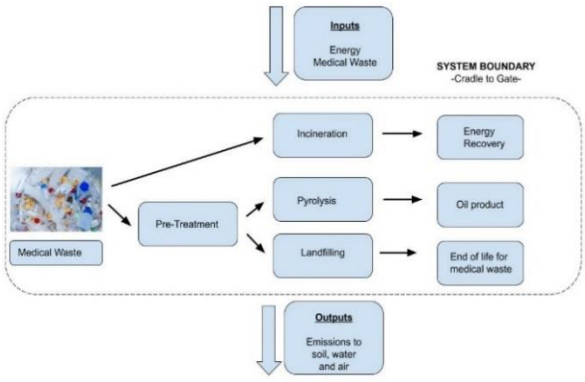


Figure 2. System boundary of medical waste treatment methods of LCA study

For this study openLCA 1.10.3 was used. This application, which outlines the material and energy flows involved throughout the product life cycle, is typically employed to optimize the LCA methodology. By inputting unit process values as the input and output parameters for each process within the production system, the LCA software computes the environmental impacts based on the provided data and the information stored in its database [73]. For this study the life cycle inventories were constructed using the Ecoinvent-3 database, supplemented by energy/mass stoichiometry and balance. Furthermore, for the presentation of LCA results in user-friendly formats and easily comprehensible units, the The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other Environmental Impacts (TRACI) methodology, focusing on midpoint impacts, was employed for impact assessment. TRACI 2.1 is an enhanced version that provides an expanded quantification of various stressors capable of causing potential environmental effects [74].

These discerning findings accentuate the pivotal significance of adopting sustainable waste management practices, with particular emphasis on pyrolysis or environmentally conscientious disposal methods. These eco-friendly approaches serve as formidable allies in significantly curbing the carbon footprint entailed in the disposal of plastic waste. The selection of such environmentally responsible methods emerges as a critical imperative in the endeavor to ameliorate the ecological consequences stemming from the generation and subsequent treatment of plastic waste, as underscored by relevant research.

3 Results

Through the application of linear regression analysis, projections for population and medical waste amounts for Adana City until the year 2030 were calculated and are presented in Table 3.

Table 3. Projected data of Adana city

Year	Projected Population of Adana City	Projected Medical Waste Quantity (kg/year)
2022	2,274,106	3,884,115
2023	2,294,903	4,009,115
2024	2,305,981	4,134,115
2025	2,316,131	4,259,115
2026	2,325,701	4,384,115
2027	2,334,761	4,509,115
2028	2,343,337	4,634,115
2029	2,351,452	4,759,115
2030	2,359,131	4,884,115

Table 4 shows the projected quantity of medical waste plastics for recycling (kg/year) with using Equation 2 and 3.

Table 4. Projected quantity of medical waste plastics for recycling

Year	Projected Quantity of Medical Waste Plastics for Recycling (kg/year)
2022	1,155,524
2023	1,192,711
2024	1,229,899
2025	1,267,086
2026	1,304,274
2027	1,341,461
2028	1,378,649
2029	1,415,836
2030	1,453,024

Table 5 displays the environmental impact results of LCA for the various medical waste treatment methods per kilogram (kg), specifically in terms of greenhouse gas emissions (GHG).

The effective management of medical waste is a pivotal concern, transcending its implications for public health to reverberate significantly within the realm of environmental sustainability. For this study is dedicated to a rigorous exploration of the greenhouse gas emissions entwined with the application of three prevalent medical waste disposal methodologies; pyrolysis, incineration, and landfilling. Figure 3 depicts a graphical representation illustrating the potential utilization of various waste disposal strategies throughout the period leading up to 2030.

Table 5. Environmental impacts of medical waste treatment methods of LCA (per kg)

Unit	Pyrolysis GHG	Incineration GHG	Landfilling GHG
Kg CO_2e	0.906	2.114	0.248

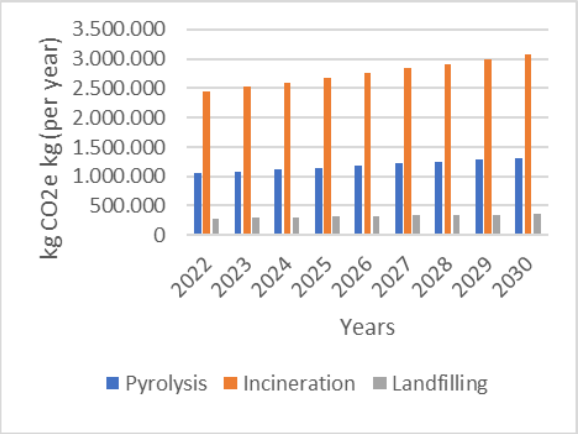


Figure 3. Projections of greenhouse gas emissions for medical waste plastic treatment methods

Pyrolysis, a thermal decomposition process, has gained attention as a production based technology for medical waste treatment. This study reveals that pyrolysis consistently results in lower GHG emissions compared to incineration. In 2022, pyrolysis generated approximately 1,046,904 kg CO_2e, and this value remained relatively stable over the study period. Incineration, a widely adopted method for medical waste disposal, shows higher GHG emissions when compared to pyrolysis.

In 2022, incineration emitted approximately 2,442,777 kg CO_2e, a significantly higher figure than that of pyrolysis. Strategies to mitigate its impact, such as improved technology and emissions control, should be explored to reduce its environmental burden.

The results emphasize the importance of considering the environmental consequences when choosing a medical waste disposal method. Pyrolysis emerges as a more sustainable option, with significantly lower GHG emissions compared to incineration. However, it is essential to acknowledge that pyrolysis may require further research and investment to scale up for widespread adoption. Landfilling, due to its long-lasting emissions and potential groundwater contamination risks, should be minimized in favor of more sustainable alternatives. Landfilling appears to have the lowest GHG emissions among the three methods throughout the years. However, it's essential to keep in mind that while landfilling produces fewer GHG emissions, it does not necessarily contribute to resource recovery or sustainability. The LCA results, particularly the Eutrophication Potential (EP) values indicating long-term impacts, were measured at 0.001487 (kg Neq), for landfill and 0.000227 (kg Neq) for incineration.

The composition and properties of pyrolysis products derived from plastic waste exhibit a remarkable spectrum of diversity, primarily contingent upon several critical factors. These influential determinants encompass the specific plastic type under consideration, the presence of catalysts, and, most notably, the operating temperature [62] Elevated temperature pyrolysis procedures, characterized by their higher thermal energy input, facilitate the breakdown of polyolefin compounds into smaller molecular constituents, resulting in the generation of greater gaseous byproducts. Conversely, pyrolysis executed at lower temperatures engenders augmented oil yields, wherein the resultant oil products manifest a progressively heavier molecular profile as the temperature diminishes. Such insights hold profound significance in the optimization of pyrolysis processes for the tailored production of desired products and the minimization of environmental impacts.

This process presents a chance to extract valuable products valued at up to $6,000 per metric ton from discarded plastics [63].

Table 6 outlines estimates for medical plastic quantities, oil production from waste plastic, and potential revenue. Using this oil in vehicles offers several advantages, including a reduction in plastic waste, resource efficiency, and energy recovery from waste materials.

It also aligns with the principles of a circular economy, diversifies fuel sources, and may lead to cost savings in waste management. Moreover, there are potential environmental benefits, such as reduced greenhouse gas emissions and particulate matter, depending on the source of plastics and emissions control systems in vehicles.

As sustainability awareness grows, market opportunities for products and services using recycled materials, including pyrolysis oil, may emerge. However, realizing these advantages requires attention to factors like the quality of the pyrolysis process, regulatory compliance, and infrastructure development.

Table 6. Potential of medical waste plastics to oil

Year	Medical Plastic Quantity (kg)	Oil Production from waste plastic (kg)	Potential Revenue Annualy ($)
2022	1,155,524	635,538	3,813,229
2023	1,192,711	655,991	3,935,946
2024	1,229,899	676,444	4,058,666
2025	1,267,086	696,897	4,181,383
2026	1,304,274	717,350	4,304,104
2027	1,341,461	737,803	4,426,821
2028	1,378,649	758,256	4,549,541
2029	1,415,836	778,709	4,672,258
2030	1,453,024	799,163	4,794,979

Over the course of a decade from 2022 to 2030, this table reveals a significant upward trend in the medical plastic waste generated, ranging from 1,155,524 kg in 2022 to 1,453,024 kg in 2030. In tandem with this, the column depicting oil production from these waste plastics showcases a consistent increase, beginning at 635,538 kg in 2022 and culminating at 799,163 kg in 2030. These figures represent a promising potential to not only manage healthcare-related waste efficiently but also generate substantial economic value, with potential revenues projected to rise from $3,813,229 in 2022 to $4,794,979 in 2030. From a scientific perspective, this data highlights the tangible benefits of exploring waste-to-oil conversion technologies in addressing both environmental concerns and economic opportunities within the medical waste sector.

3.1 The potential of medical waste plastics to oil process

In 2020, the worldwide pyrolysis oil market had a valuation of $302.1 million. Projections indicate that it will experience a 4% Compound Annual Growth Rate (CAGR) from 2021 to 2031. By the conclusion of 2031, it is anticipated that the global pyrolysis oil market will achieve a value of $459.3 million [64].

Research findings indicate that incorporating pyrolysis oil derived from medical waste plastics at a 5% rate into the production of new plastic products like HDPE and LDPE can lead to a notable reduction in greenhouse gas emissions, with a range of 18% to 23%. This highlights the potential for pyrolysis oil obtained from medical waste to play a significant role in achieving this reduction [65].

Pyrolysis oil derived from discarded plastic offers a cost-efficient alternative to traditional diesel fuel, which is notably more expensive to produce. According to statistics from the United States Environmental Protection Agency (EPA), an average passenger car releases around 46,000 kilograms of carbon dioxide into the atmosphere every year. Utilizing plastic pyrolysis oil technology, it becomes apparent that the decrease in carbon dioxide emissions is roughly akin to the annual emissions of 13 to 18 standard passenger vehicles [66].

In September 2023, pyrolysis-based chemical recycling plants, with a strong emphasis on mixed plastic waste, particularly polyolefins, constitute roughly 60% of the overall operational chemical recycling capacity in Europe. Forecasts indicate a substantial growth in this sector, with the combined capacity expected to surge nearly sevenfold, reaching approximately 600,000 tonnes per year by 2028 [67].

Pyrolysis oil derived from the conversion of medical waste plastics, presents a compelling opportunity as an eco-friendly vehicle fuel. According to the data provided in the study, pyrolysis can yield a significant volume of oil, with production figures reaching up to 799,163 kg annually by 2030. Notably, this oil, with a calorific value equivalent to traditional fossil fuels, has the potential to reduce greenhouse gas emissions and promote resource efficiency through waste recycling. To harness its benefits, the key step involves refining the pyrolysis oil to meet precise quality standards, ensuring compatibility with vehicle engines and emissions control systems. By incorporating pyrolysis oil into vehicle fleets, organizations and industries can not only mitigate their carbon footprint but also realize potential cost savings in waste management. However, successful adoption necessitates meticulous attention to the quality of the pyrolysis process, compliance with regulatory standards, and the development of a robust infrastructure for fuel distribution. Embracing pyrolysis oil as a vehicle fuel translates sustainability into tangible results, diversifies fuel sources, and actively contributes to a cleaner and more environmentally responsible transportation sector.

4 Conclusion

A comprehensive waste management strategy should address issues such as environmental sustainability, resource recovery and greenhouse gas (GHG) emissions for specialty medical waste plastics. As demonstrated by the data presented this study; pyrolysis emerges as a particularly promising and environmentally friendly option for both waste streams, producing substantial oil volumes, with figures climbing as high as 799,163 kg per year by 2030. An alternative to the landfill method, pyrolysis results in a lower greenhouse gas impact compared to incineration and turns waste into a valuable end product.

The pyrolysis process yields an array of valuable products, including diesel, gasoline, and fuel oil, offering a multifaceted solution to the pressing issue of waste landfills. Beyond its environmental benefits, pyrolysis can also lead to substantial cost savings by reducing the reliance on crude oil imports, thereby contributing to energy security. The global perspective underscores the anticipation of attractive prospects within the worldwide pyrolysis oil market, aligning with evolving energy and sustainability goals.

This comprehensive study illuminates the intricate web of environmental implications associated with various medical waste disposal methods. Pyrolysis, underscored by empirical data that highlights its efficiency in terms of resource recovery and GHG emissions reduction, stands out as the useful choice. The data, including the substantial numbers provided, underscores its potential. In stark contrast, incineration, as demonstrated by the significant GHG emissions figures, imposes a considerable environmental burden. Similarly, landfilling, while appearing to have lower GHG emissions, carries an array of distinct environmental challenges, including groundwater contamination and methane emissions. These findings underscore the paramount importance of transitioning to sustainable waste management practices within the healthcare sector, effectively curbing the carbon footprint associated with medical waste disposal. In an era marked by increasing environmental awareness and the imperative for sustainable solutions, embracing pyrolysis oil as a central pillar in waste management strategies holds the promise of a cleaner, greener, and more sustainable future for especially as vehicle fuel. In this context, future endeavors should prioritize conducting studies on the establishment of legal protocols governing the utilization of oil obtained through the pyrolysis process in vehicles.

The data from the study indicates that pyrolysis has the potential to yield a significant volume of oil, with production figures projected to reach up to 799,163 kg annually by 2030. This information, when considered from a scientific perspective, highlights the viability and potential benefits of pyrolysis as a waste-to-fuel technology.

Harnessing plastic waste through pyrolysis emerges as a more environmentally friendly solution to combat the issue of plastic waste pollution and diminish reliance on virgin oil consumption. The substantial increase in financial investments and the widespread application of pyrolysis oil derived from waste plastic will mitigate the demand for fresh fossil fuels. Furthermore, integrating this pyrolysis oil with renewable fuels for power generation purposes positions plastic waste pyrolysis as a noteworthy contributor to the shift toward low-carbon power generation and energy utilization. Remarkably, this pyrolysis oil, boasting a calorific value equivalent to traditional fossil fuels, holds the potential to curtail greenhouse gas emissions and enhance resource efficiency through effective waste recycling. This scientifically grounded approach offers a robust strategy for addressing environmental concerns by tapping into the energy content of discarded materials.

To fully realize the benefits, it is essential to focus on refining the pyrolysis oil to meet precise quality standards, ensuring compatibility with vehicle engines and emissions control systems. This quality control aspect is a fundamental scientific approach that must be addressed in adopting pyrolysis oil as a vehicle fuel.

The successful adoption of pyrolysis oil as a vehicle fuel not only assumes the meticulous attention to the quality of the pyrolysis process but also requires compliance with regulatory standards. These standards are based on scientific research and environmental considerations.

Moreover, the development of a robust infrastructure for fuel distribution is an essential component of this eco-friendly fuel approach. The creation of this infrastructure should be based on a thorough understanding of scientific and logistical principles, including transportation, storage, and distribution.

Embracing pyrolysis oil as a vehicle fuel assumes the integration of sustainability principles into tangible results. This involves diversifying fuel sources and actively contributing to a cleaner and more environmentally responsible transportation sector through the scientific application of waste-to-fuel technologies.

Acknowledgment

Çağrı Ün was supported by the Scientific and Technological Research Council of Türkiye (TÜBİTAK) 2219-Post-Doctoral Research Fellowship Program.

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): %18

References

[1] Recycling Magazine, Purdue Innovation Converts Plastic Waste into High-Value Fuels. https://www.recycling-magazine.com/2021/06/16/purdue-innovation-converts-plastic-waste-into-high-value-fuels/ , Accessed 26 September 2023.

[2] M. Mittal, D. Mittal and N. K. Aggarwal, Plastic accumulation during COVID-19: call for another pandemic; bioplastic a step towards this challenge?. Environmental Science and Pollution Research, 29 (8), 11039-11053, 2022. https://doi.org/10.1007/s11356-021-17792-w.

[3] T. T. Onay, M. A. Küçüker, S. Vardar ve T. Yücel, Türkiye'de Plastik Atik Sorunu ve Politika Önerileri, WWF-Türkiye (Doğal Hayatı Koruma Vakfı), Boğaziçi Üniversitesi Çevre Bilimleri Enstitüsü (BÜ-ÇEVRE), 2022.

[4] United Nations Environment Programme (UNEP), What You Need to Know About the Plastic Pollution Resolution. https://www.unep.org/news-and-stories/story/what-you-need-know-about-plastic-pollution-resolution/ , Accessed 26 September 2023.

[5] W.T. Chen, K. Jin and N.H.L. Wang, Use of Supercritical Water for the Liquefaction of Polypropylene into Oil. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 7, 3749–3758, 2019. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b03841.

[6] Plastics, the Circular Economy and Global Trade, World Economic Forum (WEF), 2020.

[7] E.A. Udofia, G. Gulis and J. Fobil, Solid Medical Waste: A Cross-Sectional Study of Household Disposal Practices and Reported Harm in Southern Ghana. BMC Public Health, 17 (464), 2017. https://doi.org/10.1186/s12889-017-4366-9.

[8] Y. Chartier, J. Emmanuel, U. Pieper, A. Prüss, P. Rushbrook, R. Stringer, W. Townend, S. Wilburn and R. Zghondi, Safe Management of Wastes from Health-Care Activities, 2nd ed., World Health Organization (WHO), Geneva, Switzerland, 2014.

[9] P. Kanchi, Knowledge, Attitude, Practice Regarding Hospital Waste Management among Interns & Nurses of Tertiary Care Hospitals of Navi Mumbai. Scholars Journal of Applied Medical Sciences, 5 (2), 526–530, 2017.https://doi.org/10.36347/sjams.2017.v05i02.044 .

[10] B. Sahiledengle, Self-Reported Healthcare Waste Segregation Practice and Its Correlates among Healthcare Workers in Hospitals of Southeast Ethiopia. BMC Health Services Research, 19 (5910), 2019. https://doi.org/10.1186/s12913-019-4439-9.

[11] K. Aydin and Ç. Ün, Usability of Municipal and Medical Waste Plastics as a Fuel in Diesel Engines. Recent Advances in Environmental and Biological Engineering: Proceedings of the 3rd International Conference on Sustainable Cities, Urban Sustainability and Transportation (SCUST '14), Istanbul, Turkiye, 15-17 December 2014. pp. 34-42, 2014.

[12] H. K. Shinn, Y. Hwang, B. G. Kim, C. Yang, W. Na, J. H. Song and H. K. Lim, Segregation for Reduction of Regulated Medical Waste in the Operating Room: A Case Report. Korean Journal of Anesthesiology, 70 (1),

100–104, 2017. https://doi.org/10.4097/kjae.2017.70.1.100.
[13] V. C. Sengodan, Segregation of biomedical waste in an South Indian tertiary care hospital. Journal of Natural Science, Biology and Medicine, 5 (2), 378–382, 2014. https://doi.org/10.4103/0976-9668.136194.
[14] Medical Waste and Climate Change – The Vicious Cycle We CAN Fix. https://envomed.com/medical-waste-and-climate-change-the-vicious-cycle-we-can-fix/ , Accessed 26 September 2023.
[15] A. D. Igalavithana, X. Yuan, C. P. Attanayake, S. Wang, S. You, D. C. W. Tsang, A. Nzihou, and Y. S. Ok, Sustainable management of plastic wastes in COVID-19 pandemic: The biochar solution. Environmental Research, 212, 113495, 2022. https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113495.
[16] Coronavirus: Disposable Face Masks Creating New Plastic Pollution Crisis, Experts Warn. https://news.sky.com/story/coronavirus-disposable-face-masks-creating-new-plastic-pollution-crisis-experts-warn-12045350 , Accessed 26 September 2023.
[17] A. L. Patrício Silva, J. C. Prata, T. R. Walker, A. C. Duarte, W. Ouyang, D. Barcelò and T. Rocha-Santos, Increased plastic pollution due to COVID-19 pandemic: Challenges and recommendations. Chemical Engineering Journal, 405, 126683, 2021. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126683.
[18] A. Hanedar, D. I., Çifçi and N. Zafer, The impact of COVID-19 pandemic in medical waste amounts: a case study from a high-populated city of Turkey. Journal of Material Cycles and Waste Management, 24, 1760–1767, 2022. https://doi.org/10.1007/s10163-022-01428-3.
[19] S. Jung, S. Lee, X. Dou and E. E. Kwon, Valorization of disposable COVID-19 mask through the thermo-chemical process. Chemical. Engineering Journal, 405, 126658, 2021. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126658.
[20] Ö. Ak, COVID-19'un Başka Bir Sonucu: Plastik Salgını. TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi, 10, 26–35, 2020.
[21] M. Minoglou, S. Gerassimidou and D. Komilis, Healthcare Waste Generation Worldwide and Its Dependence on Socio-Economic and Environmental Factors. Sustainability, 9, 220, 2017. https://doi.org/10.3390/su9020220.
[22] C. Kenny and A. Priyadarshini, Review of Current Healthcare Waste Management Methods and Their Effect on Global Health. Healthcare, 9, 284, 2021. https://doi.org/10.3390/healthcare9030284.
[23] M. E. Boesch, C. Vadenbo, D. Saner, C. Huter and S. Hellweg, An LCA Model for Waste Incineration Enhanced with New Technologies for Metal Recovery and Application to the Case of Switzerland. Waste Management, 34, 378–389, 2014. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.019.
[24] S. De and B. Debnath, Prevalence of Health Hazards Associated with Solid Waste Disposal: A Case Study of Kolkata, India. Procedia Environmental Sciences, 35, 201–208, 2016. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.081.
[25] X. F. Lou and J. Nair, The impact of landfilling and composting on greenhouse gas emissions – A review. Bioresource Technology, 100 (16), 3792-3798, 2009. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.081.
[26] A. Vlasopoulos, J. Malinauskaite, A. Żabnieńska-Góra and H. Jouhara, Life Cycle Assessment of Plastic Waste and Energy Recovery. Energy, 277, 127576, 2023. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127576.
[27] B. Joseph, J. James, N. Kalarikkal and S. Thomas, Recycling of Medical Plastics. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 4, 199–208, 2021. https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.06.003.
[28] V. Krishnamurthi, R. Frota and B. Turna, Management of Vascular Complications. Section IV: Common Surgical Considerations, Chapter 21, Complications of Urologic Surgery Prevention and Management Book Fourth Edition, 2010. ISBN: 978-1-4160-4572-4.
[29] O. A. Alabi, K. I. Ologbonjaye, O. Awosolu and O. E. Alalade, Public and Environmental Health Effects of Plastic Wastes Disposal: A Review. Journal of Toxicology and Risk Assessment, 5 (21), 2019. https://doi.org/10.23937/2572-4061.1510021.
[30] M. O. Amankwa, E. K. Tetteh and G. T. Mohale, The Production of Valuable Products and Fuel from Plastic Waste in Africa. Discover Sustainability, 2 (31), 2021. https://doi.org/10.1007/s43621-021-00040-z.
[31] J. A. Onwudili, N. Insura and P. T. Williams, Composition of Products from the Pyrolysis of Polyethylene and Polystyrene in a Closed Batch Reactor: Effects of Temperature and Residence Time. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 86 (2), 293–303, 2009. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2009.07.008.
[32] U. Som, F. Rahman and S. Hossain, Recovery of Pyrolytic Oil from Thermal Pyrolysis of Medical Waste. Journal of Engineering Sciences, 5 (2), 5-8, 2018. https://doi.org/10.21272/jes.2018.5(2).h2.
[33] K. Aydin and Ç. Ün, Development of Solid Waste Management System for Adana Metropolitan Municipality. Exergy for A Better Environment and Improved Sustainability 2; Aloui, F., Dincer, I., Eds., 115–131, Springer: Cham, Switzerland, 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62575-1_8.
[34] H. K. Musale, Y. C. Bhattacharyulu and R. K. Bhoyar, Design Consideration of Pyrolysis Reactor for Production of Bio-Oil. International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), 5 (2), 83-85, 2013. ISSN:2231-5381.
[35] M. I. Jahirul, M. G. Rasul, D. Schaller, M. M. K. Khan, M. M. Hasan and M. A. Hazrat, Transport fuel from waste plastics pyrolysis – A review on technologies, challenges and opportunities. Energy Conversion and Management, 258, 115451, 2022. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.11545.
[36] J. Wang, J. Shen, D. Ye, X. Yan, Y. Zhang, W. Yang, X. Li, J. Wang, L. Zhang and L. Pan, Disinfection

Technology of Hospital Wastes and Wastewater: Suggestions for Disinfection Strategy during Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Pandemic in China. Environmental Pollution, 262, 114665, 2020. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114665.

[37] N. Asim, M. Badiei and K. Sopian, Review of the Valorization Options for the Proper Disposal of Face Masks during the COVID-19 Pandemic. Environmental Technology & Innovation, 23, 101797, 2021. https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101797.

[38] O. A. Fakayode, E. A. A. Aboagarib, C. Zhou and H. Ma, Co-Pyrolysis of Lignocellulosic and Macroalgae Biomasses for the Production of Biochar—A Review. Bioresource Technology, 297, 122408, 2020. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122408.

[39] G. Su, H. C. Ong, S. Ibrahim, I. M. R. Fattah, M. Mofijur and C. T. Chong, Valorisation of Medical Waste through Pyrolysis for a Cleaner Environment: Progress and Challenges. Environmental Pollution, 279, 116934, 2021. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116934.

[40] T. A. Aragaw and B. A. Mekonnen, Current Plastics Pollution Threats Due to COVID-19 and Its Possible Mitigation Techniques: A Waste-to-Energy Conversion via Pyrolysis. Environmental Systems Research, 10 (8), 2021. https://doi.org/10.1186/s40068-020-00217-x.

[41] R. K. Singh and B. Ruj, Time and Temperature Depended Fuel Gas Generation from Pyrolysis of Real World Municipal Plastic Waste. Fuel, 174, 164–171, 2016. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.01.049.

[42] N. A. Antoniou and A. A. Zorpas, Quality protocol and procedure development to define end-of-waste criteria for tire pyrolysis oil in the framework of circular economy strategy. Waste Management, 15 (95), 161–170, 2019. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.035.

[43] W. U. Eze, R. Umunakwe, H. C. Obasi, M. I. Ugbaja, C. C. Uche and I. C. Madufor, Plastics waste management: a review of pyrolysis technology. Clean Technologies and Recycling, 1 (1), 50–69, 2021. https://doi.org/10.3934/ctr.2021003.

[44] M. J. B. Kabeyi and A. O. Olanrewaju, Performance analysis and evaluation of Muhoroni 60MW gas turbine power plant. International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Mauritius, 7-8 October 2021, pp. 1–8, 2021.

[45] L. Fulgencio-Medrano, S. García-Fernández, A. Asueta, A. Lopez-Urionabarrenechea, B. B. Perez-Martinez and J. M. Arandes, Oil Production by Pyrolysis of Real Plastic Waste. Polymers, 14, 553, 2022. https://doi.org/10.3390/polym14030553.

[46] M. J. B. Kabeyi and A. O. Olanrewaju, Review and Design Overview of Plastic Waste-to-Pyrolysis Oil Conversion with Implications on the Energy Transition. Journal of Energy, 1821129, 2023. https://doi.org/10.1155/2023/1821129.

[47] M. J. B. Kabeyi and A. O. Olanrewaju, Sustainability Assessment for Non-Combustible Renewable Power Generation. 12th Annual Istanbul International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Istanbul, Turkiye, 7-10 March 2022, pp. 2232–2244, 2022.

[48] TMMOB Chamber of Chemical Engineers (KMO) Istanbul Branch Plastics and Rubber Commission. Plastic Recycling and Waste Import Report in Türkiye, 2021.

[49] T.R. Ministry of Development. Eleventh Development Plan (2019-2023) Sustainable Management of Environment and Natural Resources, Working Group Report, 2018.

[50] Anadolu Agency (AA), Türkiye Her Yıl 1,1 Milyon Ton Plastik Atığı Geri Dönüştürüyor. https://www.aa.com.tr/tr/cevre/turkiye-her-yil-1-1-milyon-ton-plastik-atigi-geri-donusturuyor/2427166 , Accessed 26 September 2023.

[51] Turkish Statistical Institute (TÜİK) Waste Statistics-2020. https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Atik-Istatistikleri-2020-37198 , Accessed 26 September 2023.

[52] Adana Governorship, Provincial Directorate of Environment, Urbanization and Climate Change, Adana Province Environmental Status Report, 2022.

[53] Adana Metropolitan Municipality Activity Report. https://www.adana.bel.tr/panel/uploads/yillikfaaliyetraporlari_v/files/2022yili-faaliyetraporu-small.pdf , Accessed 26 September 2023.

[54] How Should US Health Care Lead Global Change in Plastic Waste Disposal?. https://journalofethics.ama-assn.org/article/how-should-us-health-care-lead-global-change-plastic-waste-disposal/2022-10 , Accessed 26 September 2023.

[55] K. V. Wong, R. Narasimhan, R. Kashyap and J. Fu, Medical waste characterization. Journal of Environment and Health, 57 (1), 19-24, 1994.

[56] A. Dash, S. Kumar and R. K. Singh, Thermolysis of Medical Waste (Waste Syringe) to Liquid Fuel Using Semi-Batch Reactor. Waste Biomass Valorization, 6 (4), 507–514, 2015. https://doi.org/10.1007/s12649-015-9382-3.

[57] UNEP, Compendium of Technologies for Treatment/Destruction of Healthcare Waste, United Nations Environment Programme Division of Technology, Industry and Economics International Environmental Technology Centre Osaka, Japan, 2012.

[58] N. Miskolczi, L. Bartha and A. Angyal, Pyrolysis of Polyvinyl Chloride (PVC)-Containing Mixed Plastic Wastes for Recovery of Hydrocarbons. Energy & Fuels, 23 (5), 2743-2749, 2009. https://doi.org/10.1021/ef8011245.

[59] S. B. Rasul, U. Som and M. S. Hossain, Liquid fuel oil produced from plastic based medical wastes by thermal cracking. Scientific Reports, 11, 17048, 2021. https://doi.org/10.1038/s41598-021-96424-2.

[60] Hospital Waste Characterization. https://www.hprc.org/resources/hospital-waste-characterization , Accessed 26 September 2023.
[61] LCA ChemCyclingTM: CO_2 Emissions of Pyrolyzed Mixed Plastic Waste and the Mass Balance Approach. https://www.basf.com/global/documents/en/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy/chemcycling/Intern_Christian%20Kr%C3%BCger_BASF%20Dialog%20Forum.pdf , Accessed 26 September 2023.
[62] G. Lopez, M. Artetxe, M. Amutio, J. Bilbao and M. Olazar, Thermochemical Routes for the Valorization of Waste Polyolefinic Plastics to Produce Fuels and Chemicals, A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 346–368, 2017. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.142.
[63] Recycling Breakthrough Makes Plastic Waste a High-Value Commodity. https://oilprice.com/Energy/Energy-General/Recycling-Breakthrough-Makes-Plastic-Waste-A-High-Value-Commodity.html , Accessed 26 September 2023.
[64] Plastic Pyrolysis Oil Market Research Report 2023. https://www.transparencymarketresearch.com/pyrolysis-oil-market.html , Accessed 26 September 2023.
[65] R. U. Gracida-Alvarez, P. T. Benavides, U. Lee and M. Wang, Life-cycle analysis of recycling of post-use plastic to plastic via pyrolysis. Journal of Cleaner Production, 425, 138867, 2023. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138867.
[66] H. Park, K. Kim, M. Yu, Z. Yun and S. Lee, Economic analysis of the circular economy based on waste plastic pyrolysis oil: a case of the university campus. Environment, Development and Sustainability, 15, 1-21, 2023. https://doi.org/10.1007/s10668-023-02963-1.
[67] ICIS Launches Pyrolysis Oil Pricing Indexes for Chemical Recycling. https://www.icis.com/explore/press-releases/icis-launches-pyrolysis-oil-pricing-indexes-for-chemical-recycling/ , Accessed 26 September 2023.
[68] UNEP. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/health-care-waste , Accessed 26 September 2023.
[69] S. Burnley, S. Wagland and P. Longhurst, Using life cycle assessment in environmental engineering education. Higher Education Pedagogies, 4, 64–79, 2019. https://doi.org/10.1080/23752696.2019.1627672.
[70] European Commission, "Life Cycle Assessment (LCA)," European Platform on Life Cycle Assessment. https://eplca.jrc.ec.europa.eu/lifecycleassessment.html , Accessed 26 September 2023.
[71] S. M. A. Rahman, S. Issa, M. E. H. Assad, S. K. Shah, M. A. Abdelkareem, M. E. Hoque and A. G. Olabi, Performance enhancement and life cycle analysis of a novel solar HVAC system using underground water and energy recovery technique. Thermal Science and Engineering Progress, 36, 101515, 2022. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101515 .
[72] H. Alhazmi, F. H. Almansour and Z. Aldhafeeri, Plastic Waste Management: A Review of Existing Life Cycle Assessment Studies. Sustainability, 13, 5340, 2021. https://doi.org/10.3390/su13105340.
[73] M. H. Mushtaq, F. Noor, M. A. Mujtaba, S. Asghar, A. A. Yusuf, M. E. M. Soudagar, A. Hussain, M. F. Badran and K. Shahapurkar, Environmental Performance of Alternative Hospital Waste Management Strategies Using Life Cycle Assessment (LCA) Approach. Sustainability, 14, 14942, 2022. https://doi.org/10.3390/su142214942.
[74] Y. Dong, M. U. Hossain, H. Li and P. Liu, Developing Conversion Factors of LCIA Methods for Comparison of LCA Results in the Construction Sector. Sustainability, 13, 9016, 2021. https://doi.org/10.3390/su13169016.

Supplementary

S1. Medical Waste Definitions and Contents

Healthcare activities play a crucial role in safeguarding well-being, restoring health, and preserving lives. However, it is essential to address the waste and by-products they produce.

Out of the total volume of waste generated through healthcare activities, approximately 85% constitutes general, non-hazardous waste that is akin to household waste. The remaining 15% comprises materials classified as hazardous, which may encompass infectious, chemical, or radioactive substances.

Varieties of Waste: The array of waste and by-products encompasses a diverse range of materials, as exemplified below:

1. Biological Waste: This pertains to waste contaminated with blood, bodily fluids (e.g., discarded diagnostic samples), cultures, and infectious agents from laboratory work. It also includes waste from patients with infections, such as swabs, bandages, and disposable medical devices.
2. Pathological Waste: This category encompasses human tissues, organs, fluids, body parts, and contaminated animal carcasses.
3. Sharp Objects Waste: It comprises syringes, needles, disposable scalpels, and blades, among other items.
4. Chemical Waste: Examples include solvents and reagents used for laboratory preparations, disinfectants, sterilants, and heavy metals contained in medical devices (e.g., mercury in broken thermometers) and batteries.
5. Pharmaceutical Waste: This relates to expired, unused, and contaminated drugs and vaccines.
6. Cytotoxic Waste: It involves waste containing substances with genotoxic properties, such as cytotoxic drugs used in cancer treatment and their metabolites.
7. Radioactive Waste: This includes materials contaminated by radionuclides, encompassing radioactive diagnostic materials and radiotherapeutic substances.
8. General Waste: This category encompasses waste that does not pose specific biological, chemical, radioactive, or physical hazards.

Prominent Sources of Healthcare Waste Include:

- Hospitals and other healthcare facilities.
- Laboratories and research centers.
- Mortuary and autopsy centers.
- Animal research and testing laboratories.
- Blood banks and collection services.
- Nursing homes for the elderly.

On average, high-income countries generate up to 0.5 kg of hazardous waste per hospital bed per day, while low-income countries generate an average of 0.2 kg. However, in low-income countries, healthcare waste is frequently not segregated into hazardous or non-hazardous categories, resulting in a significantly higher quantity of hazardous waste in practice [68].

Supplementary-Table 1. Environmental impacts of medical waste treatment methods

Year	Pyrolysis GHG (kg CO_2e)	Incineration GHG (kg CO_2e)	Landfilling GHG (kg CO_2 eq)
2022	1,046,904	2,442,777	286,569
2023	1,080,596	2,521,391	295,792
2024	1,114,288	2,600,006	305,014
2025	1,147,979	2,678,619	314,237
2026	1,181,672	2,757,235	323,459
2027	1,215,363	2,835,848	332,682
2028	1,249,055	2,914,463	341,904
2029	1,282,747	2,993,077	351,127
2030	1,316,439	3,071,692	360,349

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 294-300

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Alüminyum ve çelik malzemelerin TIG kaynak ve sert lehimleme yöntemleriyle kaynak edilebilirliğinin incelenmesi

Investigations of weldability with TIG welding and brazing of aluminium and steel

Aydın Kan[1], İbrahim Çayıroğlu[2,*]

[1] *Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 78050, Karabük, Türkiye*
[2] *Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 78050, Karabük, Türkiye*

Öz

Farklı iki metalin kaynaklı birleştirilmesi oldukça zor bir işlemdir. Bununla beraber günümüz endüstrisinde parça ve yapı ağırlığını azaltabilmek için farklı metallerin aynı yapıda kullanılması ve dolayısıyla birleştirilmesi çok önemli hale gelmiştir. Bu çalışmada, (6061-T6) alüminyum alaşımı ile (St-37) düşük karbonlu çelik TIG ve sert lehim kaynak yöntemleriyle birleştirilmiş, mekanik ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Kaynak uygulamaları 2 mm, 5 mm ve 10 mm kalınlıklara sahip numuneler ile gerçekleştirilmiştir. Elde ettiğimiz numunelerin kaynak bölgelerinin karakteristik özelliklerini tespit etmek ve dayanımlarını incelemek amacıyla sertlik testi ve çekme testleri uygulanmıştır. Ayrıca SEM görüntü analizi ile de mikroyapıda meydana gelen değişiklikler gözlemlenmiştir. Alınan sonuçlara göre 2 mm ve 5 mm saçların birleştirilmesi sert lehimleme, 10 mm ve daha kalın malzemelerin birleştirilmesi TIG kaynak ile yapılması uygun bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Alüminyum, Çelik, TIG kaynağı, Sert lehimleme, Mekanik özellikler

Abstract

Welding of two dissimilar metals is a very difficult process. However, in today's industry, it has become very important to use different metals in the same structure and therefore combine them in order to reduce the weight of parts and structures. In this study, (6061-T6) aluminum alloy and (St-37) low carbon steel were joined by TIG and brazing welding methods, and their mechanical and microstructural properties were examined. Welding applications were carried out with samples with thicknesses of 2 mm, 5 mm and 10 mm. Hardness tests and tensile tests were applied to determine the characteristics of the weld areas of the samples we obtained and to examine their strength. In addition, changes in the microstructure were observed by SEM image analysis. According to the results, it was found appropriate to join 2 mm and 5 mm sheets by brazing, and to join 10 mm and thicker materials by TIG welding.

Keywords: Aluminum, Steel, TIG welding, Brazing joining, Mechanical properties

1 Giriş

Gelişen teknoloji ile günümüz endüstrisinde kullanılmakta olan malzeme çeşitliliğinde artış görülmektedir. Malzeme ve üretim yöntemlerindeki bu artış, farklı özelliklere sahip olan malzemelerin birbirleriyle birleştirilmesi ihtiyacını doğurmuştur. Belirli şartlar altında bu malzemeler farklı kaynak yöntemleri kullanılarak kaynatılabilmekte ve yeni ürünler elde edilebilmektedir [1].

Bu deneysel çalışmada, alüminyum ve çelik malzemelerin birleştirilmesi işleminde TIG (Tungsten Inert Gas) ve sert lehimleme yöntemleri kullanılmıştır. TIG kaynak yöntemi, kaliteli bir kaynak metali elde etmek için uygulanan ark kaynağı çeşididir [2-4]. Diğer kaynak yöntemlerine kıyasla TIG ile oluşturulan kaynaklarda daha üstün özellikte dikişler elde edilmektedir. Bu kaynak çeşidinde tükenmeyen tungsten elektrot ile kaynak metali arasında elektrik arkı oluşmaktadır. Isı enerjisi bu elektrik arkından sağlanmaktadır. Bu kaynakta ark soy gazlar tarafından korunmaktadır. Koruyucu gaz olarak argon (Ar), helyum (He) veya bunların karışımları kullanılmaktadır. Bu yöntem düşük yığma hızı nedeniyle ince ve hassas parçaların kaynağı ve tamirinde kaynak yapan kişiye büyük kolaylıklar sağlamaktadır [5,6]. TIG kaynak yöntemi çok geniş bir kullanım ve uygulama alanına sahiptir. Kaynatılabilirliği zor olan paslanmaz çelikler, bakır (Cu) ve alaşımları, Al ve alaşımları, magnezyum ve diğer birçok demir dışı metallerin birleştirilmesi işleminde yaygın olarak kullanılmaktadır [7-10].

TIG kaynağından sonra çalışmada kullanılan bir diğer yöntem ise sert lehimlemedir. Sert lehim ile birleştirme yöntemi iki metalin bir üçüncü dolgu metalle birbirlerine birleştirilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Birleştirilecek olan ana malzemelerin arasında küçük bir açıklık bulunmaktadır. Bu açıklık ilave dolgu metali adı verilen lehim alaşımının ergimesi ve kapiler etkiyle ana iki malzemenin arasında bulunan küçük boşlukları doldurması esasına dayanmaktadır [11-13].

Durmuş vd. [14], AA6061 Al ve galvanizli çelik sacları soğuk metal transfer kaynağıyla birleştirmiş ve mikroyapı incelemeleri sonucu Al-Çelik kaynaklı parçalarında

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: icayiroglu@karabuk.edu.tr (İ. Çayıroğlu)
Geliş / Recieved: 03.11.2023 Kabul / Accepted: 05.12.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngmuh.1385866

intermetalik ara tabakanın Al metaline doğru yönelim gösterdiğini tespit etmişlerdir. Bu durumun difüzyon mekanizmaları ile yani Al ve Fe'in difüzyon katsayıları ile açıklanabileceğini savunmuşlardır. Hussein vd. [15], sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilen Al ve çeliğin karakteristik özelliklerini incelemişlerdir. Kaynak sırasında kullanılan sıcaklık ve sürenin intermetalik ara tabaka oluşumuna etki eden iki ana faktör olduğunu belirtmişlerdir. Taban vd. [16], Al ve çelik malzemeleri sürtünme kaynağıyla birleştirmişler ve mikroyapı karakteristikleri hakkında çalışma yapmışlardır. Mikroskopi sonuçlarına göre bağlantının Al tarafına doğru yönelen ince, kesintili bir ara tabaka oluştuğu sonucuna varmışlardır. Zhang vd. [17], Al ve paslanmaz çeliğin TIG-MIG çift kenarlı kaynaklama-lehimleme çalışmasını yapmışlar; bağlantıların her iki tarafında düşük ve düzgün ısı girişi sağlandığını belirtmişlerdir. Dolayısıyla ara kaynak tabakasının sınır boyunca hemen hemen eşit kalınlıkta bir çizgi halinde ve aynı desene sahip olduğunu ifade etmişlerdir.

Kotari vd. [18], Mg alaşım ve paslanmaz çelik metallerine TIG kaynak-lehimleme yöntemi uygulamışlardır. Birleştirme işleminin ardından yapılan sertlik testleri neticesinde sertliğin paslanmaz çelik metaline doğru hızla yükseldiği ve en yüksek sertlik değerinin paslanmaz çelik tarafında intermetalik arayüz formunda olduğu gözlemlenmiştir.

Durgutlu vd. [8], tarafından düşük C'lu çelik ile Cu levhalar örtülü elektrod ark ve TIG kaynak yöntemleri ile birleştirilerek oluşan yeni yapının mekanik ve mikroyapı özellikleri araştırılmıştır. Cu ve Al yumuşak karakterli metaller olduğu için TIG kaynak yönteminde kaynak dikiş bölgesinde sertliğin çelik malzemeden düşük, Cu'dan ise daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Meriç vd. [19], birbirinden farklı malzemeleri sürtünme kaynağı ile birleştirmiş ve kaynak bölgesi özelliklerini incelemişlerdir. (AISI-304) paslanmaz çelik ve (ETIAL-F1) Al malzemelerin kaynağında Al tarafından kaynak bölgesine doğru sertliğin arttığını belirtmişlerdir. Al malzemede paslanmaz çeliğe oranla plastik deformasyonunun daha fazla olduğunu ifade etmişlerdir. Yine aynı çalışmada (SAE-1040) çelik ile (ETIAL-F1) Al'u birleştirmişler ve AISI-304 paslanmaz çelik ile benzer sonuçlar bulmuşlardır. Ayrıca her iki malzemede ısı etkisinde kalan bölgede sertleşmeye rastlamışlardır.

Xue vd. [20], 6061 alüminyum alaşımı ve 304 paslanmaz çeliği lazer - MIG hibrit kaynak yöntemi ile birleştirilerek mikroyapısı ve özellikleri incelenmiştir. Yapılan çalışmanın kaynak bölgesinde Fe-Al intermetalik tabaka oluşmasıyla kaynak dikişindeki sertliğin çelik tarafına göre daha düşük, alüminyum metalinden daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Al Zamzami vd. [21] tarafından, alüminyum ve çeliğin sert lehim-kaynaklı bağlantısının statik dayanım ve tasarımının yapıldığı bir çalışmada, statik kopmanın alüminyum ana metalinin ısıdan etkilenen bölgesinde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Kotari vd. [18] tarafından, Mg alaşım ve paslanmaz çelik metallerine TIG kaynak-lehimleme yöntemi uygulanmış, çekme deneyi sonucunda kopmanın, zayıf metal olan Mg'un ısıdan etkilenen bölgesinde ve paslanmaz çeliğin kaynak dikişi ara tabakası boyunca meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Sun vd. [22], 16 Mn yüksek sertlikte çelik ve 6063-T6 serisi Al'u direnç nokta kaynağı ile farklı elektrotlar ve kaynak parametreleri kullanarak birleştirmiş, uygun elektrod seçiminin daha verimli sonuçlar verdiği, kaynağın akım değeri ve kaynak zamanının da bağlantı noktası üzerinde oluşan gerilmeyi etkilediğini belirtmişlerdir. Taban vd. 2010, yapmış oldukları çalışmada; benzer olmayan 6061-T6 serisi Al ve AISI-1018 standartlarındaki çeliğin sürtünme kaynağı ile birleştirmişler ve plastik deformasyonun bağlantının Al tarafında oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Zhang vd. [17], paslanmaz çelik ve Al'un TIG-MIG ile çift kenarlı kaynatma çalışmasını gerçekleştirmişler ve çekme testi sonunda kırılarak kopmanın malzemenin Al tarafında olduğu sonucuna varmışlardır.

Teknolojinin gelişmesi ile tüm mekanik yapılarda sağlamlıkla beraber hafiflik arayışına da gidilmiş ve nasıl geliştirilebilir sorusu üzerine yeni teknikler ve değişik çözümler bulabilmek için araştırmalar yapılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada, şase ve konstrüksiyon gibi yapısal tasarımlar için kullanılabilecek bir yöntemi bulmak esas alınmıştır. Hafiflik özelliği bakımından alüminyum (Al) ve dayanıklılık özelliği bakımından çelik malzeme tercih edilmiştir. TIG ve sert lehimleme gibi iki farklı kaynak yöntemi uygulanmıştır. Böylece hangi kaynak yönteminin daha iyi sonuç verdiği araştırılmıştır. Kaynatılan metal çiftler, mekanik özellik ve kaynak dikişi kalitesini belirlemek amacıyla sertlik ve çekme testlerine tabi tutulmuştur. Sonuçlar SEM görüntüleme ve elementel analiz ile incelenmiştir.

2 Materyal ve metot

Yapılan çalışmada, 1.0037 (St-37) kalite yapı çeliği kullanılmıştır. Al numuneler için kaynak edilebilirliği yüksek ve hedeflenen kullanım alanına uygun 6061-T6 serisi malzeme kullanılmıştır. Malzemelerin ebatları her iki metal için 2x60x100 mm, 5x60x100 mm, 10x60x100 mm ebatlarında olmak üzere 2, 5 ve 10 mm kalınlıklarında temin edilmiştir. Kaynak metallerin kimyasal bileşimleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kaynakla birleştirilecek malzemelerin kimyasal bileşimleri (% Ağırlık)

Kimyasal Bileşim	Çelik (St-37)	Alüminyum (6061-T6)
Al	0.017	Kalan
C	0.217	-
Cr	0.064	0.1
Cu	0.001	0.6-1.1
Fe	Kalan	0.5
Mg	0.0001	0.8-1.2
Mn	0.426	0.2-0.8
Mo	0.001	-
Ni	0.001	-
P	0.026	-
S	0.022	-
Si	0.001	0.6-1.0
T	-	0.1
V	0.001	-
W	0.003	-
Zn	-	0.25
Diğer	-	0.15

TIG kaynak ve sert lehimleme usullerine göre birleştirilen numuneler frezede istenilen boyutlara getirilmiştir. Tahribatlı ve tahribatsız testlere tabi tutulmuştur. Alınan sonuçlar incelenip analiz edilerek en yüksek mekaniksel özelliklerin hangi kaynak türünde ve hangi kalınlıklarda olduğu tespit edilmiştir.

TIG kaynağı için her biri 3/32" x 16" (2.4 mm x 405 mm) çap ve boy ölçülerine sahip Alumasteel #1 ve Alumasteel #2 ilave metalleri kullanılmıştır. Öncelikle #1 numaralı elektrod ile sadece çelik parçanın kaynak ağzı açılan bölgesi DC akımda, 160 Amper akım şiddetinde, koruyucu Argon gazı kullanılarak kaynatılmıştır. Ardından çelik ve Al parça ağız ağıza getirilerek #2 nolu elektrod ile kaynak uygulaması yapılmıştır. Kaynak işlemi "Miller-Dynasty 350" marka TIG kaynak makinesiyle gerçekleştirilmiştir.

Sert lehimleme yönteminde EN-ISO-18273 standartlarında Si-Al-4047 Al kaynak teli kullanılmıştır. Kullanılan kaynak telinin kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Malzemelerin birleştirilmesi oksi-asetilen kaynak usullerine göre sağlanmıştır. Uygulama sırasında çelik malzeme, Al ile etkileşebilir bir forma dönüştürülmüştür. Çelik malzeme yüzeyi asit ile temizlenmiş ve daha sonra şaloma yardımıyla saf çubuk Kalay (Sn) eritilerek nüfuz etmesi sağlanmıştır. "OK-Tigrod-4047" marka Al kaynak teli ile "Al-Flux-726" marka dekapan yardımıyla ağız ağıza getirilen Al ve çelik malzeme kaynatılmıştır. Dekapan kullanarak, kaynak sırasında Al parça üzerinde oksit tabaka oluşmasının önüne geçilmiştir.

Tablo 2. "Si-Al-4047" Al kaynak telinin kimyasal ve mekanik özellikleri

Kaynak Telinin Kimyasal Bileşimi (%)				
Si	Mn	Cu	Zn	Fe
12	0.15	0.30	0.20	0.8
Kaynak Telinin Mekanik Özellikleri				
Akma Dayanımı (MPa)		Çekme Dayanımı (MPa)		Uzama (%)
55		124		min. 12

Farklı kalınlıklarda temin edilen, TIG ve sert lehimleme yöntemleriyle birleştirilmiş deney numuneleri mikroyapı fotoğraflarının çekimi ve elementsel kompozisyonunu belirlemek için "Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem" marka 50x-2000x büyütme özelliğine sahip SEM (taramalı elektron mikroskobu) kullanılmıştır.

Metalografik inceleme için hazırlamış olduğumuz numunelere, QNESS+Q10 A marka sertlik ölçme cihazı yardımıyla ASTM E92 (Metalik Materyaller için Vickers Sertlik Ölçme Standardı) standartlarına göre Vickers (HV 0.5) sertlik testi uygulanmıştır. Test esnasında kare tabanlı elmas uç kullanılarak 500 gr deney yükü uygulaması ile esas metallerin yüzeyleri ve kaynak bölgesi baz alınarak oda sıcaklığında veriler toplanmıştır. Numune yüzeyinde oluşan izler optik olarak ölçülerek sertlik değerlerine ulaşılmıştır.

Numuneler, çekme testinin yapılabilmesi için takım tezgâhlarında işlenerek kaynak dikişi tam ortada kalacak şekilde uygun ölçülere getirilmiştir. Düz lama haline getirilen t=2 mm, t=5 mm ve t=10 mm kalınlıklara sahip numuneler "MTS Landmark" marka servo hidrolik dinamik test cihazı ile 0.067 mm/sn hızla oda sıcaklığında çekme deneyine tabi tutulmuştur.

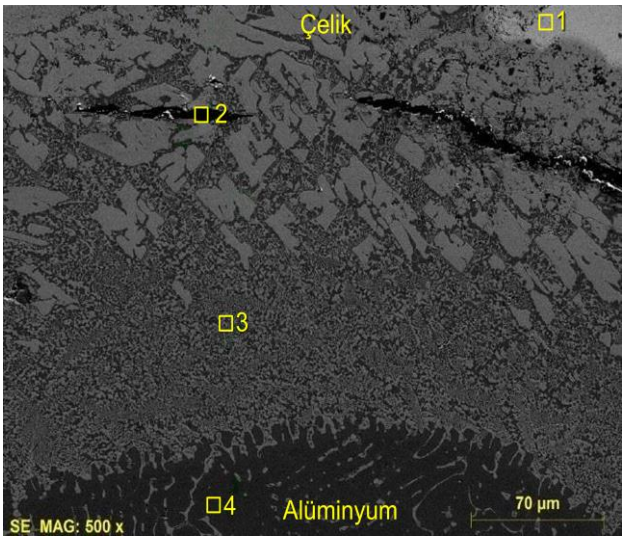
3 Bulgular ve tartışma

Yapılan bu çalışma ile alüminyum ve düşük karbonlu çelik malzemeler, piyasada yaygın olarak uygulanan TIG ve sert lehimleme yöntemleri kullanılarak kaynatılmış ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

3.1 TIG kaynağı uygulamasının sonuçları

2 mm kalınlığa sahip metal çiftleri TIG kaynağıyla birleştirilmiş fakat kaynak bölgesi temizlenirken kırılma meydana gelmiştir. Bu nedenle TIG kaynak yapılan 2 mm numuneler araştırmadan çıkarılmıştır.

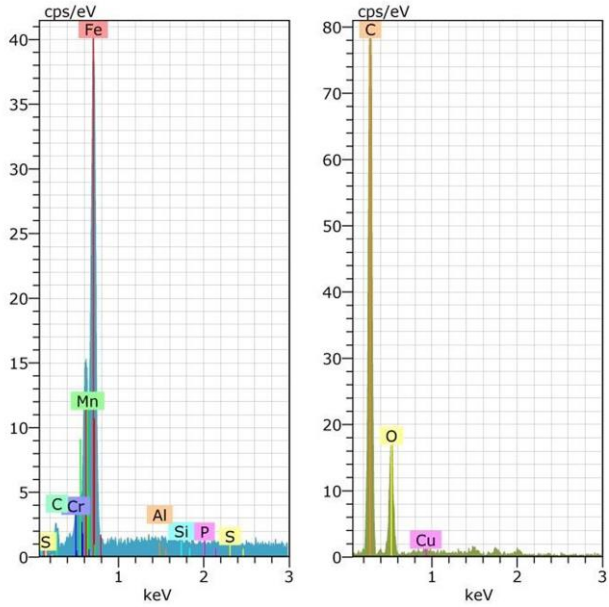
5 mm kalınlığa sahip deney numunelerinin TIG kaynağıyla birleştirme işleminde başarı sağlanmıştır. Görüntü verilerinin analizi için 500 kez yakınlaştırma yeterli görülmüş ve numaralandırmalar yapılarak kaynak bölgeleri detaylandırılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. TIG kaynağıyla birleştirilmiş 5 mm kalınlıktaki numunenin SEM görüntüsü (500x)

1 numara; deney malzemesinin çelik tarafını ifade etmektedir. Ana metal ile kaynak metali homojen bir yapı oluşturarak nüfuziyet sağlamıştır. 2 numara; kaynak bölgesinin çelik tarafını belirtmektedir. Yoğunluklu olarak kaynak metali içeren bu bölgede homojen yapı korunmuş ve kaynak bölgesi ile çelik geçiş bölgesi arasında kısmen çatlak oluşturma eğilimi gözlenmiştir. 3 numara; kaynağın Al tarafında geçiş bölgesini ifade etmektedir. Kaynak malzemesi Al ana metale doğru yönelim göstermiş ve homojen birleşim burada da korunmuştur. Bu bölgede çatlak oluşumu gibi kaynak sorunlarına rastlanılmamıştır. 4 numara Al tarafını göstermektedir. Bu bölgede az da olsa kaynak metaline rastlanmaktadır.

Şekil 1'de kare ile gösterilen noktalar elementel analiz için incelenen noktaları göstermektedir. Şekil 2'de verilen elementel analiz grafikleri, malzemelerin atomik karakteristikleri bu noktaların temsil ettiği bölgeleri doğrulamaktadır.



1. Bölge 2. Bölge

3. Bölge 4. Bölge

Şekil 2. İncelenen bölgelerin elementel analiz sonuçları

1 numaralı bölge, farklı elementlerden oluşan bir kimyasal kompozisyona sahiptir. Bu durum çelik metalinin tek elementli bir yapıya sahip olmamasıyla ifade edilebilir.

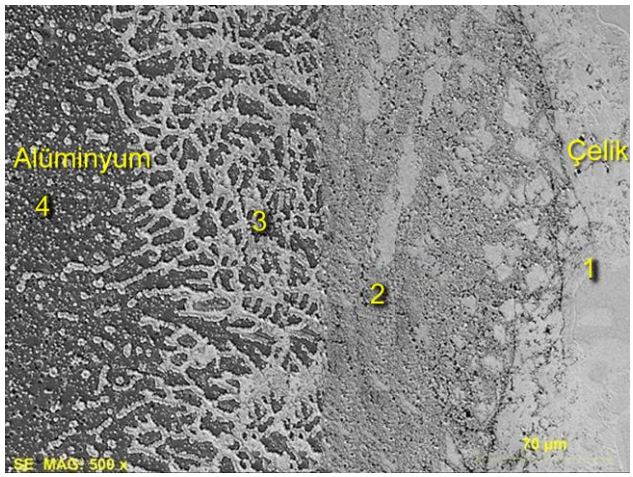
2 numaralı bölge, kaynak sırasında oluşan çatlağı ifade etmektedir. Bu sebeple kaynak metallerine ait herhangi bir elemente rastlanmamıştır. Bunun yerine serbest halde karbon (C) ve oksijen (O) atomları tespit edilmiştir. Serbest halde C atomlarına rastlanması, çeliğin yapısal elementlerinden olması sebebiyle çatlamanın çelik tarafında oluştuğu sonucunu vermektedir.

3 numaralı bölge, kaynağın Al tarafında geçiş bölgesini ifade etmektedir. Belirgin miktarda bakır (Cu) elementi bulunması kaynak metalinin elementel kompozisyonu sebebiyledir.

4 numaralı bölge, kaynatma işlemi sonunda analiz için Al tarafında bulunan elementleri ve değerlerini ifade etmektedir. Bu bölgede yüksek miktarda Al bulunması yapmış olduğumuz elementel analizi desteklemektedir.

Bu analizler bize birleştirme işleminin hangi bölgelerinde hangi element atomlarının mevcut olduğunu, yoğunluklarını ve kaynağın hangi metale doğru yönelim gösterdiği hakkında bilgi vermektedir. Buna göre; kaynak eriyiğinin Al metaline doğru yönelim gösterdiği ve çelik metalinin sınırlı miktarda yönelime sahip olduğu, ancak nüfuziyeti kaynak metaliyle sağladığı sonucuna ulaşılmaktadır.

10 mm kalınlığa sahip deney numuneleri başarıyla birleştirilmiştir. Benzer durumlar burada da geçerlidir. Çelik bölgesi ile geçiş bölgesi arasında kısmen daha az düzeyde çatlaklar gözlemlenmiştir. TIG kaynağında parça kalınlığı artıkça sonuçlar daha iyi gerçekleşmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. TIG kaynağıyla birleştirilmiş 10 mm kalınlıktaki numunenin SEM görüntüsü (500x)

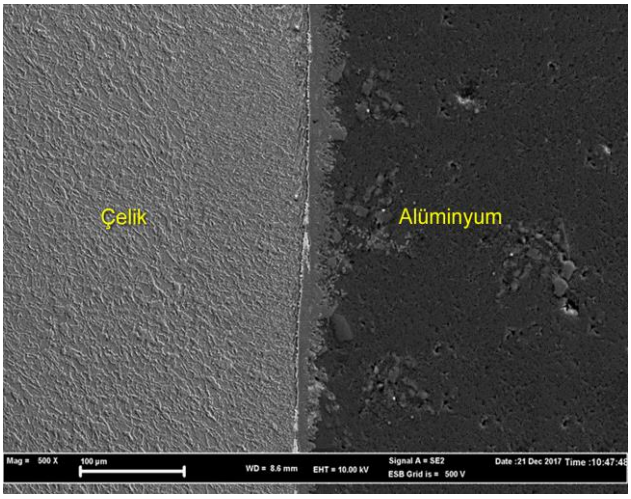
3.2 Sert lehim uygulamasının sonuçları

Sert lehim uygulanırken çelik malzeme yüzeyine kalay (Sn) kaplama yapılmış, sonrasında her iki metal alüminyum kaynak teli ile birleştirilmiştir. Bu işleme ait mikroyapı görüntüsü Şekil 4'de verilmiştir.

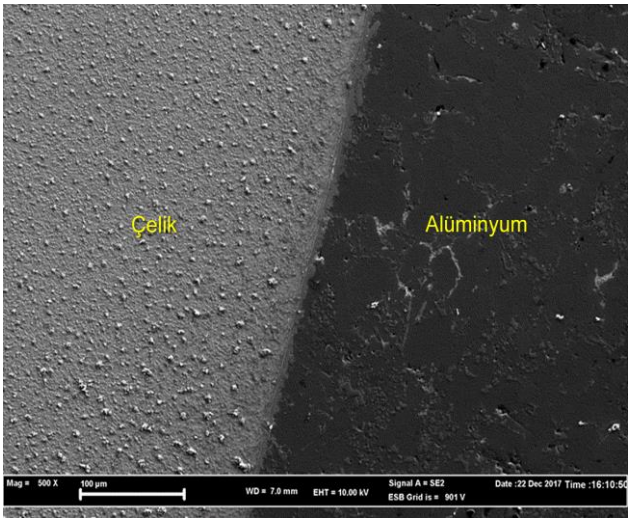
Uygulanan bu kaynak yönteminde 2 mm kalınlıktaki numunelerin kaynaklı birleşiminin mikroyapı görseli yan yüzeyden görüntü alınarak verilmiştir. İlave metal Al tarafına doğru yönelim göstermiştir. İki metal arasındaki ara tabaka belirgin ve düzgün bir çizgi halinde oluşum sergilemiştir.

Sert lehim uygulamasına ait 5 mm kalınlıktaki numunenin mikro yapısı incelendiğinde; ara tabakanın Al tarafına doğru kısıtlı da olsa yönelim gösterdiği ve çelik metalinin devamı gibi bir davranış sergilediği belirtilebilir. Ayrıca Al metal yüzeyinde de küçük çatlaklar ve çukurcuklar oluşmuştur (Şekil 5).

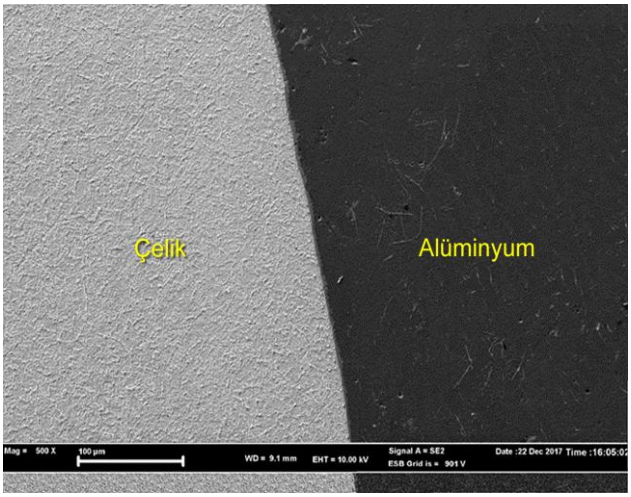
Mikro yapı görüntülemesi yapılan 10 mm kalınlığa sahip numune için de benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır. Kaynak ara tabakası, çelik devamı gibi davranarak Al yönüne doğru eğilim göstermiştir. Sert lehimde geçiş bölgesinde oluşan belirgin ve düzgün hat bu numunede de oluşmaktadır. Ayrıca birleştirme işlemi yapılan malzemelerin kalınlığı arttıkça ara tabaka kalınlığının azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 6).



Şekil 4. Sert lehim uygulaması yapılan 2 mm kalınlıktaki numunenin SEM görüntüsü (500x)



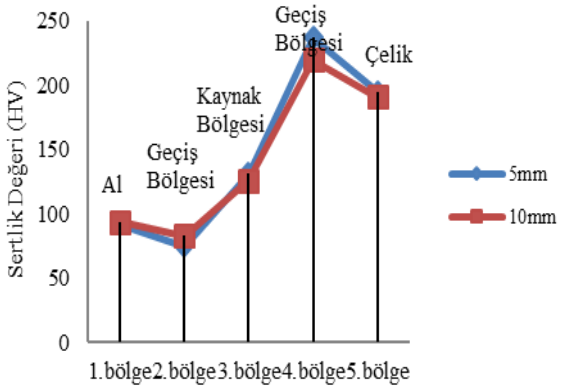
Şekil 5. Sert lehim uygulaması yapılan 5 mm kalınlıktaki numunenin SEM görüntüsü (500x)



Şekil 6. Sert lehim uygulaması yapılan 10 mm kalınlıktaki numunenin SEM görüntüsü (500x)

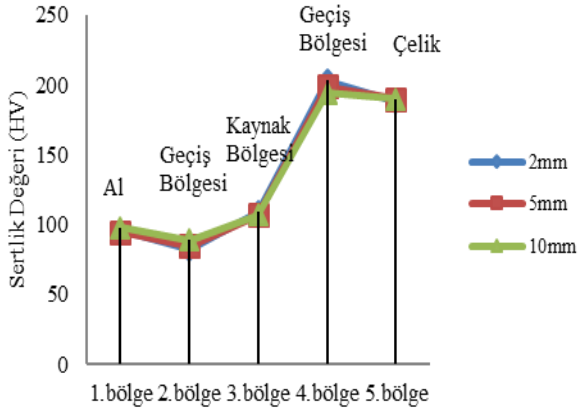
3.3 Sertlik testi sonuçları

Numuneler takım tezgâhlarında işlenip sertlik testi standartlarına uygun boyutlandırılarak testlere hazır hale getirilmiştir. Sertlik değerleri; Al ana metali, Al tarafında ısıdan etkilenen bölge (ITAB), kaynak dikişi, çelik tarafında ısıdan etkilenen bölge (ITAB) ve çelik ana metali olmak üzere beş noktadan alınmıştır (Şekil 7).



Şekil 7. Farklı kalınlıklara sahip numunelerin (5 mm, 10 mm) sertlik değerlerinin karşılaştırılması (TIG kaynak)

Kaynak öncesi ve sonrası ölçülen değerler karşılaştırıldığında, sert lehimleme için kalınlığa bağlı yüksek bir değişim görülmemektedir. TIG kaynak değerlerinde ise ısıdan etkilenen bölgedeki kalınlığa bağlı değişim daha yüksektir. Her iki kaynak yönteminde de Al tarafında ITAB bölgesinde sertlik değerlerinin düştüğü, çelik tarafında ITAB bölgesinde yükseldiği görülmektedir. Buna ek olarak ana metal sertliklerinde belirgin bir değişim bulunmamaktadır (Şekil 8).



Şekil 8. Farklı kalınlıklara sahip numunelerin (2 mm, 5 mm ve 10 mm) sertlik değerlerinin karşılaştırılması (Sert lehimleme)

Her iki kaynaklı birleştirme yöntemi için kaynak dikişi sertliğinin Al'dan yüksek, çelikten düşük olduğu belirlenmiştir. ITAB bölgesindeki sertlik değişimleri TIG kaynakta ve ince numunelerde en yüksek değerdedir.

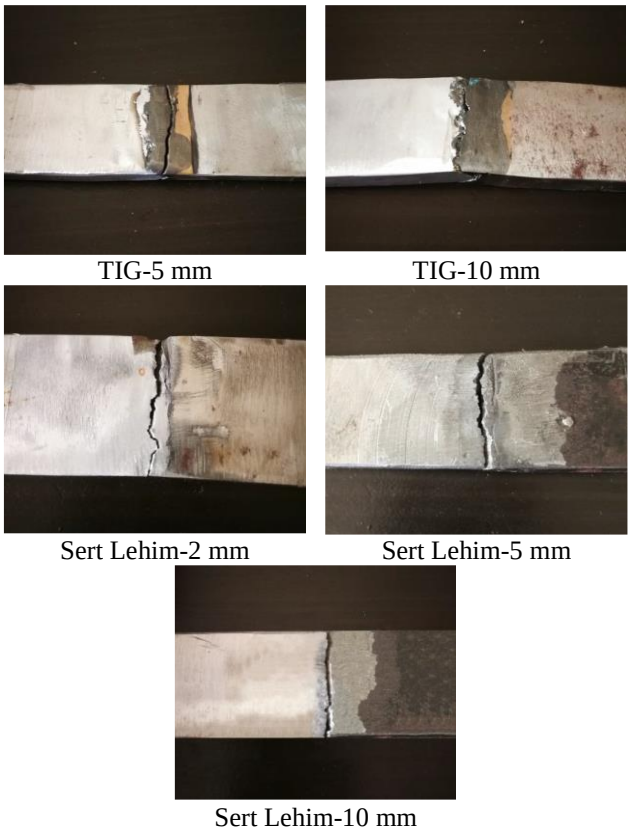
3.4 Çekme testi sonuçları

Deney malzemelerinin TIG ve sert lehim yöntemi ile farklı kalınlıktaki numunelerin çekme testi sonuçları Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Çekme testi sonuçları

Numune Malzemesi ve Ölçüleri	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
Çelik (St-37) (ISO 6892)	242	365	23
Alüminyum (6061-T6) (ISO 6892)	236	310	12
TIG Kaynağı (5 mm x 25 mm)	117	160.2	2.4
TIG Kaynağı (10 mm x 25 mm)	161.2	260.7	5.4
Sert Lehim (2 mm x 25 mm)	173.3	251	5.7
Sert Lehim (5 mm x 25 mm)	156.4	229.6	5.3
Sert Lehim (10 mm x 25 mm)	148	218.5	5.4

Yapılan çekme testleri sonucunda TIG-5mm numunesinde kaynak bölgesinden kopma meydana gelirken, diğer numunelerde kopma kaynak bölgesinin Al tarafında olmuştur (Şekil 9).



Şekil 9. Çekme testi sonunda kırılan deney numuneleri

Özellikle TIG kaynakta malzemenin inceliğine bağlı olarak yüksek ısı kaynak bölgesinde gerilmelere neden olmuş ve ayrılma bu bölgede gerçekleşmiştir. Zaten TIG-2 mm de numune teste hazırlanırken kopma gerçekleşmiş ve test edilememiştir. Diğer numuneler için kaynak sırasındaki ısı girdisi nedeniyle Al tarafında yeniden kristalleşme oluşması yumuşamaya sebebiyet vermiş ve dayanımı düşürmesinden ötürü kopma Al tarafında olduğu görülmüştür. Sert lehim yönteminde kalınlık arttıkça dayanım azalırken, TIG kaynak yönteminde çekme dayanımı kalınlıkla doğru orantılı bir şekilde artış göstermiştir.

4 Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, alüminyum (6061-T6) ve çelik (St-37) malzemelerinin farklı kalınlıklarda (2 mm, 5 mm ve 10 mm) TIG kaynak ve sert lehimleme yöntemleriyle birleştirilip mekanik karakteristiklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Mekanik özelliklerini belirleyebilmek için sertlik testi ve çekme testi gerçekleştirilmiş ayrıca kaynak bölgesinden SEM ile elde edilen mikro yapı görüntülerinin detaylı olarak analizi yapılmıştır.

Mikro ve makro yapı incelemeleri sonucunda TIG kaynak ile yapılan birleştirme işleminde malzeme kalınlığı azaldıkça kaynak bölgesinde çatlama ve kırılma meydana geldiği, kalınlık artışıyla da etkisini yitirdiği tespit edilmiştir. TIG kaynağına göre daha düşük ısı girdisi sağlayan sert lehimleme için herhangi bir yapısal deformasyon söz konusu olmadığı ortaya konulmuştur.

Sertlik testlerine göre her iki kaynak yönteminde de en yüksek sertlik değerleri tüm numuneler için çelik tarafında ITAB'dan, en düşük değerler de alüminyum tarafında ITAB'dan ölçülmüştür.

Bu çalışmada sertliğin çelik metaline doğru hızla yükseldiği ve en yüksek sertlik değerinin çeliğin ısıdan etkilenen bölgesinde oluştuğu tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlarda da en sert bölge kaynağın çelik tarafıdır. Fakat ısı etkisine maruz kalan Al malzeme yumuşamıştır.

Elde edilen sonuçlara göre malzemenin çelik tarafındaki ITAB bölgesinde sertliğin en yüksek değerde olduğu, sertliğin en düşük olduğu yer ise Al tarafında ITAB bölgesi olarak tespit edilmiştir.

Uygulanan kaynak yöntemlerinin her ikisinde de kaynak bölgesinin sertliği alüminyum kaynak metalinden daha yüksek, çelik ana metalinden daha düşük olduğu ortaya konulmuştur.

Çalışmada sert lehimleme için malzeme kalınlığına bağlı sertlik değerlerindeki değişimler göz ardı edilebilecek seviyededir ancak TIG kaynak yöntemi için yüksek ısı girdisi sebebiyle çelik ve Al metalin sertlik değerlerindeki artış ve azalış daha fazla miktarda olduğu savunulabilir. Tüm numunelerde kopma, kaynağın Al tarafında gerçekleşmiş fakat TIG-5mm ile ifade edilen numunede kaynak içi çatlak oluşumundan dolayı kopma burada meydana gelmiştir. TIG kaynak yönteminde kalınlık arttıkça çekme dayanımı artmış, sert lehim uygulamasında da kalınlık arttıkça çekme dayanımı azalmıştır.

Bir numune hariç (TIG-5mm) çekme testi neticesinde kopmanın Al tarafında olması literatür ile paralellik

göstermiş olup yapılan deneyin sağlıklı olduğunu göstermektedir.

Elde edilen verilere göre, Al ve çeliğin kaynatılması işleminde 2mm ve 5mm kalınlıklara sahip malzemelerin kaynatılması için sert lehimleme yöntemi, daha kalın malzemelerin kaynatılması için de TIG kaynak yöntemi kullanılmasının bu tür farklı metalleri birleştirmek adına daha verimli olacağı görüşü ortaya çıkmıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

[1] L. Jeffus, Welding: Principles and Applications. Cengage Learning, Boston, USA, 2015.

[2] S. C. Juang and Y.S. Tarng, Process Parameter Selection for Optimizing the Weld Pool Geometry in the Tungsten Inert Gas Welding of Stainless Steel. J. Mater. Process. Techn., 122 (1), 33-37, 2002. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00021-3

[3] S. Kou, Welding Metallurgy. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA. 2003.

[4] M. P. Groover, Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials Processes and Systems. John Wiley & Sons Inc., 2010.

[5] H. Y. Huang, Effects of Shielding Gas Composition and Activating Flux on GTAW Weldments. Materials & Design. 30 (7), 2404-2409, 2009. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.10.024

[6] P. Kumar, K. P. Kolhe, S. J. Morey and C. K. Datta, Process Parameters Optimization of an Aluminum Alloy with Pulsed Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) Using Gas Mixtures. Materials Sciences and Applications, 2 (4), 251-257, 2011. http://dx.doi.org/10.4236/msa.2011.24032

[7] G. K. Hicken, R. D. Campbell, G. J. Daumeyer, R. B. Madigan, S. J. Marburger and B. Young, Gas Tungsten Arc Welding. AWS Welding Handbook, pp 190-194, 1993.

[8] A. Durgutlu, N. Kahraman ve B. Gülenç, Bakır ve Çelik Levhaların Örtülü Elektrod ve TIG Kaynak Yöntemleri ile Birleştirilmesi ve Arayüzey Özelliklerinin İncelenmesi. Gazi Ünv. Müh. Mim. Fak. Der, 20 (2), 183-189, 2005.

[9] Y. Kaya, AISI 304 ve AISI 430 Paslanmaz Çeliklerin TIG, MIG ve Örtülü Elektrod Ark Kaynağıyla Birleştirilebilirliğinin araştırılması. Gazi Ünv. Müh. Mim. Fak. Der., 25 (3), 549-557, 2010.

[10] A. D. Althouse, C. H. Turnquist, W. A. Bowditch and K. E. Bowditch, Modern Welding. Goodheart-Willcox Co Inc, 2013.

[11] B. Gülenç, Difüzyon Sert Lehimlemesi ile Titanyum ve Düşük Karbonlu Çelik Malzemelerin Birleştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Makina Tas. İmalat Dergisi, 5 (1), 22-28, 2003.

[12] Y. L. Shabtay, M. Ainali and A. Lea, New Brazing Processes Using Anneal-Resistant Copper and Brass Alloys. Materials & Design, 25 (1), 83-39, 2004. https://doi.org/10.1016/S0261-3069(03)00162-6

[13] R. W. Messler, Joining of Materials and Structures: From Pragmatic Process to Enabling Technology. Butterworth-Heinemann, Burlington, USA. 2004.

[14] H. Durmuş, N. Çömez ve M. Yurddaşkal, Soğuk Metal Transfer Kaynağı ile Birleştirilmiş AA6061-Galvanizli Çelik Sacların Karakterizasyonu. Dicle Ünv. Müh. Fak. Mühendislik Dergisi, 8 (4), 835-844, 2017.

[15] S. A. Hussein, A. S. Tahir and A. B. Hadzley, Characteristics of Aluminum-to-Steel Joint Made by Friction Stirwelding: A Review. Materials Today Communication, 5, 32-49, 2015. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2015.09.004

[16] E. Taban, J. E. Gould and J. C. Lippold, Dissimilar Friction Welding of 6061-T6 Aluminum and AISI 1018 Steel: Properties and Microstructural Characterization. Materials & Design 31, 2305-2311, 2010. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.12.010

[17] Y. Zhang, J. Huang, Z. Cheng, Z. Ye, H. Chi, L. Peng and S. Chen, Study on MIG TIG Double-Sided Arc Welding-Brazing of Aluminum and Stainless Steel. Materials Letters, 172, 146-148, 2016. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.02.146

[18] S. Kotari, E. Punna, S. M. Gangadhar, M. Cheepu, P. Sarkar and S. Venukumar, Dissimilar Metals TIG Welding-Brazing of AZ31 Magnesium Alloy to 304 Stainless Steel. Materials Today Proceedings, 39 (6), 1549-1552, 2020. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.553

[19] C. Meriç, N. S. Köksal, M. T. Erdoğan ve A. Okur, Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş farklı malzemelerin kaynak bölgesinin incelenmesi. Celal Bayar Ünv. Fen Bil. Der., 4 (2), 135-144, 2008.

[20] J. Y. Xue, Y. X. Li, H. Chen and Z. T. Zhu, Wettability, Microstructure and Properties of 6061 Aluminum Alloy/304 Stainless Steel Butt Joint Achieved by Laser-Metal Inert-Gas Hybrid Welding-Brazing. Trans. Nonferrous Met. Soc. of China, 28 (10), 1938-1946, 2018. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(18)64839-3

[21] I. Al Zamzami, V. Di Cocco, J. B. Davison, F. Iacoviello and L. Susmel, Static Strength and Design of Aluminium-to-Steel Thin Welded Joints. Welding in the World, 62 (6), 1255–1272, 2018. https://doi.org/10.1007/s40194-018-0634-2

[22] D. Sun, Y. Zhang, Y. Liu, X. Gu and H. Li, Microstructures and Mechanical Properties of Resistance Spot Welded Joints of 16Mn Steel and 6063-T6 Aluminum Alloy with Different Electrodes. Materials & Design, 109, 596-608, 2016. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.076

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 301-308

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Zonguldak'ta $PM_{2.5}$ odaklı hava kirliliği-mortalite ilişkisinin incelenmesi

Investigation of $PM_{2.5}$ focussed air pollution-mortality relationship in Zonguldak

Kemal Ulusoy[1,*]

[1] *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye*

Öz

Hava kirliliği her yıl milyonlarca insanın ölümüne sebep olmaktadır. Küresel ısınmanın etkisiyle hava sıcaklıklarının artması kirleticilerin atmosferde kalış süresini artırmaktadır. Bu durum çevre ve halk sağlığı açısından maruziyeti ve ölüm riskini yükseltmektedir. Özellikle $PM_{2.5}$ (ince partikül madde) üst solunum yolu hastalıklarının ve hastalıklara bağlı ölümlerin temel kaynaklarından biridir. Bu çalışmada, Zonguldak ili özelinde $PM_{2.5}$ kaynaklı hava kirliliğinin yetişkin (25+ yaş) mortalitesi üzerindeki etkisi irdelenmiştir. 4 hava kalitesi ölçüm istasyonundan elde edilen ((i) Çatalağzı-Cumayanı, (ii) Çatalağzı-Kuzyaka, (iii) Çaycuma ve (iv) Trafik) PM2.5 konsantrasyonu verileri yıllık ve mevsimsel bazda değerlendirilmiştir. 3 yıllık zaman dilimi için (2020-2021 ve 2022) gerçekleştirilen çalışmada, hava kirliliğine atfedilen tahmini ölüm sayısının 2022 yılında en yüksek seviyeye ulaştığı (ortalama 927 kişi) tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: AirQ+, Hava kirliliği, Mortalite, $PM_{2.5}$, Zonguldak.

Abstract

Air pollution causes the death of millions of people every year. The increase in air temperatures with the effect of global warming increases the residence time of pollutants in the atmosphere. This situation increases the risk of exposure and death in terms of environmental and public health. Especially $PM_{2.5}$ (fine particulate matter) is one of the main sources of upper respiratory diseases and deaths due to diseases. In this study, the effect of $PM_{2.5}$ air pollution on adult (25+ years old) mortality in Zonguldak province was analyzed. 4 air quality measurement stations ((i) Catalagzı-Cumayanı, (ii) Catalagzı-Kuzyaka, (iii) Caycuma and (iv) Traffic) PM2.5 concentration data were evaluated on annual and seasonal basis. In the study conducted for 3 years (2020-2021 and 2022), it was determined that the estimated number of deaths attributed to air pollution reached its highest level in 2022 (an average of 927 people).

Keywords: AirQ+, Air pollution, Mortality, $PM_{2.5}$, Zonguldak.

1 Giriş

Hava kirliliği, çevre ve halk sağlığı üzerinde önemli etkilere sahiptir [1]. Son raporlar, hava kirliliğinin aynı zamanda küresel hastalık yüküne de önemli bir katkıda bulunduğunu göstermektedir [2]. Antropojenik ve doğal kaynaklardan çıkan hava kirleticiler atmosferi kirletmekte ve her yıl yaklaşık yedi milyon insanın ölümüne sebep olmaktadır. Dünya'nın yaklaşık olarak %90'ı, Dünya Sağlık Örgütü'nün (DSÖ) belirlediği limit değerlerin üzerinde hava kirliliğine maruz kalmaktadır. Kaldı ki gelişmemiş veya gelişmekte olan ülkeler için maruziyetin daha fazla olduğu düşünülmektedir [3].

Hem şehirlerde hem de kırsal alanlarda dış ortam hava kirliliğine bağlı olarak felç, kalp hastalıkları, akciğer kanseri, akut ve kronik solunum yolu hastalıklarının ortaya çıktığı ve uzun süreli partikül madde (PM) maruziyetinin hastalıklarla ilişkili olduğu çeşitli çalışmalarla ispatlanmıştır [4-6]. Ayrıca, çevre sağlığı açısından toprak kirliliğinin tetiklenmesi [7], kuru çökelme sonucu güneş panellerinin üzerini kaplaması sebebiyle enerji verimliliğinin azalması [8] ve fotosentez üzerinde negatif etkileri [9] gibi olumsuzluklar çeşitli çalışmalar sonucu tespit edilmiştir.

Özellikle yakma prosesi kaynaklı atmosfere salınan PM, aerodinamik çaplarına ve hava kalitesi değerlendirme kriterlerine göre iki temel grupta (PM_{10} <10 µm aerodinamik çapa sahip kaba partikül madde, $PM_{2.5}$ ise <2.5 µm aerodinamik çapa sahip olan ince partikül madde) incelenmektedir [10].

Heft-Neal vd. [11] tarafından Afrika'da gerçekleştirilen çalışmada, hava kirliliğinin Afrika'daki bebekler arasındaki ölüm oranları üzerindeki etkisini tahmin etmektedir. $PM_{2.5}$ konsantrasyonundaki 10 µg/m³'lük bir artışın bebek ölümlerinde %9'luk bir artışla ilişkili olduğu bulunmuştur. Bu, incelenen ülkelerdeki bebek ölümlerinin %22'sinden $PM_{2.5}$ maruziyetinin sorumlu olduğunu göstermektedir. Danimarka'da 30-85 yaş aralığı için yapılan çalışmada [12] ise 4 kirletici faktörün (azot dioksit (NO_2), $PM_{2.5}$, siyah karbon partikülleri ve ozon (O_3)) ölüm vakaları ile ilişkisi incelenmiştir. 5 yıllık ortalama konsantrasyon değerleri ve ölüm vakaları arasında %95 güven aralığı için yapılan değerlendirmede sonucun pozitif çıktığı ve ilişkili oldukları tespit edilmiştir.

Naghan ve diğerleri tarafından [13] 2022 yılında Shahrekord'da (İran) gerçekleştirilen çalışmada, AirQ+ modeli kullanılarak yedi yıllık bir süre boyunca $PM_{2.5}$, azot dioksit (NO_2) ve ozon (O_3) ile ilişkili kısa ve uzun vadeli maruziyetin sağlık etkileri araştırılmıştır. Araştırmacılar, $PM_{2.5}$'in sağlık üzerindeki kısa vadeli etkilerinin NO_2'ninkilerden daha fazla, uzun vadede ise daha az olduğunu saptamışlardır. Ozonun etkisiz olduğunu belirten

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: kemalulusoy@ohu.edu.tr (K. Ulusoy)
Geliş / Recieved: 06.10.2023 Kabul / Accepted: 08.12.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1372285

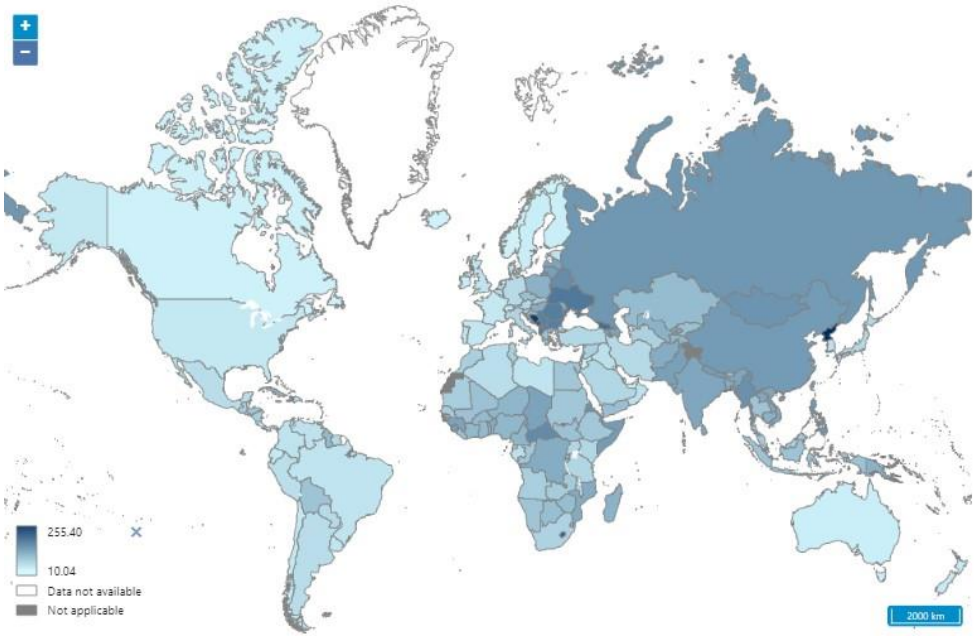
bilim insanları, tüm ölümlerin $PM_{2.5}$ ve NO_2'den kaynaklandığı tahmin etmektedir. Malakootian ve Mohammadi 2020 yılında yaptıkları çalışmada [14], 2016 ve 2017 yıllarında Kerman şehrindeki ölüm vakaları üzerinde $PM_{2,5}$, NO_2 ve O_3 parametrelerinin kısa ve uzun vadeli etkilerini AirQ+ yazılımı aracılığıyla değerlendirmişlerdir. Uzun vadeli sağlık etki değerlendirmesinde, $PM_{2,5}$'in neden olduğu doğal ölüm için en yüksek atfedilebilir oran 2016'da %15.24 ve 2017'de %15.15 olduğu yazarlar tarafından bulunmuştur. Asgari ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada [15], İran'ın batısında yer alan Sanandaj şehrinde 2018-2019 yıllarında AirQ+ yazılımı ile $PM_{2.5}$ ile ilişkili ölüm vakaları araştırılmıştır. Endüstriyel açıdan gelişmemiş bir bölge olan Sanandaj'da $PM_{2.5}$'in uzun vadeli maruziyetin (6 aydan fazla) ortalama 326 ölüme neden olduğu tespit edilmiştir. Sarkhosh ve diğerlerinin yaptığı çalışmada [16], Meşhed'de (İran) $PM_{2.5}$ odaklı sağlık etkilerinin ölçülmesi amaçlanmaktadır. Çalışmada, 2019 yılında PM2.5'e atfedilen toplam ölüm oranının yaklaşık 1069 vaka olduğunu ve bunun Meşhed'deki toplam ölümlerin yaklaşık %9.5'ine denk geldiği bildirilmektedir.

Konya ili için NO_2 odaklı yapılan bir çalışmada [17], AirQ+ programı aracılığıyla NO_2 kaynaklı hava kirliliğinin etkisi araştırılmaktadır. 2016-2019 zaman aralığında yapılan çalışmada NO_2 kirliliğine atfedilen ölüm hızının literatürdeki diğer ülke ve şehirlerden yüksek olduğu belirtilmektedir. Konya odaklı bir başka çalışmada [18] ise 30+ yaş yetişkinlerde $PM_{2.5}$ odaklı mortalite sayıları AirQ+ kullanılarak hesaplanmıştır. 2017, 2018 ve 2019 yılları için sırasıyla 2163, 1582 ve 1278 erken ölüme sebep olduğu yazarlar tarafından tespit edilmiştir.

Türkiye odaklı başka bir AirQ+ yazılımı ile hava kirliliği çalışması ise Mayda ve Karkaç tarafından [19] Düzce ili baz alınarak hazırlanmıştır. Çalışmada, 2009-2020 zaman aralığındaki PM_{10} ve $PM_{2.5}$ kirliliği incelenmiş ve AirQ+ programı kullanılarak ölüm sayıları tahmin edilmiştir. Sonuç olarak, partikül maddenin Düzce'de erken ölümlere neden olduğu ve hava kalitesi iyileştirici önlemlerin kent düzeyinde alınması gerektiği vurgulanmıştır. Varol ve arkadaşlarının Tekirdağ odaklı yaptıkları çalışmada [20], AirQ+ aracılığıyla hava kirliliğine atfedilen ölüm sayısı hesaplanmıştır. Taşıt emisyonlarını hedef alan çalışmada günlük SO_2 ölçümleri ulusal ve DSÖ eşik değerlerini sırasıyla 5 ve 143 gün aşarken, PM_{10} değerlerinin bu sınırları sırasıyla 239 ve 331 gün aştığı vurgulanmıştır. AirQ+ sonuçlarına göre, ölümlerin %25.2'si hava kirliliğinden kaynaklanmaktadır ve 100.000 ölümden 415'inin hava kirliliğine atfedilebilir olduğu tespit edilmiştir.

DSÖ tarafından 2019 yılı için yapılan değerlendirmelere göre Türkiye için 100.000 nüfus başına iç ve dış ortam hava kirliliğine atfedilen ölüm oranı ortalama 48.88'dir. Erkeklerde bu oran 50.65 iken kadınlarda 47,16'dır. Dünya genelinde en yüksek oran Kuzey Kore'ye (255.4) en düşük oran ise İzlanda'ya (16.71) aittir DSÖ tarafından hazırlanan dağılım haritası Şekil 1'de verilmiştir [15].

Bu çalışmada, Zonguldak ilinde 2020-2022 yılları zaman aralığında (3 yıl) DSÖ tarafından hazırlanan AirQ+ yazılımı vasıtasıyla $PM_{2.5}$ hava kirliliğinin solunum yolu kaynaklı yetişkin (25+ yaş) mortalitesine etkisinin incelenmesi ve $PM_{2.5}$ kaynaklı ölüm sayılarının tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Çalışmada minimum, ortalama ve maksimum ölüm sayıları, ölüm oranı ve risk altındaki 100.000 kişiye atfedilebilir tahmini ölüm sayısı parametreleri hesaplanmıştır. Yapılan literatür taramasında, Zonguldak ilinde $PM_{2.5}$ odaklı hava kirliliğinin solunum yolu kaynaklı yetişkin (25+ yaş) mortalitesine etkisinin incelenmesi kapsamında herhangi bir çalışma yapılmadığı tespit edilmiş olup, il bazında gerçekleştirilen ve güncel bir veri seti ışığında 3 yıllık değerlendirmeyi kapsayan bu çalışma, ilgili kapsamlar dahilinde özgünlüğünü sunmaktadır.



Şekil 1. Dünya genelinde iç ve dış ortam hava kirliliğine atfedilen ölüm oranı dağılımı (100.000 nüfus başına) [21]

2 Materyal ve metot

Çalışmada, (i) enerji kazanım faaliyetleri, (ii) maden yataklarının ve madencilik faaliyetlerinin fazlalığı, (iii) kara, deniz ve hava taşımacılığının var olması ve (iv) madencilik faaliyetleri nedeniyle hastalık ve ölüm vakalarının sıkça tartışılması nedeniyle Zonguldak ili örneklem kent olarak seçilmiştir. Türkiye'nin Batı Karadeniz Bölgesi'nde yer alan ilin yüz ölçümü 3310 km²'dir. Şehir, 41° 27' kuzey enlemleri ile 31° 49' doğu boylamları arasında olup, batı ve kuzeyden Karadeniz'e kıyısı bulunmaktadır [22].

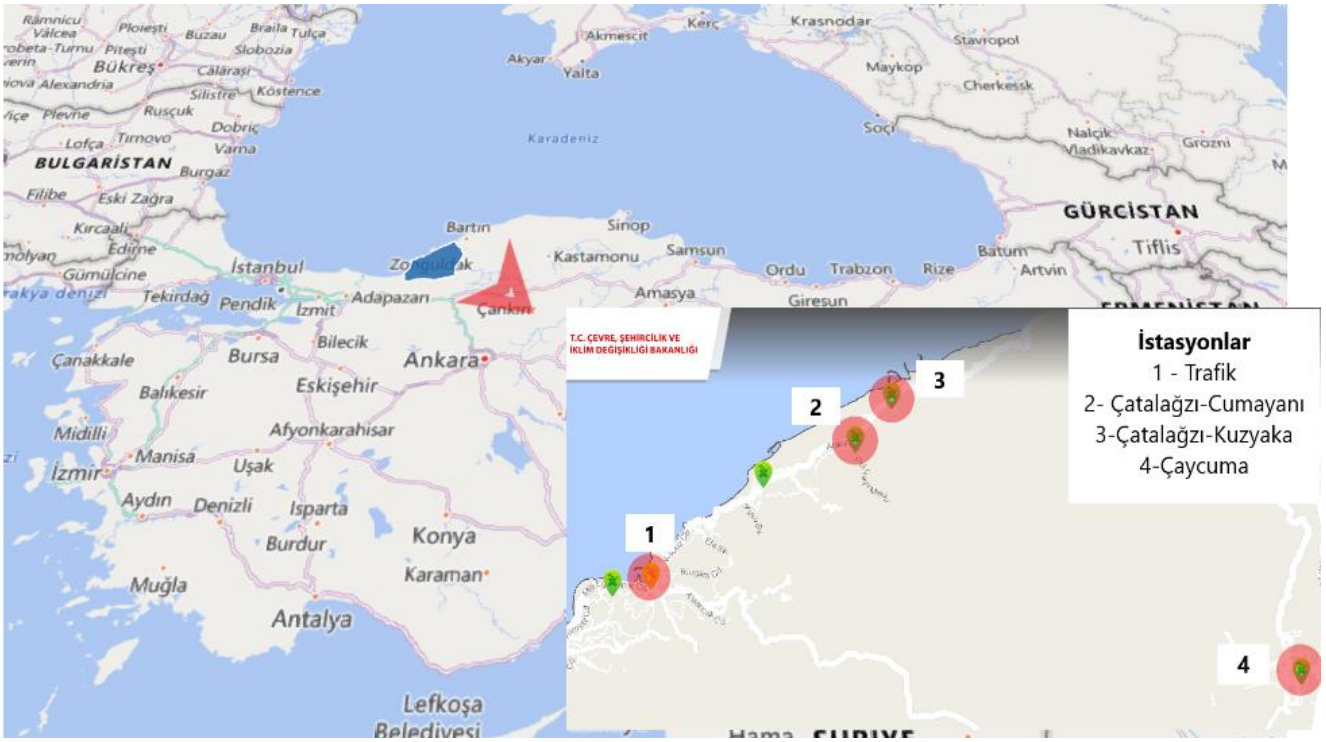
Türkiye'nin önemli taş kömürü sahalarından biri Zonguldak ilinde yer almaktadır. Endüstriyel faaliyetlerin temelini oluşturan kömür madenleri aynı zamanda çevre ve halk sağlığı açısından risk teşkil etmektedir [23]. Maden yatakları ve işletmelerinde temel problemlerden biri de tozumadır. Toz aynı zamanda bir partikül maddedir ve çapı yaklaşık olarak 1-100 µm arasında değişmektedir [24]. Zonguldak ilinin Türkiye haritasındaki ve ildeki (çalışma kapsamında ele alınan) hava kalitesi izleme istasyonlarının konumu Şekil 2'de verilmiştir.

2.1 Hava kirliliği ve kaba ölüm hızı verileri

Zonguldak ili için 1 Ocak 2020 ve 31 Aralık 2022 zaman aralığını kapsayan $PM_{2.5}$ konsantrasyon verileri Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın online veri tabanından [25] alınmıştır. Veri seçiminde %75'lik asgari ölçüm şartını taşıyan dört (4) hava kalitesi izleme istasyonu ((i) Çatalağzı-Cumayanı, (ii) Çatalağzı-Kuzyaka, (iii) Çaycuma ve (iv) Trafik) değerlendirmeye alınmıştır. Diğer hava kalitesi ölçüm istasyonlarında (4 adet) asgari düzeyde veri seti oluşmadığından değerlendirmeye alınmamıştır. Değerlendirilen verilerin yıllık ortalaması belirlenmiş olup AirQ+ programına yıllık ortalama konsantrasyon değerleri aktarılmıştır. Yıllık ortalama konsantrasyon değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Dört hava kalitesi izleme istasyonuna ait yıllık $PM_{2.5}$ konsantrasyon ortalamaları

2020	**$PM_{2,5}$ (µg/m³)**
Zonguldak - Çatalağzı Cumayanı	28.2
Zonguldak - Çatalağzı Kuzyaka	24.3
Zonguldak - Çaycuma	24
Zonguldak - Trafik	21.56
2021	
Zonguldak - Çatalağzı Cumayanı	25.93
Zonguldak - Çatalağzı Kuzyaka	23.69
Zonguldak - Çaycuma	26.24
Zonguldak - Trafik	22.12
2022	
Zonguldak - Çatalağzı Cumayanı	29.74
Zonguldak - Çatalağzı Kuzyaka	26.55
Zonguldak - Çaycuma	20.64
Zonguldak - Trafik	19.45



Şekil 2. Zonguldak ili ve ildeki hava kalitesi ölçüm istasyonları haritası [25]

Kaba ölüm hızı, ölüm (mortalite) düzeyini belirlemede en sık kullanılan ölçüttür. Belirli bir alanda ve zaman aralığında ölen kişi sayısının nüfusa oranı olarak tanımlanmaktadır [26]. Kaba ölüm hızı hesabı Denklem (1)'de verilmiştir:

Burada kaba ölüm hızı (KÖH), belirli bir alanda ve zamanda ölen kişi sayısı (X) ve aynı dönemdeki nüfus bilgisi (Y) olarak kodlanmıştır.

$$\text{KÖH (‰)} = \frac{X}{Y} * 1000 \quad (1)$$

Zonguldak ili için kaba ölüm hızı verileri Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) veri tabanından [27] alınmıştır. Buna göre il için 2020, 2021 ve 2022 yıllarındaki kaba ölüm hızları sırasıyla ‰7.8, 9.4 ve 8.4'tür. İl için çalışmanın zaman aralığı kapsayan yıllardaki kaba ölüm hızları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Zonguldak ili kaba ölüm hızı verileri (2020-2022)

Yıl	Kaba ölüm hızı (‰)
2020	7.8
2021	9.4
2022	8.4

2.2 AirQ+

DSÖ tarafından hava kirliliğinin/kalitesinin mortalite ve morbidite ile ilişkisini belirlemek amacıyla geliştirilmiştir. Hava kirleticilerin, halk sağlığına etkilerini hesaplamak ve hava kirliliğinin belirli nedenler üzerindeki ölümlerle ilişkisini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Risk faktörlerine yönelik minimum, ortalama ve maksimum maruziyet ve ölüm oranı-sayısı hesaplanmaktadır [28].

AirQ+ $PM_{2.5}$, PM_{10}, NO_2, O_3 ve siyah karbon parametreleri ile ilişkili ölüm ve hastalık oranlarını/sayılarını belirleyebilen bir yazılımdır [29]. Kısa ve uzun vadeli maruziyetlerin yerel ve bölgesel hesaplanmalarında konsantrasyon verilerinin meta analizine dayanarak olası sonuçlar elde etmektedir [30]. Kısa süreli maruziyet belirli bir zaman aralığında kirleticinin günlük konsantrasyonları dikkate alınarak hesaplanmaktadır ve akut etkilerle doğrudan ilişkilidir. Uzun süreli maruziyet değerlendirmesi ise bir ve/ya birden fazla yılın ortalama değerini temsil eden hava kirliliği verileri (bazen mevsimsel veriler de dikkate alınır) dikkate alınarak yapılmaktadır. Uzun süreli maruz kalmaya dayalı etkilerin ve hastalıkla arasındaki ilişkisinin boyutunu tahmin etmeye (göreceli risk) dayalıdır [31].

AirQ+ yazılımı ile 3 temel başlıkta ((i) etki değerlendirmesi, (ii) hastalık yükü ve (iii) risk analizi) değerlendirme yapmak mümkündür. Bu çalışma kapsamında, kirletici odaklı ($PM_{2.5}$) hastalık yükü başlığı altında "kaza sonucu olmayan ölümler, 25+ yaş yetişkinler" grubu için küresel maruziyet ölüm modeli metodu kullanılarak değerlendirmeler yapılmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

Zonguldak ilinde $PM_{2.5}$ konsantrasyon ortalamaları değerlendirildiğinde en yüksek değerlerin, 2020 yılı için Çatalağzı-Cumayanı (28.2 µg/m^3) istasyonunda, 2021 yılı için Çaycuma (26.24 µg/m^3) istasyonunda, 2022 yılı içinse, 2020 yılındaki gibi, Çatalağzı-Cumayanı istasyonunda (29.74 µg/m^3) ölçüldüğü tespit edilmiştir. Yıl bazlı yapılan değerlendirmede ise 2020 yılının 24.52 µg/m^3'lük ortalamayla kirletici özelinde en kirli yıl olduğu saptanmıştır.

3.1. İstasyon bazlı mevsimsel değerlendirmeler

İlgili istasyonlara ait mevsimsel $PM_{2.5}$ kirletici konsantrasyon dağılımları (min, ort, max ve standart sapma) Tablo 2,3,4 ve 5'te verilmiştir.

Tablo 3'teki Çatalağzı-Cumayanı hava kalitesi izleme istasyonu verileri incelendiğinde, ortalama konsantrasyon değerlerinin (2022 yılı hariç) kış mevsiminde pik yaptığı ve standart sapma değerlerinin yaz mevsimi haricinde yüksek olduğu görülmektedir. İlgili istasyonda maksimum değerin 2021 yılı kış mevsiminde 102.68 µg/m^3 olarak ölçüldüğü tespit edilmiştir. Minimum değer ise 4.86 µg/m^3'lük ortalama ile 2020 yılının sonbahar mevsiminde kaydedilmiştir.

Tablo 3. Çatalağzı-Cumayanı hava kalitesi izleme istasyonuna ait mevsimsel $PM_{2.5}$ konsantrasyon verileri

	Çatalağzı Cumayanı			
$PM_{2.5}$ (µg/m^3)	Min	Ort	Max	Standart Sapma
2020				
Sonbahar	4.86	25.36	87.73	17.76
Kış	7.22	38.2	88.49	18.43
İlkbahar	7.73	29.63	64.51	13.46
Yaz	6.86	14.39	57.64	6.24
2021				
Sonbahar	8.26	27.14	82.18	16.29
Kış	11.34	41.68	102.68	20.40
İlkbahar	6.77	26.77	67.77	13.63
Yaz	5.93	14.96	34.62	4.94
2022				
Sonbahar	7.81	38.51	60.98	12.32
Kış	5.88	29.04	71.04	14.31
İlkbahar	6.34	25.93	64.74	12.68
Yaz	9.38	17.39	20.99	4.01

Tablo 4'te verilen Çatalağzı-Kuzyaka hava kalitesi izleme istasyonu verileri Çatalağzı-Cumayanı istasyonu verileri ile paralellik göstermektedir. Kış mevsiminde, beklenildiği gibi, ortalama konsantrasyon değerlerinin yüksek olduğu ve yaz mevsimindeki standart sapma değerlerinin minimum değerler aldığı saptanmıştır. İstasyon bazında en yüksek konsantrasyon değeri 2020 yılı kış mevsiminde 92.08 µg/m^3 olarak ölçülmüştür. Minimum değer ise 2.37 µg/m^3'lük ortalama konsantrasyon değeri ile 2021 yılı sonbahar mevsimine aittir.

Tablo 4. Çatalağzı-Kuzyaka hava kalitesi izleme istasyonuna ait mevsimsel $PM_{2.5}$ konsantrasyon verileri

Çatalağzı Kuzyaka				
$PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	Min	Ort	Max	Standart Sapma
2020				
Sonbahar	3.55	24.89	70.96	14.76
Kış	8.30	37.22	92.08	22.17
İlkbahar	5.19	22.09	47.35	9.68
Yaz	6.52	12.23	18.33	2.85
2021				
Sonbahar	2.37	28.90	64.97	17.00
Kış	6.01	37.16	78.82	19.16
İlkbahar	5.23	24.12	60.47	13.19
Yaz	3.39	10.83	20.68	3.44
2022				
Sonbahar	4.12	23.96	57.18	13.65
Kış	3.87	33.21	77.13	19.53
İlkbahar	7.47	28.33	79.52	15.59
Yaz	6.13	13.48	25.29	4.66

Çaycuma hava kalitesi izleme istasyonuna ait mevsimsel $PM_{2.5}$ konsantrasyon verileri Tablo 5'te verilmiştir. Buna göre Tablo 3 ve 4 verilen istasyon verileri ile karşılaştırıldığında, standart sapma değerlerine bakarak, konsantrasyon dalgalanmalarının nispeten daha az olduğu söylenebilir. Çaycuma istasyonundaki maksimum konsantrasyon değeri 90.22 $\mu g/m^3$'lük ortalama ile 2021 yılı kış mevsimine aittir. Minimum konsantrasyon değeri ise 4.26 $\mu g/m^3$ ile 2022 yılı sonbahar mevsiminde ölçülmüştür.

Tablo 5. Çaycuma hava kalitesi izleme istasyonuna ait mevsimsel $PM_{2.5}$ konsantrasyon verileri

Çaycuma				
$PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	Min	Ort	Max	Standart Sapma
2020				
Sonbahar	7.46	23.84	63.77	12.40
Kış	5.96	32.58	68.33	15.40
İlkbahar	6.52	22.00	51.47	9.70
Yaz	6.34	14.05	24.78	4.19
2021				
Sonbahar	7.26	35.70	63.49	12.78
Kış	8.61	41.03	90.22	19.00
İlkbahar	7.95	22.86	64.89	11.15
Yaz	7.35	15.92	25.09	4.41
2022				
Sonbahar	4.26	19.68	41.13	9.48
Kış	4.78	32.28	80.50	16.41
İlkbahar	6.52	21.16	68.13	11.57
Yaz	4.74	12.93	24.84	4.64

Tablo 6'da Trafik hava kalitesi izleme istasyonuna ait veriler verilmiştir. İlgili değerlere bakıldığında 2021 kış mevsiminde standart sapmanın ve ortalama konsantrasyon değerinin pik yaptığı belirlenmiştir. En yüksek konsantrasyon ortalaması yine bu dönemde gerçekleşmiştir. İstasyon bazında ölçülen minimum değerse 2022 yaz mevsiminde (2.15 $\mu g/m^3$) kaydedilmiştir.

Tablo 6. Trafik hava kalitesi izleme istasyonuna ait mevsimsel $PM_{2.5}$ konsantrasyon verileri

Trafik				
$PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	Min	Ort	Max	Standart Sapma
2020				
Sonbahar	3.08	22.11	72.43	15.90
Kış	4.01	27.89	68.23	15.07
İlkbahar	3.23	24.59	62.48	15.60
Yaz	2.25	7.71	16.39	3.28
2021				
Sonbahar	3.20	22.69	68.38	14.49
Kış	9.42	43.13	95.14	20.32
İlkbahar	5.07	19.87	52.57	10.45
Yaz	3.51	10.85	21.89	3.85
2022				
Sonbahar	6.76	19.92	56.72	10.75
Kış	5.23	31.00	64.05	14.70
İlkbahar	4.75	17.30	49.70	8.96
Yaz	2.15	8.85	24.96	4.14

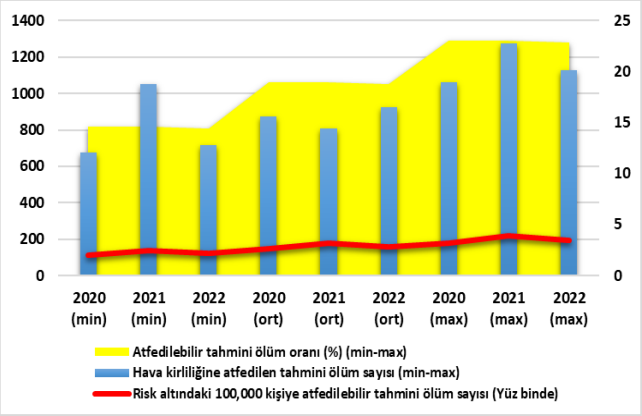
İlgili veriler AirQ+ programında analiz edilmiştir. Kaba ölüm oranı ve $PM_{2.5}$ kirletici konsantrasyon değerleri kullanılarak (i) hava kirliliğine atfedilen tahmini ölüm sayısı, (ii) atfedilebilir tahmini ölüm oranı (%) ve (iii) risk altındaki 100.000 kişiye atfedilebilir tahmini ölüm sayısı (yüz binde) ölçütlerine/sonuçlarına ulaşılmaya çalışılmıştır. İlgili sonuçlara Tablo 7'de yer verilmiştir.

Tablo 7. AirQ+ değerlendirme sonuçları

	2020	2021	2022
Hava kirliliğine atfedilen tahmini ölüm sayısı (min-max)	874 (674-1063)	810 (1050-1277)	927 (715-1128)
Atfedilebilir tahmini ölüm oranı (%) (min-max)	18.95 (14.62-23.06)	18.94 (14.61-23.05)	18.75 (14.46-22.82)
Risk altındaki 100,000 kişiye atfedilebilir tahmini ölüm sayısı (Yüz binde)	147.80 (114.03-179.85)	178.02 (137.35-216.63)	157.48 (121.46-191.68)

Tablo 7'de yer alan verilen grafiksel özeti Şekil 3'te verilmiştir. Bu bağlamda, $PM_{2.5}$ ile ilintili hava kirliliğine bağlı atfedilebilir tahmini ölüm oranının, COVID-19 salgın dönemi olarak hafızalara kazınmış olan, 2020 yılında minimum, ortalama ve maksimum değerlerde pik yaptığı belirlenmiştir. Ancak diğer kıstaslarda ilgili dönemin

ortalama değerlere sahip olması salgın kısıtlamalarının etkisi olarak yorumlanmıştır. Nitekim kaba ölüm oranının ‰7.8 olduğu 2020 yılında (bknz. Tablo 2) atfedilebilir tahmini ölüm oranının pik yapması olağanüstü bir durumun kanıtı niteliğindedir. Hava kirliliğine atfedilen tahmini ölüm sayısı kapsamında 2022 yılının ön plana çıktığı, salgının etkilerinin devam ettiği 2021 yılında ise risk altındaki 100,000 kişiye atfedilebilir tahmini ölüm sayısı kategorisinde maksimum değere ulaşıldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3. AirQ+ değerlendirme sonuçları – grafiksel karşılaştırma

Türkiye'de gerçekleştirilen benzer çalışmalarda (i) hava kirliliğine atfedilen tahmini ölüm sayısı, (ii) atfedilebilir tahmini ölüm oranı (%) ve (iii) risk altındaki 100.000 kişiye atfedilebilir tahmini ölüm sayısı (yüz binde) ölçütlerine ait değerler sırasıyla Düzce ili için 2019 yılında (i) 725 (547-902), (ii) 30,29 (22.86-37.72), (iii) 184.76 olarak 2020 yılı içinse (i) 706 (526-885), (ii) 29.24 (21.81-36.65), (iii) 178.34 olarak belirtilmiştir [19]. Konya ili için yapılan NO_2 kirliliği kaynaklı çalışmada 2019 yılı için (i) 1041 (501-1565), (ii) 46,64 (22.43-70.12), (iii) 9.5 (4.57-14.28) değerlerinin bulunduğu belirtilmiştir [17]. Tekirdağ odaklı çalışmada [20], AirQ+ aracılığıyla hava kirliliğine atfedilen ölüm sayısı hesaplanmıştır. AirQ+ sonuçlarına göre, ölümlerin %25.2'si hava kirliliğinden kaynaklanmaktadır ve 100.000 ölümden 415'inin hava kirliliğine atfedilebilir olduğu tespit edilmiştir. Türkiye geneli için, farklı kategoriler baz alınarak (akciğer kanseri ve kronik obstrüktif akciğer hastalığı (KOAH)), yapılan çalışmada [32], 2019 yılında Türkiye'de $PM_{2.5}$'e atfedilen akciğer kanseri ve KOAH ölüm oranlarının hesaplanması amaçlanmıştır. Türkiye'de 2019 yılı için $PM_{2,5}$ yıllık ortalama değeri 28.82 µg/m^3 olarak hesaplanmıştır. Bu değer Zonguldak ili ortalamalarından (2020, 2021 ve 2022 için sırasıyla 24.52, 24.50 ve 24.10 µg/m^3) yüksektir. Yapılan çalışma sonucunda, Konya ve Düzce için yapılan çalışma sonuçları ile karşılaştırıldığında; Zonguldak ili için (i), (ii) ve (iii) no'lu faktörlerin Düzce ve Konya'dan daha yüksek olduğu ve bu durumun diğer iki kente kıyasla daha fazla sağlık etkisi yarattığı belirlenmiştir.

Dünya'da gerçekleştirilen çalışmalar ise ağırlıklı olarak Ortadoğu ve Uzakdoğu coğrafyasını ele almaktadır. Malakootian ve Mohammadi yaptıkları çalışmada [14], $PM_{2,5}$, NO_2 ve O_3 parametrelerinin kısa ve uzun vadeli etkilerini değerlendirmişlerdir. Uzun vadeli sağlık etki değerlendirmesinde, $PM_{2,5}$'in neden olduğu doğal ölüm için en yüksek atfedilebilir oran 2016'da %15.24 ve 2017'de %15.15 olduğu bulunmuştur. Asgari ve diğerleri [15], Sanandaj (İran) şehrinde 2018-2019 yıllarında AirQ+ yazılımı ile $PM_{2.5}$ ile ilişkili ölüm vakalarını araştırmıştır. $PM_{2.5}$'in uzun vadeli maruziyetin (6 aydan fazla) ortalama 326 ölüme neden olduğu tespit edilmiştir. Sarkhosh ve diğerleri [16], Meşhed'de (İran) $PM_{2.5}$ odaklı çalışmalarında atfedilen toplam ölüm oranının yaklaşık 1069 vaka olduğunu ve bunun Meşhed'deki toplam ölümlerin yaklaşık %9.5'ine denk geldiği bildirmişlerdir. İlgili çalışmalarla yapılan kıyaslamalarda sadece Meshed (İran) odaklı yapılan çalışmanın Zonguldak iline kıyasla daha fazla vaka ve ölüm oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

4 Sonuçlar

Çalışmanın sonucu olarak, ele alınan zaman aralığı COVID-19 pandemi önlemlerinin uygulandığı zamanı kapsadığından ve önlemler doğrultusunda (i) mobilitenin azalması, (ii) endüstriyel kurum ve kuruluşlarda vardiyalı sisteme geçilmesi, (iii) sokağa çıkma kısıtlamalarının uygulanması, (iv) maske-mesafe-hijyen kuralları ve (v) taşıt emisyonlarının azalması nedeniyle var olan durumundan daha iyi bir sonuç elde edildiği ön görülmektedir. Buna rağmen (i) hava kalitesini artıracak ve hava kirliliğini azaltacak önlemlerin alınması, (ii) $PM_{2.5}$ ölçüm yüzdelerinin özellikle çalışma kapsamında değerlendirmeye alınmayan dört adet istasyonda artırılması, (iii) kömür madenlerindeki çalışma koşullarının iyileştirilmesi, (iv) ekipman ve donanım eksikliklerinin giderilmesi veya verimliliği yüksek koruyucu ekipman kullanım önceliğinin getirilmesi, (v) maruziyet riskini azaltmak amacıyla çalışma saatlerinin minimize edilmesi, (vi) karbon ayak izinin düşürülmesi, fosil yakıtın halk ve çevre sağlığı üzerindeki etkilerinin azaltılması amacıyla yenilenebilir enerjinin tercih edilmesi önerilmektedir.

Çalışmada, kaza sonucu olmayan 25+ yaş yetişkinlerdeki mortalite durumu özetlenmiştir. Çalışmada öne çıkan taraflar olduğu gibi eksik yönler de bulunmaktadır. Bunlar; (i) çalışmanın sadece belirli bir bölgeyi temsil eden 4 hava kalitesi izleme istasyonu verilerini değerlendirmesi ve (ii) 25+ yaş yetişkinler üzerinde hava kirliliği mortalite ilişkisinin incelenmesi. Bu 2 koşul Zonguldak ilindeki hava kirliliğine bağlı ölümlerin bir kısmını temsil etmektedir. Özellikle erken doğum, küçük yaşlarda gelişen üst solunum yoluna bağlı hastalık ve/ya ölümler gibi çıktılara çalışmada yer verilmediğinden ölüm sayı ve oranları düşük gibi gözükmektedir. Ancak bu sayıların sadece kaza sonucu olmayan 25+ yaş yetişkinlerdeki mortalite durumunu yansıttığı ve aslında kıstaslara göre önemli derecede ölüme yol açtığı ve/ya potansiyeli olduğunu belirtmek gerekir. Özellikle kömür işletmeleri, madenleri ve termik santrallerinin bulunduğu ilde gerekli altyapı ve önleme sistemleri yatırımları yapılmadığı veya geciktirildiği takdirde atmosfere salınan kirleticilerin başta insanlar olmak üzere canlı ve cansız varlıklar açısından tehlike arz ettiği unutulmamalıdır. Ek olarak, taslak halindeki "Dış Ortam Hava Kalitesi Yönetimi Yönetmeliği" kapsamında 2029 yılı

için $PM_{2,5}$ özelinde hedeflenen limit değer - güncellenen DSÖ limit değerinin (5 µg/m^3) - 5 katıdır. Bu kapsamda yönetmelik hedeflerinin çevre ve halk sağlığı açısından yeniden değerlendirilmesi ve DSÖ tarafından önerilen limit değerlere indirgenmesi önerilmektedir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %15

Kaynaklar

[1] WHO. Air Quality&Health Quıestions and Answers. https://www.who.int/phe/air_quality_q&a.pdf, Access ed 13 September 2023.

[2] GBD 2015 Risk Factors Collaborators. 2016. Global, regional, and national comparative risk assessment of 79 behavioural, environmental, and occupational, and metabolic risks or clusters of risks, 1990–2015: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015. Lancet, 388:1659–1724, 2016. PMID: 27733284, doi: 10.1016/S0140-6736(16)31679-8

[3] WHO. Air pollution. https://www.who.int/healthtopics/air-pollution#tab=tab_1, Accessed 13 September 2023.

[4] I. Anderson, Air pollution and mortality: a history. Atmospheric Environment. 43:1:142-152, 2009. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.026

[5] S. Khomenko, M. Cirach, E. P. Barboza, N. Mueller, J. B. Gômez, D. R. Rueda, et al., Premature mortality due to air pollution in European cities: a health impact assessment. The Lancet Planetary Health. 5:3:121134, 2021. https://doi.org/10.1016/S2542-5196 (20)30272

[6] S. Chew, N. Kolosowska, L. Saveleva, T. Malm, K. M. Kanninen, Impairment of mitochondrial function by particulate matter: Implications for the brain. Neurochemistry International, 135: 104694, 2020. https://doi.org/10.1016/j.neuint.2020.104694

[7] K. P. Rai, Impacts of particulate matter pollution on plants: Implications for environmental biomonitoring. Ecotoxicology and Environmental Safety, 129: 120–136, 2016. doi: 10.1016/j.ecoenv.2016.03.012

[8] T. Sarver, A. Al-Qaraghuli, L. L. Kazmerski, A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 22: 698–733, 2013. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.065

[9] R. Popek, A. Przybysz, H. Gawronska, K. Klamkowski, S. W. Gawronski, Impact of particulate matter accumulation on the photosynthetic apparatus of roadside woody plants growing in the urban conditions. Ecotoxicology and Environmental Safety, Volume 163, Pages 56-62, 2018. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.07.051

[10] H. K. Kim, E. Kabir, S. Kabir, A review on the human health impact of airborne particulate matter. Environment International, 74: 136–143, 2015. 10.1016/j.envint.2014.10.005

[11] S. Heft-Neal, J. Burney, E. Bendavid, et al. Robust relationship between air quality and infant mortality in Africa. Nature 559, 254–258 2018. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0263-3

[12] O. Raaschou-Nielsen, E. Thorsteinson, S. Antonsen, G.J. Holst, T. Sigsgaard, C. Geels, L. M. Frohn, J. H. Christensen, J. Brandt, C. B. Pedersen, U. A. Hvidtfeldt, Long-term exposure to air pollution and mortality in the Danish population a nationwide study. E Clinical Medicine. 2020 Nov 1; 28:100605. doi: 10.1016/j.eclinm.2020.100605.

[13] D.J. Naghan, A. Neisi, G. Goudarzi, M. Dastoorpoor, A. Fadaei, K.A. Angali. Estimation of the effects $PM_{2.5}$, NO_2, O_3 pollutants on the health of Shahrekord residents based on AirQ+ software during (2012–2018). Toxicology Reports, 9, pp., 842-847, 2022. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2022.03.045

[14] M. Malakootian, A. Mohammadi. Estimating health impact of exposure to PM2.5, NO2 And O3 using Airq+ model in Kerman, Iran, Environmental Engineering and Management Journal 19, 8, 1317-1323, 2020

[15] G. Asgari, R. Khoshniyat, F. Karimi, K. Ebrahimi, K. Habibzadeh, S. Rahimnejad. Assessment of health ımpacts of $pm_{2.5}$ by airq+ software in the city of Sanandaj, Iran (2018-2019). Journal of Advances in Environmental Health Research, 9(1), 45-56, 2021. doi: 10.32598/JAEHR.9.1.1200

[16] M. Sarkhosh, M. Hadei, S. Nourbakhsh, H. Alidadi, M. Pazira, G.R. Farahzad. Estimation of mortality attributed to PM2.5 in Mashhad using AirQ+ modeling in 2019. Journal of Research in Environmental Health, *7*(4), 354-363, 2022. doi: 10.22038/jreh.2022.63270.1479

[17] E. N. Yıldırım-Öztürk, M. Uyar, M. Öztürk, Konya ilinde 2016-2019 yılları arasında NO_2 kaynaklı hava kirliliğinin mortaliteye etkisinin AirQ+ yazılımı aracılığıyla değerlendirilmesi, Bozok Tıp Derg 2022;12(1):11-16.

[18] E. Filiz. Investigation of the effect of long-term exposure to outdoor air pollution on deaths in Konya with AirQ+ software." Kent Akademisi (Online), 16, ss.905 - 912, 2023. doi: 10.35674/kent.1239880

[19] A. S. Mayda, D. Karkaç, Düzce'de hava kirliliğinin mortalite üzerine etkisi, Sakarya Tıp Dergisi 2021;11(4):829-835, doi: 10.31832/smj.933475

[20] G. Varol, B. Tokuç, S. Ozkaya, et al. Air quality and preventable deaths in Tekirdağ, Turkey. Air Qual Atmos Health 14, 843–853 2021. https://doi.org/10.1007/s11869-021-00983-2

[21] WHO, Indicator 3.9.1: Mortality rate attributed to household and ambient air pollution (per 100 000 population), https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO/ambient-and-household-air-pollution-attributable-death-rate-(per-100-000-population) Accessed 27 September 2023

[22] Zonguldak Valiliği, Coğrafya. http://www.zonguldak.gov.tr/cografya, Erişim Tarihi 15 Eylül 2023.

[23] L. Derin, N. Varol, & S. Uymaz, Türkiye'deki kömür madeni kazalarına ilişkin değerlendirme. Resilience, 1(1), 47-53, 2017. doi: 10.32569/resilience.363674
[24] M. Vallius, Characteristics and sources of fine particulate matter in urban air, University of Kuopio Department of Environmental Sciences National Public Health Institute, Finland,2005.
[25] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Sürekli İzleme Merkezi – Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı http://www.havaizleme.gov.tr/, Erişim Tarihi 30 Kasım 2023.
[26] H. Şahbaz. Deaths in Turkey in the period 2009-2019 from a geographical perspective. Eastern Geographical Review, 28(49), 63-73, 2023. doi: 10.5152/EGJ.2023.22014
[27] Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), Ölüm ve Ölüm Nedeni İstatistikleri, 2022, Erişim Tarihi 12 Ağustos 2023. https://data.tuik.gov.tr/.
[28] WHO Regional Office for Europe. AirQ+: Software tool for health risk assessment of air pollution. https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/activities/airq-software-tool-for-health-risk-assessment-of-air-pollution, Accessed 19 August 2023.
[29] A. Kumar and R.K. Mishra. Air pollution health risk based on AirQ+ software tool. Int J Appl Res Technol 2(3):190–199. 2017 DOI: https://doi.org./10.24163/ijart/2017 /2
[30] Aphekom. Guidelines for assessing the health impacts of air pollution in European cities. Work Package 5. French Institute for Public Health Surveillance, Saint-Maurice, France. 2011.
[31] J.J. Robert, I.U. Chiemeka, T.C. Chineke, Health impact assessments of particulate matter pollution from construction sites in Port Harcourt and Owerri Metropolises, Nigeria. *Air Qual Atmos Health*, **16**, 873–879, 2023. https://doi.org/10.1007/s11869-023-01309-0
[32] D. H. Yekdaş, A.C. Yekdaş, Ü. Çelikkalp, P. S. Serin, M. Çağlayan, G. Eluklu. Chronic obstructive pulmonary disease and lung cancer mortality attributed to air pollution in Türkiye in 2019. Aerosol and Air Quality Research, 23(10), 2023. doi: 10.4209/aaqr.230144

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 309-317

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Geçici kenar koruma sistemleri kullanımının inşaat proje maliyetine etkisi

Impact of the use of temporary edge protection systems on construction project cost

Reşat Akyüz[1], Hakan Kuşan[2,*], Osman Aytekin[3]

[1,2,3] *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26480, Eskişehir, Türkiye*

Öz

Türkiye'de iş kazalarına ilişkin istatistiki veriler incelendiğinde, iş kazaları sonucu meydana gelen ölüm, meslek hastalığı ve sürekli iş göremezlik sayılarında artış olduğu görülmektedir. Tüm sektörler arasında inşaat sektörü, iş kazası sayısı ve ağır sonuçları bakımından diğer sektörlere kıyasla ilk sırada yer almaktadır. Bu çalışmada, İşyeri Tehlike Sınıfları Listesinde NACE kodlarında yer alan 3 başlık altında faaliyet gösteren inşaat sektöründeki işyerlerinde 2020 ve 2021 yıllarında meydana gelen iş kazalarına ilişkin veriler Sosyal Güvenlik Kurumu Hizmet Sunumu Genel Müdürlüğü'nden temin edilerek analiz edilmiştir. İş kazaları sonucu Sosyal Güvenlik Kurumu'na yapılan bildirimler sınıflandırılarak iş kazalarının nedenleri tespit edilmiş ve en çok ölümlü iş kazasının yüksekten düşme nedeniyle gerçekleştiği belirlenmiştir. İnşaat sektöründe ölümlü iş kazalarının en önemli nedeni olan yüksekten düşme kaynaklı iş kazalarının önlenmesi için standartlara uygun geçici kenar koruma sistemlerinin kullanımı ve proje maliyetine etkisi araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: İş güvenliği, İnşaat sektörü, İş kazası, Geçici kenar koruma sistemleri, İnşaat maliyeti

Abstract

When the statistical data on occupational accidents in Turkey are analyzed, it is seen that there is an increase in the number of deaths, occupational diseases and permanent incapacity to work as a result of occupational accidents. Among all sectors, the construction sector ranks first compared to other sectors in terms of the number of occupational accidents and severe consequences. In this study, data on occupational accidents that occurred in 2020 and 2021 in workplaces in the construction sector operating under 3 headings in the NACE codes in the Workplace Hazard Classes List were obtained from the General Directorate of Service Delivery of the Social Security Institution and analyzed. The causes of occupational accidents were determined by classifying the notifications made to the Social Security Institution as a result of occupational accidents, and it was determined that the most fatal occupational accidents occurred due to falling from height. In order to prevent occupational accidents caused by falling from height, which is the most important cause of fatal occupational accidents in the construction sector, the use of temporary edge protection systems in accordance with the standards and their effect on the project cost were investigated.

Keywords: Occupational safety, Construction sector, Work accidents, Temporary edge protection systems, Construction cost

1 Giriş

Dünyada ve ülkemizde her yıl iş kazası sonucu binlerce kişi ölümle sonuçlanacak şekilde iş kazası geçirmektedir. Gelişen teknoloji ve yapılan üretim şekillerindeki iyileşmeler sonucu bazı sektörlerde (imalat sektörü vb.) ölümlü iş kazası sayılarında azalmalar görülmektedir. Yapım işi ve inşaat sektöründe meydana gelen gelişmelere rağmen ölümlü iş kazası sayılarında istenilen iyileşme sağlanamamıştır.

Türkiye'de inşaat sektörü, doğrudan ve dolaylı olarak inşaat faaliyetinde bulunan birçok işletmenin yer aldığı ve ekonomide lokomotif olarak nitelendirilen bir sektör olarak görülmektedir. Ayrıca yarattığı doğrudan istihdam açısından da yaklaşık 2 milyonun üzerinde çalışanın yer aldığı inşaat sektörü [1], dolaylı olarak desteklediği 200'ün üzerindeki yan sektörle birlikte bu sayının çok daha üzerindeki çalışanı bünyesinde barındırmaktadır [2].

Ülkemizde geçmiş yıllarda meydana gelen ölümlü iş kazaları incelendiğinde yaklaşık %35'inin inşaat sektöründe meydana geldiği görülmektedir. [3-7]. Gelişmiş ülkelerdeki inşaat sektöründe de ölümlü iş kazası oranları benzerlik göstermektedir. Örneğin, ABD'de meydana gelen ölümlü iş kazalarının %21.4'lük kısmının inşaat sektöründe meydana geldiği, bu kazaların başlıca nedenleri arasında %38'lik bir oran ile yüksekten düşmenin birinci sırada yer aldığı belirtilmektedir. Benzer şekilde Birleşik Krallık'taki işçi ölümlerinin yaklaşık %31'i inşaat sektöründe meydana geldiği ve bu kazaların oluş sebepleri arasında yüksekten düşmelerin %20'lik oranla ana neden olduğu belirtilmektedir.[8]

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hkusan@ogu.edu.tr (H. Kuşan)
Geliş / Recieved: 14.11.2023 Kabul / Accepted: 08.12.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngmuh.1390790

İnşaat sektörünün kendine has yapım teknikleri ve yapım aşamasının sürekli değişken ortama sahip olmasından dolayı iş kazaları meydana gelmektedir. Gelişmiş ülkelerdeki inşaat çalışanları diğer sektörlerde çalışanlara oranla 3 – 4 kat daha fazla kazaya uğrama riski taşımakta, Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO) verilerine göre ise bu oran gelişmekte olan ülkelerde 6 kata kadar çıkmaktadır [3,9]. İş kazalarının çalışanlar üzerinde yaralanma, sürekli iş göremezlik, ölüm gibi yaratacağı sonuçların yanında ekonomik olarak yaratacağı etkiler göz ardı edilemeyecek boyuttadır. ILO'ya göre; iş kazaları ve meslek hastalıkları sonucu ortaya çıkan ekonomik kayıpların gelişmekte olan ülkelerin gayri safi milli hasılaya oranının % 4'ü bulduğu belirtilmektedir. [10-11]

Literatürde inşaat sektöründe iş kazalarının ele alındığı birçok çalışma olduğu görülmektedir. Çavuş ve Taçgın [6] tarafından inşaat sektöründe gerçekleşen iş kazalarının nedenleri incelenmiş, kazalar çeşitli başlıklar altında sınıflandırarak iş kazası ve ölüm oranları tespit edilmiştir. Baradan [12] tarafından Türkiye'deki inşaat sektöründe iş güvenliğinin yeri ve gelişmiş ülkelerle mukayesesi üzerine yapılan çalışmada, gelişmiş ülkelerden, özellikle ABD ile ülkemiz kıyaslandığında, ülkemizde bu konuda ileriye dönük doğru adımların atıldığı belirtilmiştir. Ayrıca iş sağlığı ve güvenliği açısından bakıldığında ülkemizde son yıllarda göze çarpan derecede iyileşmelerin görüldüğü belirtilmektedir. Yılmaz ve Tan'ın [13] çalışmasında inşaat şantiyelerinde meydana gelen iş kazalarının ortaya çıkardığı maliyet ve iş sağlığı güvenliği önlemleri için yapılacak yatırımların maliyeti üzerinde durulmuştur. Akçay [14] çalışmasında inşaat sektöründeki iş kazaları ve ortaya çıkarttığı maliyeti üzerine incelemeler yapmıştır. Benzer şekilde Yeşilniğdeli [15] tarafından yapılan çalışmada ise inşaat sektöründe meydana gelen iş kazalarının maliyeti üzerinde durulmuştur. İş kazaları sonucunda insanın maddi ve manevi olarak yaşadığı zararların büyüklüğünden söz edilmiş olup hem çalışanların hem de işverenlerin aynı düzeyde olmasa da yeterince derin etkilendiği ifade edilmiştir. Akboğa ve Baradan [16] tarafından inşaat sektöründeki ölümlü iş kazalarının nedenleri üzerine bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada yüksekten düşmeye bağlı ölümlü iş kazalarının en yüksek orana sahip olduğu belirtilmektedir. Kaplan'ın [17] çalışmasında, inşaat sektöründe işyeri büyüklüklerine göre çalışan sayısı, işyeri sayısı ve iş kazaları arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen bulgulara göre iş sağlığı ve güvenliği politikalarının geliştirilmesi için öneriler sunmuştur. Özcan vd. [18] tarafından yapılan çalışmada ise inşaat sektöründeki iş kazalarına neden olan faktörler çok kriterli karar verme metodu ile değerlendirilmiştir. Razgratlı [19] inşaat sektöründe meydana gelen iş kazalarının psikolojik açıdan değerlendirilmesi üzerine yaptığı çalışmada, iş kazaları sonucunda sadece iş yerinin değil toplumunda bu durumdan etkileneceği ifade edilmiş, iş yerlerinde iş sağlığının sağlanması ile maddi getirilerin yanında manevi açıdan da fayda sağlayacağı belirtilmiştir. Choi vd. [20] tarafından inşaat sektöründeki ölümlü iş kazası sebeplerinin ülkelere özgü benzerliklerini ve farklılıklarını anlamak için yapılan çalışmada, ABD, Güney Kore ve Çin'de 2011-2015 yılları arasındaki ölümcül mesleki yaralanma verileri analiz edilmiş ve her üç ülkedeki inşaat sektöründe en yaygın kaza türünün yüksekten düşme olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Liy vd. [21] Malezya'da yaptıkları çalışmada şantiyelerde meydana gelen yüksekten düşme kaynaklı kazaların sebepleri araştırılmış ve işyeri denetiminin şantiyede düşme tehlikelerini azaltmada en etkili yöntem olduğu belirlenmiştir. Nadhim vd. [22] yüksekten düşme kazaları konusunda literatür incelemesi yaptıkları çalışmada, kazalara neden olan yaygın faktörleri belirlemişler ve bu faktörlerin sebep olabileceği kazaların azaltılması için özellikle şantiyedeki yüksekten düşmeyi önleme yöntemlerinin iyileştirilmesine önem verilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Halabi vd. [23], ABD inşaat sektöründe 2000-2020 yılları arasında meydana gelen yüksekten düşme kaynaklı iş kazalarının önde gelen sebeplerini araştırdıkları çalışmalarında, düşmeye karşı korumanın kullanımında önemli bir gelişme sağlanamadığı sonucuna ulaşmışlardır. Çalışmanın sonucunda yüksekte çalışmalar için risk değerlendirme ve güvenlik tedbirlerine yardımcı olabilecek bir tahmin modeli oluşturulmuştur.

Yapım işlerinin başlangıç aşaması olan kazı işinden bitiş aşaması olan çevre düzenlemesi işine kadar geçen süreçte çalışanlar en çok yüksekten düşme sonucu iş kazası geçirmektedir. Yüksekten düşme sonucu meydana gelen iş kazalarını önlemek için öncelikle toplu korunma tedbirleri alınmalı bu tedbirlerin alınamadığı yerlerde kişisel korunma yöntemleri tercih edilmelidir.

Ülkemizdeki uygulanan kanun ve yönetmeliklerde yüksekten düşmeyi önlemek için alınması gerekli önlemler Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği'nde [24] belirtilmiştir. Yüksekten düşmeyi önlemek için alınması gereken tedbirlerin başında TS EN 13374 standartlarına uygun olan geçici kenar koruma sistemleri (GKKS) gelmektedir. İnşaat sektöründe geçici kenar koruma sistemlerinin maliyetinden dolayı sektörde bulunan işverenler tarafından çok fazla tercih edilmediği görülmektedir.

Ülkemizde iş kazalarına ilişkin en kapsamlı veriler Sosyal Güvenlik Kurumu tarafından tutulmaktadır. Bu çalışmada öncelikle Sosyal Güvenlik Kurumu Hizmet Sunumu Genel Müdürlüğü'nden [25] 18.08.2022 tarih ve E-10124169-708.01-50632491 sayılı veri talep yazısı eki olarak alınan ve İş Sağlığı ve Güvenliğine İlişkin İşyeri Tehlike Sınıfları Tebliği ekinde İşyeri Tehlike Sınıfları Listesi'nde yer alan 41, 42 ve 43 NACE (Nomenclature des Activités Économiques dans la Communauté Européenne) (Avrupa Topluluğunda Ekonomik Faaliyetlerin Sınıflandırılması) kodlarında faaliyet gösteren inşaat sektöründeki işyerlerinde 2020 ve 2021 yıllarında meydana gelen iş kazalarına ilişkin veriler üzerinde çalışılmıştır. Ölümle sonuçlanan iş kazalarının meydana gelme sebepleri araştırılmış ve bu iki yılda en fazla ölümlü iş kazalarının yüksekten düşme sonucu olduğu tespit edilmiştir.

Kamu İhale Kurumunun sitesi Elektronik Kamu Alımları Platformu (EKAP) üzerinden alınan, Eskişehir İli Odunpazarı İlçesinde 8 Derslikli Anaokulu yapım işi projesi örnek seçilerek, yüksekten düşmelerin önlenebilmesi için standartlara uygun GKKS kullanıldığında, bu koruma sisteminin getirdiği ek maliyet hesaplanmıştır. Proje yaklaşık

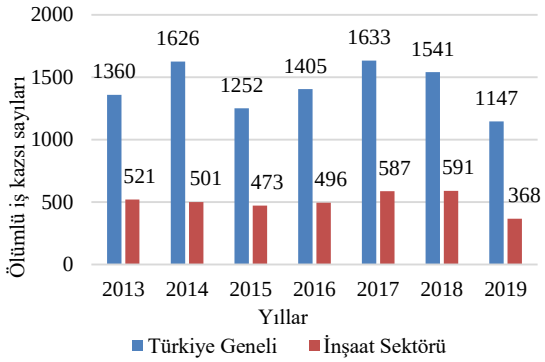
maliyeti ile karşılaştırılması yapılarak proje maliyetine etkisi hesaplanmış ve karşılaştırması yapılmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 *2020 - 2021 yıllarında inşaat sektöründe meydana gelen iş kazalarının incelenmesi*

İş sağlığı ve güvenliği kavramı; çalışanın, işyerinde veya işyeri dışında işveren kontrolünde gerçekleşen çalışmalarda; meydana gelebilecek herhangi bir tehlikeye karşı (fiziki, kimyasal, sosyal, ruhen ve bedenen vb.) işveren ile bu alanda çalışan iş güvenliği uzmanı, işyeri hekimi ve diğer sağlık personeli gibi görevliler tarafından alınan önlemlerinin tamamı olarak açıklanabilir [26].

Çok tehlikeli sınıfta yer alan inşaat sektöründe meydana gelen iş kazalarının sayısının ve özellikle ölümle sonuçlanan iş kazalarının sayısının çok olması, bu sektörde iş sağlığı ve güvenliği kavramının tam olarak anlaşılması ve uygulanması açısından büyük önem taşımaktadır. 2013-2019 yılları arasında Türkiye genelindeki ve inşaat sektöründeki toplam ölümlü iş kazalarına ilişkin veriler Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. 2013-2019 yıllarında Türkiye geneli ve inşaat sektöründe meydana gelen toplam ölümlü iş kazalarına ait veriler [7]

Şekil 1'deki veriler incelendiğinde 2013-2019 yılları arasındaki toplam ölümlü iş kazası sayıları içerisinde inşaat sektöründeki ölümlü iş kazası sayılarının yüzde olarak oranları sırasıyla %38.3- %30.8 - %37.8 - %35.3 - %35.9 - %38.3 - %32 olarak hesaplanmıştır. Bu verilerden yola çıkarak yaklaşık olarak Türkiye'de meydana gelen her üç ölümlü iş kazasından birinin inşaat sektöründe meydana geldiği anlaşılmaktadır.

Sosyal Güvenlik Kurumu Hizmet Sunumu Genel Müdürlüğü'nden 18.08.2022 tarih ve E-10124169-708.01-50632491 sayılı veri talep yazısı eki olarak [25] alınan ve İşyeri Tehlike Sınıfları Listesi'nde yer alan 41, 42 ve 43 NACE kodlarında faaliyet gösteren inşaat sektöründeki işyerlerinde 2020 ve 2021 yıllarında meydana gelen iş kazalarına ilişkin veriler incelenmiştir. İş kazası sonucu kuruma yapılan kaza bildirimleri irdelenerek iş kazalarının NACE kodlarına göre sonuçları sınıflandırılmıştır (Tablo 1).

Tablo 1'deki 2020 yılına ait veriler incelendiğinde, inşaat sektöründe meydana gelen ölüm veya yaralanma ile sonuçlanan 43615 iş kazası olmuştur. Bu kazaların 252 tanesi ölümlü ve 43363 tanesi yaralanmalı olarak meydana gelmiştir. Yaralanmalı iş kazalarının en fazla 18776 kişinin yaralandığı yaklaşık olarak %43 oranında 41 NACE kodlu bina inşaatında meydana geldiği görülmektedir. 13047 kişinin yaralandığı yaklaşık olarak %30 oranında 42 NACE kodlu bina dışı yapıların inşaatında ve 11540 kişinin yaralandığı yaklaşık olarak %27 oranında 43 NACE kodlu özel inşaat faaliyetleri alanında olduğu görülmektedir. Yine aynı verilere göre 2020 yılında inşaat sektöründe meydana gelen ölümlü iş kazaları incelendiğinde ise yaklaşık %47 oranında 41 NACE kodlu bina inşaatında 119 çalışanın vefat ettiği görülmektedir. Yine aynı yıl yaklaşık %30 oranında 42 NACE kodlu bina dışı yapıların inşaatında 75 kişinin vefat ettiği, yaklaşık %23 oranında 43 NACE kodlu özel inşaat faaliyetleri alanında 58 kişinin vefat ettiği görülmektedir.

2021 yılındaki veriler incelendiğinde ise inşaat sektöründe meydana gelen ölümlü ve yaralanma ile sonuçlanan 57097 iş kazası olmuştur. Bu kazaların 246 tanesi ölümlü ve 56851 tanesi yaralanma olarak meydana gelmiştir. Yaralanma ile sonuçlanan iş kazaları incelendiğinde, en fazla 27056 kişinin yaralandığı yaklaşık olarak %48 oranında 41 NACE kodlu bina inşaatında meydana geldiği görülmektedir. 16218 kişinin yaralandığı yaklaşık olarak %28 oranında 42 NACE kodlu bina dışı yapıların inşaatında ve 13577 kişinin yaralandığı yaklaşık olarak %24 oranında 43 NACE kodlu özel inşaat faaliyetleri alanında olduğu görülmektedir. 2021 yılında inşaat sektöründe meydana gelen ölümlü iş kazaları incelendiğinde ise en fazla ölümlü iş kazasının yaklaşık %51 oranında 41 NACE kodlu bina inşaatında meydana geldiği ve toplam 126 kişinin vefat ettiği anlaşılmaktadır.

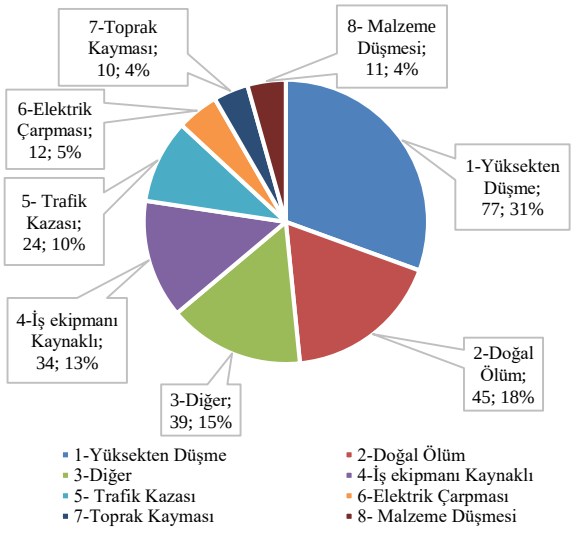
Tablo 1. 2020-2021 yıllarında inşaat sektöründe meydana gelen iş kazalarının dağılımı [25]

Yıl	2020			2021		
İş Kazası Sayısı	Yaralanma ile sonuçlanan	Ölüm ile sonuçlanan	Toplam	Yaralanma ile sonuçlanan	Ölüm ile sonuçlanan	Toplam
NACE 41_Bina inşaatı	18776	119	18895	27056	126	27182
NACE 42_Bina dışı yapıların inşaatı	13047	75	13122	16218	68	16286
NACE 43_Özel inşaat faaliyetleri	11540	58	11598	13577	52	13629
Toplam	43363	252	43615	56851	246	57097

Aynı yıl içerisinde yaklaşık %28 oranında ve 68 kişinin vefat ettiği 42 NACE kodlu bina dışı yapıların inşaatında meydana geldiği görülmüştür. Yaklaşık olarak %21 oranında ve 52 kişinin vefat ettiği 43 NACE kodlu özel inşaat faaliyetleri alanında olduğu görülmektedir. 2020 yılında olduğu gibi bu yılda da en fazla ölümlü iş kazasının 41 NACE kodlu bina inşaatında meydana geldiği görülmektedir.

En fazla ölümlü iş kazalarının 41 NACE kodlu bina inşaatında meydana gelmesinde bu alanda istihdam edilen çalışan sayısının diğer NACE kodlarında istihdam edilen çalışan sayısına göre daha fazla olması bir etken olmaktadır. Ülkemizde inşaat işlerinin büyük bölümünü barınma amaçlı yapılan konutlar oluşturmaktadır. 41 NACE kodlu bina inşaatındaki işyerlerinin tamamı bu alana girmektedir. Bina inşaatlarında genelde küçük alanlarda çalışılması ve yapılan inşaatın çok kısa sürelerde yükseklik kazanmasından dolayı eş zamanlı olarak önlem alınmadığından ciddi yaralanmalı ve ölümlü iş kazası sayısının bu alanda fazla olduğu öngörülmektedir.

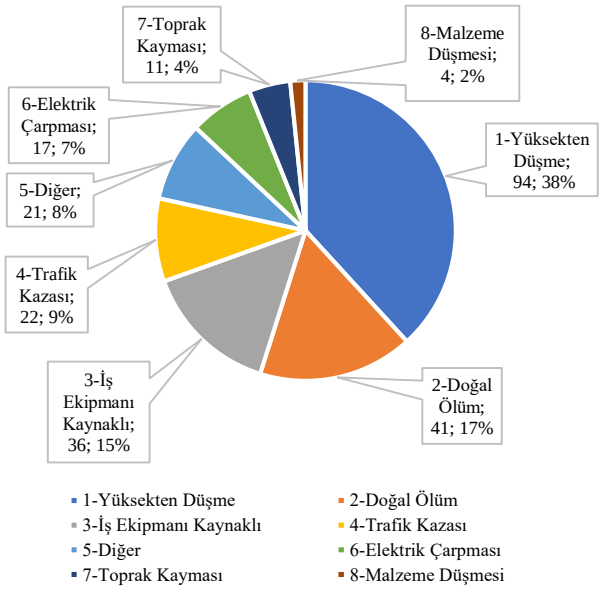
2020-2021 yıllarında meydana gelen ölümlü iş kazalarının nedenlerinin tespit edilebilmesi için bu yıllara ait veriler yapılan bildirimlere göre sınıflandırılmıştır. Buna göre 2020 yılında meydana gelen ölümlü iş kazalarının oluş biçimlerine göre sayıları ve oranları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. 2020 yılında meydana gelen ölümlü iş kazalarının bildirimlere göre sınıflandırılması [25]

Şekil 2'deki verilerde, yüksekten düşmenin en yüksek orana sahip olduğu görülmektedir. 2020 yılında meydana gelen ölümlü iş kazalarında 77 çalışan yüksekten düşerek vefat etmiş olup bu oran yaklaşık %31 olarak göze çarpmaktadır. Yapılan bildirimlere göre ikinci sırada doğal ölüm göze çarpmaktadır. Doğal ölüm olarak değerlendirilen iş kazaları, inşaat alanında kalp krizi geçirerek vefat eden çalışanlar, koğuşta yatarken vefat eden çalışanlar, yemek yerken veya çay içerken fenalaşıp ambulansla hastaneye kaldırıldıktan sonra vefat eden çalışanlardır. En fazla ölüm nedeni kalp krizi olarak kayıtlara geçmiştir. Doğal nedenlerle ölen çalışanlar 2020 yılında 45 kişi olup oranı yaklaşık olarak %18 olarak tespit edilmiştir. Temel başlıklar içerisinde sınıflandırılamayan ölümlü iş kazaları diğer başlığı altında sınıflandırılmıştır. Bu başlık altındaki ölümlerin nedenleri genel olarak terör saldırısı, intihar, patlama, zehirlenme, yangın ve covid 19 olarak görülmüştür. 2020 yılında yaklaşık olarak 39 çalışan bu ve benzeri nedenlerden iş kazası geçirerek vefat etmiş ve oranı da yaklaşık olarak %15 olarak tespit edilmiştir.

2021 yılında meydana gelen ölümlü iş kazalarının oluş biçimlerine göre sayıları ve oranları ise Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 2021 yılında meydana gelen ölümlü iş kazalarının bildirimlere göre sınıflandırılması [25]

Şekil 3'teki verilere göre 2021 yılında meydana gelen ölümlü iş kazaları incelendiğinde 94 çalışan yüksekten düşerek vefat etmiş olup bu oran yaklaşık %38 olarak göze çarpmaktadır. Yapılan bildirimlere göre ikinci sırada yine doğal ölüm göze çarpmaktadır. Doğal ölüm olarak değerlendirilen iş kazası sayısı 41 kişi olup oranı da yaklaşık olarak %17 olarak tespit edilmiştir. Üçüncü sıra ise iş ekipmanı kaynaklı iş kazaları olarak göze çarpmaktadır. İş ekipmanı kaynaklı kazaların genel olarak hareketli iş ekipmanlarının çalışanlara çarpması, manevra sırasında ekipmana sıkışması, kule vinç, gırgır vinç, çalışma platformu gibi ekipmanların kırılarak çalışanların üzerine düşmesi ve beton döküm sırasında beton pompasından veya beton mikserinden kaynaklanan kazalar olduğu görülmektedir. 2021 yılında yaklaşık olarak 36 çalışan bu ve benzeri nedenlerden iş kazası geçirerek vefat etmiş olup oranı da yaklaşık olarak %15 olarak tespit edilmiştir.

2020 ve 2021 yıllarında inşaat sektöründen en fazla ölümlü iş kazalarının yüksekten düşme tipinde meydana geldiği görülmektedir. Yüksekten düşme sonucu meydana gelen iş kazalarında bu ölümlerin nasıl meydana geldiği yine yapılan bildirimler incelenerek alt başlıklara indirgenmiştir.

Buna göre;

1-Kat döşeme kenarlarının çevresinde düşme

2-İskeleden düşme

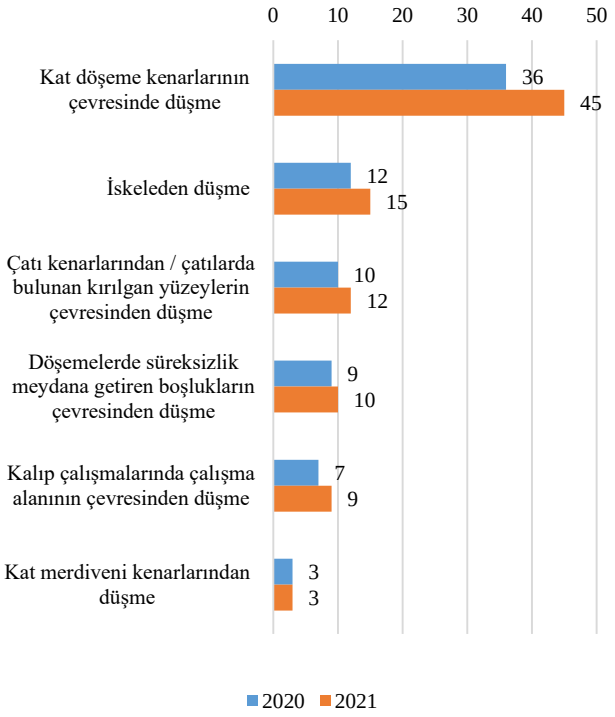
3-Çatı kenarlarından / çatılarda bulunan kırılgan yüzeylerin çevresinden düşme

4- Asansör, merdiven, baca, şaft, aydınlatma boşlukları gibi döşemelerde süreksizlik meydana getiren boşlukların çevresinden düşme

5-Kalıp çalışmalarında çalışma alanının çevresinden düşme

6-Kat merdiveni kenarlarından düşme

olarak altı farklı başlığa ayrılmış ve bu alt tiplerde meydana gelen ölümlü iş kazalarının sayıları Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. 2020-2021 yıllarında yüksekten düşme sonucu meydana gelen ölümlü iş kazalarının sınıflandırılması [25]

Şekil 4'teki veriler incelendiğinde en fazla ölümlü iş kazalarının kat döşeme kenarlarının çevresinden düşme olarak meydana geldiği göze çarpmaktadır. Sosyal Güvenlik Kurumu'na yapılan bildirimlere göre 2020 yılında 36 çalışanın 2021 yılında ise 45 çalışanın kattan düşme sonucu iş kazası geçirerek vefat etmiş olduğu tespit edilmiştir. İkinci olarak en fazla ölümün meydana geldiği durumun çalışanların iskeleden düşerek vefat etmesi sonucu olduğu görülmektedir. 2020 yılında 12 çalışanın 2021 yılında ise 15 çalışanın iskeleden düşme sonucu iş kazası geçirerek vefat etmiş olduğu tespit edilmiştir. Üçüncü sırada, çatı katında yapılan çalışmalarda ya da çatılardaki kırılgan yüzeylere farkında olmadan basılarak yüksekten düşüp ölümle sonuçlanan kazaların olduğu görülmektedir. 2020 yılında 10 çalışan, 2021 yılında ise 12 çalışan bu şekilde iş kazası sonucu vefat etmiştir. En az ölümlü iş kazasının meydana geldiği durum, çalışanların merdiven kenarından ya da merdiven boşluğuna düşmesi sonucu meydana gelen iş kazalarıdır. Bu durumun az olmasının en önemli nedenlerinden biri merdiven kenarlarında çalışma yapılırken çoğu projede merdivenler arası bırakılan boşluğun çok dar olmasından dolayı çalışanların düşmesinin engellenmesi olarak yorumlanabilir.

2.2 Geçici kenar koruma sistemleri ve kulanım şekilleri

TS EN 13374 standardına uygunluk belgesi olan GKKS'ler çoğunlukla yapı ve benzeri işlerde yüksekten düşmeyi önlemek için kullanılmaktadır. Diğer tüm sektörlerde de yüksekten düşme riski olan ve geçici bir durum oluşturan bu risklerin önlenmesinde de kullanılmaktadır. Kısaca geçici süreliğine yüksekten düşme riski olan hangi sektör olursa olsun bu tarz bir risk varsa öncelikli olarak kullanılması gereken ekipmanlar geçici kenar koruma sistemleridir. Geçici kenar koruma sistemleri kullanıldığı yerin açısına ve yüksekliğine göre üç sınıftan ve dokuz tipten oluşmaktadır.

Tablo 2'de yapı ve inşaat alanlarında hangi tip GKKS'nin kullanılması gerektiği ile ilgili bilgiler bulunmaktadır. Örnek olarak herhangi bir yükseklik şartı dikkate alınmadan çalışma yüzeyi ile çalışanın yaptığı açı 10°'den az olduğu durumda A tipi koruma sistemi kullanılmaktadır.

2.3 Geçici kenar koruma sistemleri kullanımının inşaat maliyetine etkisi

İnşaat sektöründe 2020 ve 2021 yıllarına ait veriler incelendiğinde en fazla ölümlü iş kazalarının yüksekten düşme sonucu olduğu belirlenmiştir. İnşaat sektöründe geçmiş yıllardaki iş kazaları incelendiğinde o yıllarda da en fazla ölümlü iş kazalarının yüksekten düşme sonucu meydana geldiği görülmektedir. Yüksekten düşme sonucu meydana gelen ölümlü iş kazaları incelediğinde, geçmiş yıllarda ve bu çalışmada analizi yapılan yıllarda da olduğu gibi, ölümlü kazaların çoğu kat kenarından düşme sonucu ve iskelede yapılan çalışmalarda yüksekten düşme sonucu meydana gelmiştir. Ülkemizde inşaat sektöründe meydana gelen iş kazalarını önlemek için alınması gereken önlemleri düzenleyen en önemli yasal dayanak Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği'dir.

Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği'nde 2020 yılında yapılan düzenleme ile yüksekten düşme riskinin bulunduğu; kat döşeme kenarlarının çevresinde, döşemelerde süreksizlik meydana getiren boşlukların (asansör, merdiven, baca, şaft, aydınlatma boşlukları gibi) çevresinde, yapı elemanları arasında süreksizlik meydana getiren pencere ve benzeri boşluklarda, kat merdiveni kenarlarında, çatı kenarlarında ve özellikle çatılarda bulunan kırılgan yüzeylerin çevresinde, kalıp çalışmalarında (perde, kolon, tabliye imalatı vb.) çalışma alanının çevresinde, seviye farkı bulunan, uygulanabilir diğer çalışma alanlarında standartlara uygun GKKS kullanılması zorunlu hale getirilmiştir. İnşaat sektöründe yüksekten düşme sonucu ölümlü iş kazalarının çoğu standartlara uygun GKKS kullanılarak önlenebilecek niteliktedir.

Tablo 2. Geçici kenar koruma sistemlerinin sınıflandırılması [24]

	Çalışma Yüzeyi ile Yapılan Açıya Göre	Çalışma Yapılan Yükseklik ve Çalışma Yüzeyi ile Yapılan Açıya Göre
A Tipi Koruma Sistemi	10° den az olduğu durumlarda	Yükseklik kısıtlaması yok
B Tipi Koruma Sistemi	30° den az olduğu durumlarda	Yüksekliğinin iki metreden az ve çalışma alanının yüzey ile yaptığı açının 60°'den az olduğu durumda
C Tipi Koruma Sistemi	30° ile 45° arasında olduğu durumlarda	Yüksekliğinin beş metreden az ve çalışma alanının yüzey ile yaptığı açının 45° ile 60° arasında olduğu durumda
Koruma Sistemlerinin Uygulanmadığı Alanlar	60° den fazla olduğu durumlarda	Yüksekliğin beş metreden fazla ve çalışma alanının yüzey ile yaptığı açının 45° den fazla olduğu durumda

Standartlara uygun GKKS fiyatı ile ilgili 2022 yılının son çeyreğinde tedarikçi firmalar ile görüşülerek fiyat araştırması yapılmıştır. Standartlara uygun GKKS'nin 2,50 metre fiyatının 450 TL, 2 adet sabitlemek için kullanılan dikme fiyatının 250 TL ve bu dikmeler için gerekli olan 8 adet dübel fiyatının ise 32 TL olduğu belirlenmiştir. Bu durumda geçici kenar koruma sistemlerinin metre fiyatı 292,80 TL olarak belirlenmiştir. Merdiven için kullanılan standartlara uygun GKKS'nin 2,50 metre fiyatı 250 TL, 2 adet sabitlemek için kullanılan dikme fiyatının 250 TL ve bu dikmeler için gerekli olan 8 adet dübel fiyatıda 32 TL'dir. Merdiven için kullanılan geçici kenar koruma sistemlerinin metre fiyatı ise 212,80 TL olarak belirlenmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

İhale bilgileri Kamu İhale Kurumunun resmi internet sitesi EKAP üzerinden alınan uygulama projesi Eskişehir İli Odunpazarı İlçesinde 8 Derslikli Anaokulu yapımı işine ait olup sözleşme tarihi 26.12.2022 ve yaklaşık maliyeti 16.110.215,37 TL'dir. Bu yapım işinde standartlara uygun GKKS kullanıldığında, geçici kenar koruma sisteminin maliyetinin yapım işinin yaklaşık maliyeti ile karşılaştırılması yapılarak inşaat maliyetine etkisi hesaplanmıştır.

Uygulama projesinin zemin kotu + 0,50 m ve en yüksek kotu ise +12,50 m'dir. Bu projede imalat aşamasında yüksekten düşme riski olan kat döşeme kenarlarının çevresi, döşemelerde süreksizlik meydana getiren boşlukların çevresinde standartlara uygun GKKS kullanılması amaçlanmıştır. Kalıp ve mimari projeler üzerinden +0,50, +4,50, + 8,50 ve +12,50 kotlarında yüksekten düşme riski olan alanların çevresi hesaplanmış ve metraj değerleri Tablo 3'te gösterilmiştir. +0,50 m kotunda 104,50 metre, +4,50 m kotunda 132,50 metre, +8,50 m kotunda 196,50 metre, +12,50 m kotunda 65 metre ve merdiven kenarları için ise 36 metrede standartlara uygun GKKS kullanılması gerektiği tespit edilmiştir. Kalıp ve mimari proje planlarında yapılan hesaplamalarda kolon ve perde düşey elamanlarının bulunduğu bölgeler çıkarılmış, şaft boşluklarının çevreleri dahil edilerek hesaplama yapılmıştır.

Projede 2 farklı uygulama şekline göre standartlara uygun GKKS maliyeti hesaplanmıştır. 1. uygulama, kaba inşaata yönelik çalışmalar bittikten sonra ince inşaat imalatlarına başlanılacağı kabul edilerek tüm katlarda ihtiyaç duyulan standartlara uygun GKKS miktarı tespit edilmiştir. Bu duruma göre, bütün katlarda aynı anda kullanılacak standartlara uygun GKKS miktarı 498.50 m'dir. Ayrıca merdiven kenarları için toplam 36.00 m. standartlara uygun GKKS gereklidir.

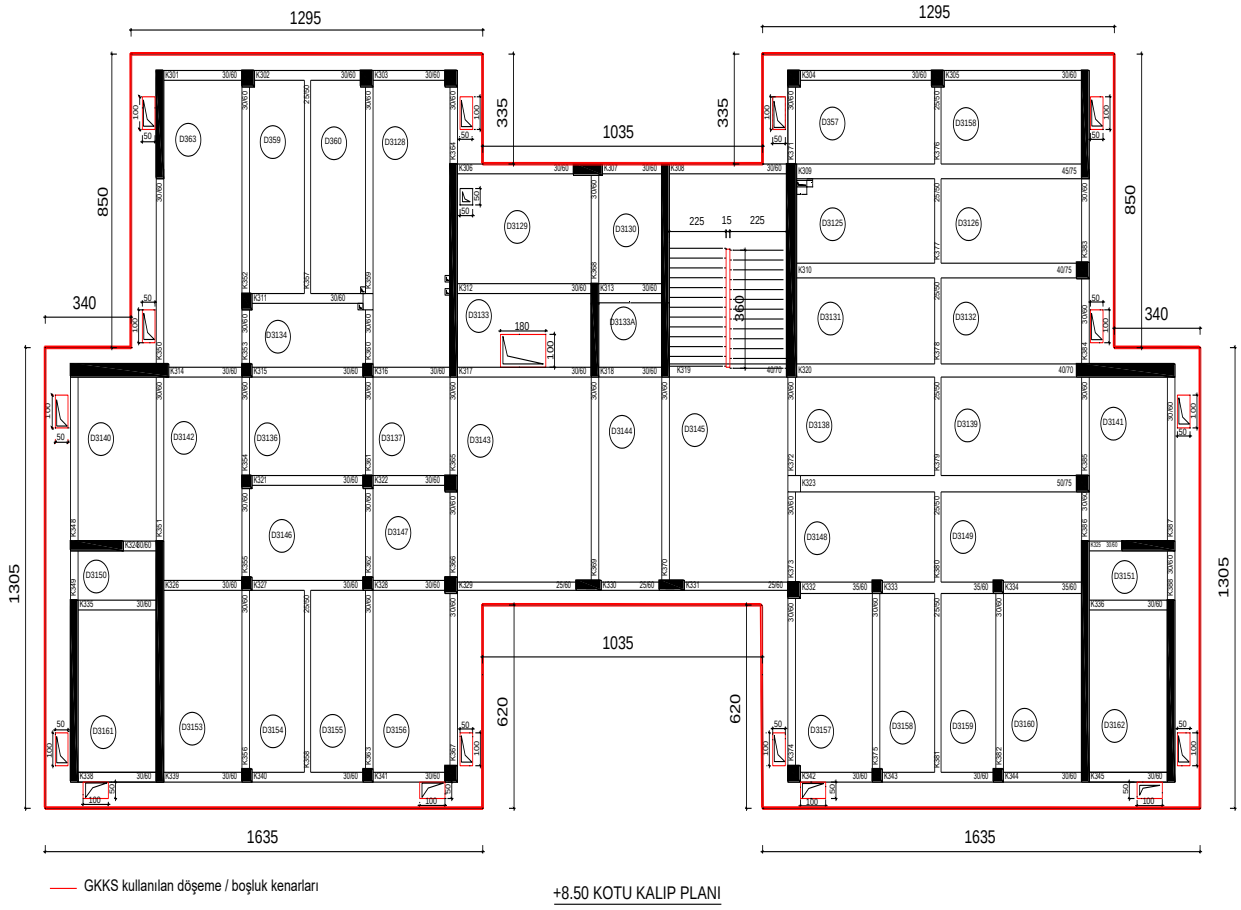
2. uygulamada ise projede kaba işlere yönelik imalatlar ile ince işlere yönelik imalatlar eş zamanlı olarak devam edeceği kabul edilmiştir. Bir başka ifadeyle yüksekten düşme tehlikesi olan kat kenarlarının çevresinde duvar imalatları, kalıcı balkon korkulukları vb. imalatlar yapılacağı için bu kısımlarda kullanılan GKKS kaldırılacak ve bir üst katta kullanılarak imalatlar tamamlanacaktır. Bu durumda yapılan hesaplamalarda ise en fazla miktarda gerekli olan GKKS Şekil 5'te verilen +8,50 m kotunda olduğu görülmüş ve + 8,50 m kotu baz alınarak hesaplanan standartlara uygun GKKS miktarı 196.50 m. olarak tespit edilmiştir. Yine merdiven kenarları için toplam 36.00 m. standartlara uygun GKKS gereklidir.

Piyasa araştırması yapılarak elde edilen ve Bölüm 2.3'de verilen birim fiyatlar kullanılarak hesaplanan GKKS toplam maliyetleri Tablo 4'te gösterilmiştir.

1. uygulamaya göre bütün katlarda aynı anda kullanılacak standartlara uygun GKKS maliyeti 145.960 TL, merdivenler için gerekli olan standartlara uygun GKKS maliyeti 7660 TL ve toplam maliyet ise 153.620 TL olarak hesaplanmıştır. GKKS'lerinin oluşturduğu toplam maliyet projenin yaklaşık maliyeti ile karşılaştırıldığında, proje yaklaşık maliyetine oranının yaklaşık % 0.95'i olduğu görülmüştür.

Tablo 3. Geçici kenar koruma sistemi metraj değerleri

Cephe\Kot	+0.50 kotu	+4.50 kotu	+8.50 kotu	+ 12.50 kotu
Ön cephe	43.60	53.25	55.45	15.70
Arka cephe	37.10	37.10	48.35	15.70
Yan cepheler	23.80	23.80	43.10	21.60
Şaft boşluğu kenarları	--	18.35	49.60	12.00
TOPLAM	104.50	132.50	196.50	65.00



Şekil 5 . +8.50 kotuna ait kat kalıp planı

2. uygulamada ise + 8,50 m kotu baz alınarak kullanılacak standartlara uygun GKKS maliyeti 57.500 TL, merdivenler için gerekli standartlara uygun GKKS maliyeti 7660 TL ve bu uygulama için toplam maliyet 65.160 TL olarak hesaplanmıştır. GKKS'lerinin oluşturduğu toplam maliyet projenin yaklaşık maliyeti ile karşılaştırıldığında, proje yaklaşık maliyetine oranının yaklaşık % 0.40'ı olduğu görülmüştür.

Bu sistemlerin maliyeti proje yaklaşık maliyetine oranla çok düşük kalmaktadır. Yapılan projede yüksekten düşme sonucu uzuv kayıplı ya da ölümlü iş kazası meydana geldiğinde, bu olayın işverene doğrudan ya da dolaylı olarak maliyeti, projede bu sistemlerin kullanılması durumunda yaratacağı ek maliyetin çok üzerinde olduğu yadsınamaz bir gerçektir. Standartlara uygun olan GKKS'ler kutu profil ve çelik malzemelerden yapıldığı için yapılan inşaatta uygun bir şekilde montajı yapılıp ve yine aynı şartlarda uygun bir şekilde sökülüp muhafaza edildiği takdirde sistemler uzun yıllar boyunca işveren tarafından kullanılabilecektir. Bu durum da gözönünde bulundurulursa yaratacağı ek maliyetin çok daha düşük seviyelerde olacağı söylenebilir.

4 Sonuçlar

Ülkemizde her yıl meydana gelen ölümlü iş kazaları incelendiğinde inşaat sektöründe meydana gelen ölümlü iş kazaları, diğer sektörlerde meydana gelen ölümlü iş kazalarından daha fazla olduğu Sosyal Güvenlik Kurumu'na yapılan bildirimlerde ve yapılan araştırmalarda görülmektedir.

Tablo 4. Geçici kenar koruma sistemi maliyet karşılaştırılması

	Standartlara uygun GKKS Miktarı (m)	Standartlara uygun GKKS (Merdiven) Miktarı (m)	Standartlara uygun GKKS Maliyeti (TL)	Standartlara uygun GKKS (Merdiven) Maliyeti (TL)	Toplam Standartlara uygun GKKS Maliyeti (TL)	Standartlara uygun GKKS Maliyetinin İhale Yaklaşık Maliyetine Oranı (%)
1. Uygulama	498.50	36.00	145.960,00	7.660,00	153.620,00	0.95
2. Uygulama	196.50	36.00	57.500,00	7.660,00	65.160,00	0.40

Bu çalışmada 2020 ve 2021 yıllarında inşaat sektöründe meydana gelen ölüm ve yaralanma ile sonuçlanan iş kazalarına ilişkin Sosyal Güvenlik Kurumu'na yapılan bildirimler incelenmiştir. Yapılan incelemede en fazla ölümlü iş kazalarının 41 NACE kodlu bina inşaatında meydana geldiği görülmüştür. En fazla yaralanmaya ait iş kazalarının da yine 41 NACE kodlu bina inşaatında meydana gelmiştir. 2020 ve 2021 yıllarında meydana gelen ölümlü iş kazaları ile ilgili bildirimler üzerine yapılan incelemede en fazla ölümlü iş kazasının yüksekten düşme sonucu meydana geldiği tespit edilmiştir.

Yüksekten düşme sonucu meydana gelen iş kazaları alt başlıklara ayrılarak daha detaylı incelendiğinde 2020 ve 2021 yıllarında en fazla ölümlü iş kazalarının kat döşeme kenarlarının çevresinden düşme olduğu anlaşılmaktadır. İnşaat sektöründe yüksekten düşmeyi önlemek için genel olarak önerilen ve kullanılan yöntem TS EN 13374 standartlarına uygunluk belgesi olan GKKS kullanılmasıdır. Yüksekten düşme sonucu meydana gelen iş kazalarını önlemek için geçici kenar koruma sistemleri kullanıldığında ölümlü ve yaralanmalı iş kazalarının büyük oranda azalacağı öngörülmektedir.

İnşaat sektöründe standartlara uygun GKKS işverenler tarafından maliyet oluşturacağı düşünüldüğünden çok tercih edilmemektedir. Ülkemizde örnek bir inşaat projesi ele alınmış ve bu projede yüksekten düşmeyi önlemek için gerekli olan geçici kenar koruma sisteminin maliyeti hesaplanarak projenin yaklaşık maliyetiyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada GKKS yaklaşık maliyeti için 2 farklı uygulama üzerinde durulmuştur. 1. uygulamanın proje yaklaşık maliyetine oranı % 0.95 ve 2. uygulamanın ise proje yaklaşık maliyetine oranı % 0.40 olarak bulunmuştur. Yapılan hesaplamalara göre her iki durum için gerekli olan GKKS maliyetinin, yapılacak projenin yaklaşık maliyetinin %1'i bile olmadığı tespit edilmiştir.

İnşaat sektöründe meydana gelen ölümlü iş kazalarının kurumlara ve kişilere olan maliyetleri doğrudan maliyetlerdir. Bunlar; iş kazasına uğrayan kişinin bakiye ömrü ve yaptığı iş dikkate alınarak hak sahiplerine aylık gelir bağlanması, herhangi bir geliri olmayan kız çocuklarına evlenme ödeneğinin tahsis edilmesi, iş kazası geçirerek vefat eden kişinin cenaze ve defin giderlerinin ödenmesi olarak göze çarpmaktadır. Dolaylı maliyetler ise net bir şekilde hesaplanamadığı gibi kişinin ömrü boyunca çalışarak ülke ekonomisine sağlayacağı ekonomik katkı dikkate alındığında bu katkının bile başlı başına ekonomiye sağlayacağı fayda yadsınamaz bir gerçektir. Yüksekten düşme sonucu meydana gelen ölümlü iş kazalarını önlemek için kullanılması gerekli olan standartlara uygun GKKS için yapılan harcamalar projenin yaklaşık maliyeti ile karşılaştırıldığında çok düşük bir maliyet oluşturduğu görülmüştür. İş kazası sonucu oluşan doğrudan ve dolaylı maliyetler için yapılan harcamalar dikkate alındığında geçici kenar koruma sistemlerine yapılan harcamalardan çok daha fazla olacağı kaçınılmaz bir gerçektir.

Sektörde iş sağlığı ve güvenliği için işletmelerin gerekli harcamaları yapmadığı ve bu harcamaları ek maliyet olarak gördükleri bakış açısı yaygınlaşmıştır. Bu çerçevede öncelikle kamu ihalelerinde iş sağlığı ve güvenliği harcamalarının zorunlu hale getirilmesi için ihale yaklaşık maliyetinin belirli bir oranında pay ayrılmasının ve bu payın zorunlu olarak iş sağlığı ve güvenliği için gerekli harcamalarda kullandırılmasının sağlanması sektördeki ölümlü iş kazalarının azalmasına katkı sağlayacaktır.

İş kazasının meydana geldiği işyerlerinde Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı tarafından teftiş ve denetim faaliyetleri yapılmaktadır. Bu teftiş ve denetim faaliyetlerinde işyerlerinin tehlike sınıflarına ve çalışan sayılarına göre 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu ile alt yönetmelikleri kapsamında idari para cezaları uygulanmaktadır. İş kazası sonucu yapılan teftiş ve denetim faaliyetlerinde işyeri içinde çalışanlar için hayati tehlike oluşturan bir husus tespit edildiğinde, hayati tehlikenin niteliği ve bu tehlikeden doğabilecek riskin etkileyebileceği alan ile çalışanlar dikkate alınarak işyerinin bir bölümünde veya tamamında işletmenin durdurulmasına karar verilebilmektedir.

İş sağlığı ve güvenliği ile ilgili kamu tarafından uygulanan idari yaptırımlar düşük kaldığından dolayı sektördeki çoğu işveren iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili önlem almak yerine idari yaptırımı ödemeyi kabul ederek gerekli önlemleri almamaktadır. İdari yaptırımların çok tehlikeli işyerlerinde daha caydırıcı olması ve uygulanması iş kazalarının önlenmesi açısından olumlu olacaktır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

[1] S.E. Hacıbektaşoğlu, İnşaat sektöründe yaşanan iş kazalarının analizi ve bu kazalara neden olan etkenlerin incelenmesi. Stratejik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi, 2(3), 159-177, 2018. https://doi.org/ 10.30692/ sisad.452112.

[2] N. Yamak, S. Koçak, ve S. Samut, Türkiye'de inşaat sektörünün kısa ve uzun dönem dinamikleri. Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi, 7 (1), 96-113, 2018. https://dergipark.org.tr/tr/pub/eyad/issue/57407/813619.

[3] E. N. Güllüoğlu ve A. N. Güllüoğlu, Türkiye inşaat sektöründe istihdam ve iş kazalarının analizi. Karaelmas Journal of Occupational Health and Safety, 3(2), 65-81, 2019. https://doi.org/10.33720/kisgd.622008

[4] U. Müngen, İnşaat sektörümüzdeki başlıca iş kazası tipleri. Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi, 469, 32-39, 2011.

[5] M. H. Gözüak ve H. Ceylan, Türkiye'de inşaat sektöründe meydana gelen iş kazalarının iş sağlığı ve güvenliği bağlamında analizi: Güncel eğilimlere genel bir bakış. Sağlık Akademisyenleri Dergisi, 8 (2), 133-

143, 2021. https://dergipark.org.tr/tr/pub/sagakaderg/issue/62334/863926 .
[6] A. Çavuş ve E. Taçgın, Türkiye'de İnşaat sektöründeki iş kazalarının sınıflandırılarak nedenlerinin incelenmesi. Academic Platform-Journal of Engineering and Science, C., 4(2), 13-24, 2016. https://doi:10.21541/apjes.63338
[7] M. A. Zengin, Türkiye inşaat sektörü iş kazalarının istatistiksel analizi 2011-2020 . International Journal of Engineering Research and Development. 14 (2), 492-501, 2022. https://doi.org/10.29137/umagd.1035473
[8] T. Zlatar, E. Lago, W. Soares, J. S. Baptista and B. B. Junior, Falls from height: Analysis of 114 cases, Production, 29 (6), 2019, https://doi.org/10.1590/0103-6513.20180091
[9] T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, "Ulusal İstihdam Stratejisi, 5.İzleme ve Değerlendirme Kurulu Toplantısı Mevcut Durum Raporu-İnşaat Sektörü". Aralık, 2017.
[10] B. Balcı, E. Taçkın, E. Ö. Balcı ve A. Yerden, İş kazalarında mali kayıplar. İstanbul Sosyal Bilimler Dergisi, (6), 66-83, 2013.https://dergipark.org.tr/tr/pub/istjss/issue/17492/183032
[11] ILO Introductory Report: Global Trends and Challenges on OHS -2008. XIX World Congress on Safety and Health at Work, 2011.
[12] S. Baradan, Türkiye inşaat sektöründe iş güvenliğinin yeri ve gelişmiş ülkelerle kıyaslanması. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 8, 87-100, 2006. https://dergipark.org.tr/tr/pub/deumffmd/issue/40869/493434 .
[13] F. Yılmaz ve O. Tan, Bir inşaat şantiyesinde iş kazalarının neden olduğu iş-günü kayıplarının işverene maliyetinin belirlenmesi. International Journal of Economic and Administrative Studies, 14,143-156, 2015.https://dergipark.org.tr/tr/pub/ulikidince/issue/21614/232162.
[14] C. Akçay, İnşaat sektöründe iş kazaları ve iş güvenliği maliyetlerinin incelenmesi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29 (3), 328-336, 2021. https://doi.org/10.31796/ogummf.868306
[15] S. Y. Yeşilniğdeli, İnşaat Sektöründe İş Kazalarının Oluşturduğu Maliyetler. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Türkiye, 2016.
[16] Ö. Akboğa ve S. Baradan, İnşaat sektöründeki ölümlü iş kazalarının karakteristiklerinin incelenmesi: İzmir alan çalışması. 5. İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu, 215-224, İzmir, Türkiye, 5-6 Kasım 2015.
[17] A. Kaplan, Türkiye'de İnşaat Sektörü İş Kazası İstatistiklerinin Panel Zaman Serisi Analizi ile İncelenmesi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Türkiye, 2022.
[18] S. G. Özcan, A. Yıldızbası ve E. Eraslan, İnşaat firmalarının İSG bağlamında bulanık grup karar verme yaklaşımı ile değerlendirilmesi. Endüstri Mühendisliği, 30 (3), 204-219, 2019.https://dergipark.org.tr/tr/pub/endustrimuhendisligi/issue/50398/606553
[19] A. Razgratlı, İnşaat sektöründe iş kazalarının psikolojik sonuçları. Yüksek Lisans Tezi, Beykent Üniversitesi, Türkiye, 2016.
[20] C. H. Liy, S. H. Ibrahim, R. Affandi, N. A. Rosli, and M. N. M. Nawi, Causes of Fall Hazards in Construction Site Management. International Review of Management and Marketing, 6(S8), 257-263, 2016.
[21] S. D. Choi, L. Guo, J. Kim and S. Xiong, Comparison of fatal occupational injuries in construction industry in the United States, South Korea, and China. International Journal of Industrial Ergonomics, 71, 64-74, 2019, https://doi.org/10.1016/j.ergon.2019.02.011
[22] E. A. Nadhim, C.Hon, B. Xia, I. Stewart and D. Fang, Falls from Height in the Construction Industry: A Critical Review of the Scientific Literature. International Journal of Environmental Research and Public Health, 13(7), 638, 2016, https://doi.org/10.3390/ijerph13070638.
[23] Y. Halabi, H. Xu, D. Long, Y. Chen, Z. Yu, F. Alhaek, W. Alhaddad, Causal factors and risk assessment of fall accidents in the U.S. construction industry: A comprehensive data analysis (2000–2020). Safety Science, 147, 2022. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2019.02.011.
[24] Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği. RG: 05.10.2013/28786.
[25] Sosyal Güvenlik Kurumu Hizmet Sunumu Genel Müdürlüğü, E-10124169-708.01-50632491 sayılı veri talep yazısı eki (41, 42 ve 43 NACE kodlarında faaliyet gösteren inşaat sektöründeki işyerlerinde 2020 ve 2021 yıllarında meydana gelen iş kazalarına ilişkin veriler), 18.08.2022.
[26] R. Akyüz, İnşaat sektöründe ölümlü iş kazalarının proje maliyetine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2023.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 318-324

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Sabit kanatlı bir İHA'nın model öngörülü kontrolü için döngüde yazılım simülasyonu

Software-in-the-loop simulation of model predictive control applied to a fixed-wing UAV

Zülfü Kuzu[1,*], **Fatma Yıldız Taşçıkaraoğlu**[2]

[1] Türk Hava Kurumu Üniversitesi, *İzmir Havacılık Meslek Yüksekokulu, Uçak Teknolojisi Programı, 35920, İzmir Türkiye*
[1,2]Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, *Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 48000, Muğla Türkiye*

Öz

Bu çalışmada, bilgisayar tabanlı bir uçuş simülatörü olan X-Plane ile Simulink ortak çalışması yapılarak bir Cessna 172 uçağının rüzgârlı hava koşulları altında hız kontrolü gerçekleştirilmiştir. Trim koşullarında doğrusallaştırılan model için model öngörülü kontrolcü (MPC) geliştirilmiş ve döngüde yazılım (SIL) testleri yapılmıştır. Modele, rüzgâr bozucu etkisi olarak literatürde çok tercih edilen Von Karman rüzgâr türbülans modeli eklenmiştir. Veri iletişimi, gerçek zamanlı bir kullanıcı olan datagram protokolü (UDP) ile sağlanmıştır. Benzetim çalışmalarının sonuçları, literatürdeki PID kontrol tabanlı otopilot geliştirme çalışmalarının sonuçlarıyla karşılaştırılarak incelenmiştir. Buna göre, uçuş kontrol yüzeyleri ve gaz kolu kısıtlarının da dikkate alındığı MPC yöntemiyle kontrol edilen İHA'da, yunuslama stabilitesi korunarak hız referansı değişiklikleri doğru bir şekilde izlenmiştir ve benzeri çalışmalara kıyasla daha başarılı sanal uçuş testleri gerçekleştirildiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Model Öngörülü Kontrol, Döngüde yazılım, X-Plane, İHA.

Abstract

In this study, the speed control of a Cessna 172 aircraft is carried out under windy weather conditions by combining X-Plane, which is a computer-based flight simulator, with Simulink. Model predictive controller (MPC) is developed for the model linearized under trim conditions and software-in-the-loop (SIL) tests are performed. Von Karman wind turbulence model, which is widely preferred in the literature as a wind disturbance effect, is added to the model. Data communication is provided through a real-time user datagram protocol (UDP). The results of simulation studies are examined by comparing those of PID control-based autopilot development studies in the literature. Accordingly, in the UAV controlled by the MPC method, which also takes into account flight control surfaces and throttle constraints, the speed reference changes are accurately monitored while maintaining pitch stability, and it is observed that more successful virtual flight tests are carried out compared to the similar studies.

Keywords: Model Predictive Control, Software-in-the-loop, X-Plane, UAV.

1 Giriş

Uçuş benzetim yazılımları hava aracı tasarımı, uçuş verisi üretme, pilot eğitimi ve otopilot geliştirme çalışmalarında gerçek uçuş testlerine alternatif olarak ön plana çıkmaktadır. Uçuş testlerindeki zaman kaybı, maliyet ve hayati tehlikeler gibi sebeplerle uçuş simülatörleri tercih edilmektedir ve son yıllarda bu alanda önemli ilerlemeler kaydedilmesiyle birlikte yüksek derecede gerçekçilikle benzetimler yapılabilmektedir. Uçuş simülatörleri, hava araçlarının dinamik davranışlarının incelenmesi, bozucu etki ve parametre belirsizliklerinin eklenmesi ve hava aracının üç boyutlu hareketinin görselleştirilmesi gibi imkanlar sağlamaktadır [1].

Literatürde, özellikle otopilot geliştirme çalışmalarında sıklıkla Flight Gear, Microsoft ve X-Plane uçuş simülatörlerinin yer aldığı görülmektedir [2]. Bu simülatörler incelendiğinde X-Plane uçuş simülatörünün diğerlerine kıyasla daha esnek ve gelişmiş olduğu görülmektedir. X-Plane kullanıcıların ihtiyaçlarına göre özelleştirilmiş hava aracı tasarımına imkân vermektedir. Ayrıca, Federal Havacılık İdaresi'nden (FAA) sertifika alan tek uçuş simülatörü olması simülasyon sonuçlarını güvenilir kılmaktadır. Cessna, Cirrus ve Boeing gibi çok sayıda şirket ve birçok araştırmacı kontrol yöntemleri geliştirmek ve test etmek için X-Plane'i tercih etmektedir [3].

Hava araçlarının doğrusal olmayan matematiksel modele sahip olması, performanslarının aerodinamik faktörlerle birlikte irtifa, faydalı yük miktarındaki değişim, rüzgâr hızı ve yönü gibi değişikliklerden kolaylıkla etkilenmesi gibi nedenlerle kontrol sistemlerinin tasarımı ve gürbüzlüğü üzerine çalışmalar büyük önem arz etmektedir [4]. Uçuş kontrolünde klasik kontrol algoritmalarından PID, uygulama basitliği ve düşük hesaplama yükü nedeniyle yoğun olarak tercih edilse de PID parametrelerinin rüzgâr ve türbülans gibi bozucu etkilerin varlığında veya faydalı yük özelliklerinin değişmesi durumunda yeniden ayarlanması gerekliliği ve kontrol sistemindeki kısıtların dikkate alınamaması gibi nedenlerle gerçek uygulamalarda bazı problemler

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: zkuzu@thk.edu.tr (Z. Kuzu)
Geliş / Recieved: 21.07.2023 Kabul / Accepted: 11.12.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngmuh.1331207

oluşmaktadır [5]. Bu dezavantajların üstesinden gelebilmek için kullanılan modern kontrol yöntemleriyle ilgili bir literatür tarama çalışması Michailidis vd. tarafından yapılmıştır [6].

Tadeo vd. doğrusal ve doğrusal olmayan kontrol yöntemlerini minyatür bir uçak üzerinde gerçek zamanlı olarak test ettikleri çalışmalarında, PID, doğrusal karesel regülatör (LQR), Ayrık Zamanlı Kalman filtresi ve doğrusal karesel regülatör (AZF-LQR) ve geri anahtarlama kontrolör yöntemlerini uygulamalı olarak çalışarak LQR ile daha iyi sonuçlar elde ettiklerini göstermişlerdir [7]. Wang vd. ise gürültü, zaman gecikmeleri ve diğer pratik çalışmalardan kaynaklanan problemleri çözmek için kararlı bir doğrusal filtre ve artımlı bir geri adımlamalı kontrolör tasarlamışlardır [8]. Önerilen kontrol yönteminin bu problemlerin üstesinden gelebildiği çalışmada gösterilmiştir.

Alexandru vd. yaptıkları çalışmada sabit kanatlı bir hava aracının yörünge takibi için uyarlanabilir bir geri-anahtarlamalı kontrolör yöntemi tasarlamışlardır [9]. Bu çalışmada, kontrolör benzetim çalışmaları sadece yanal eksen için kötü hava koşulları gibi bozucu etkiler sisteme dahil edilerek gerçekleştirilmiştir. Arturo vd. ise yaptıkları çalışmada klasik kayan kipli kontrol (SMC), ikinci dereceden SMC ve yüksek dereceden SMC'yi karşılaştırmışlardır [10]. Bu çalışmada simülasyon çalışmalarına bozucu etkiler eklendiğinde yüksek dereceli SMC'nin daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Hava araçlarının rüzgâr ve türbülans gibi bozucu etkilere karşı tepkisi doğrusal olmayan denklemler kullanılarak modellenebilmektedir. İHA'ların doğrusal olmayan hareket denklemleri trim şartlarında doğrusal denklemlere dönüştürülebilmekte ve doğrusal kontrol yöntemleri uygulanabilmektedir [11]. SMC, Model Öngörülü Kontrol (MPC), H∞ ve LQR gibi kontrol yöntemlerinin literatürde doğrusal hareket denklemlerine uygulandığı çalışmalar mevcuttur [12-15].

Sabit kanatlı hava araçları üç eksendeki hareketin kontrolünü ve kararlılığını sağlamak için kontrol girişi olarak uçuş kontrol yüzeyleri ve gaz kolunu kullanmaktadır. Uçuş kontrol yüzeyleri ve gaz kolunun çeşitli fiziksel işlem kısıtları bulunmaktadır. Klasik kontrol yöntemleri ile yapılan çalışmalarda bu kısıtlar dikkate alınmamaktadır ve bu testler başarılı sonuçlar vermemektedir. Hem simülasyon hem de gerçek zamanlı uygulamalarda başarılı sonuçlar elde etmek için tasarlanan kontrolörde fiziksel işlem kısıtları dikkate alınmalıdır. Ayrıca hava araçlarının rüzgâr ve türbülans gibi bozucu etkilerden olumsuz etkilenmesi nedeniyle tasarlanan kontrolörün bu bozucuları bastıracak yetenekte olması gerekmektedir. MPC, sistemin matematiksel modelini ve fiziksel işlem kısıtlarını ve bozucu etkileri dikkate alan optimizasyon temelli çevrim içi bir kontrol yöntemidir [16]. Hakan vd. tarafından MPC yönteminin 3 farklı test senaryosu ile sabit kanatlı bir hava aracı için uygulandığı çalışmada sisteme etki eden bozucu parametrelere rağmen başarılı sonuçlar elde edildiği gösterilmiştir. [17]. Ayrıca bu yöntemin gerçek zamanlı uygulamalarda uygulanabileceği ve başarılı olacağı bu çalışmada belirtilmiştir.

Hava araçları için tasarlanan kontrol sistemlerinin gerçek zamanlı uygulamalarda başarı göstermesi için rüzgâr, türbülans ve gürültü gibi gerçek zamanlı uçuşlarda uçuş dinamiğine etki edecek bozucu parametrelerin dikkate alınarak matematiksel modelin oluşturulduğu çeşitli çalışmalar literatürde bulunmaktadır. Bu çalışmalarda özellikle Von Karman ve Dryden türbülans modellerinin yoğun olarak kullanıldığı görülmektedir [18]. Von Karman türbülans modeli doğal ortamdaki rüzgârın en iyi temsil edildiği modeldir ve ABD savunma sanayisinde uçak tasarım ve simülasyon uygulamalarında tercih edilmektedir. Simülasyon ve kontrol çalışmalarında rüzgâr bozucu etkisi içeren yöntemlere son yıllarda da literatürde yer verilmektedir [19, 20]. Fan vd.'nin dikey kalkış ve iniş yapabilen hava aracı üzerindeki çalışmalarında Von Karman türbülans modeli sisteme dahil edilerek çeşitli rüzgâr hızlarında ve açılarında irtifa kontrolü gerçekleştirilmiştir [20].

Bu çalışmada, Cessna 172 hava aracı için hız kontrolcüsü tasarlanmıştır ve MATLAB/Simulink ve X-Plane uçuş simülatörü kullanılarak döngüde yazılım (SIL) çalışmaları gerçekleştirilmiştir. MATLAB/Simulink 'airlib' kütüphanesinde bulunan Cessna 172 hava aracının doğrusal olmayan matematiksel modeli doğrusal hale dönüştürülmüştür. Daha önce Yasemin vd. tarafından Cessna 172 doğrusal modeli için PID denetleyici SIL çalışmaları gerçekleştirilmiştir [21]. Ancak bu çalışmada hava araçlarının uçuş kontrol yüzeyleri ve gaz kolundaki sapma değerleri ve bozucu etkiler dikkate alınmamıştır. Hava araçları türbülans ve rüzgâr gibi bozucu etiklere maruz kaldığında tasarlanan kontrolörün bu bozuculara karşı dayanıklı olması beklenmektedir. Bu çalışmada, sisteme Von Karman Türbülans modeli dahil edilerek ve gaz kolundaki sapma değerine fiziksel kısıt eklenerek MPC hız kontrolcüsü geliştirilmiş ve test edilmiştir. Bu amaçla geliştirilen MPC ve PID hız kontrolcüleri SIL benzetim ortamında Cessna 172 hava aracı için karşılaştırılmıştır. Bu amaçla tasarlanan kontrolörlerin benzetim çalışmalarına bozucu etki ve fiziksel kısıtlar dahil edildiğinde referans takibinde MPC'nin literatürdeki çalışmalara göre daha başarılı olduğu sonuçlar bölümünde sunulmuştur.

2 Materyal ve metot

2.1 Cessna 172 matematiksel modeli

MATLAB ve X-Plane uçuş simülatörleri Cessna 172 hava aracı ile test yapılmasına olanak sağlamaktadır. "Flight Dynamics and Control" araç kutusunun "Airlib" kütüphanesi içerisinde Cessna 172 hava aracının modeli mevcuttur.

Hava aracının uçuş anındaki hareket ve kontrolünü sağlamak için kullanılan uçuş kontrol yüzeyleri ve gaz kolunun hareketleri fiziksel bazı kısıtlara sahiptir. Cessna 172'ye ait eyleyici fiziksel sınırları Tablo 1'de verilmiştir.

Matematiksel modelin elde edilmesi için öncelikle doğrusal olmayan model bir trim noktasında doğrusal modele dönüştürülmektedir. Bu amaçla ilk olarak bu çalışmada kullanılan hava aracının, yükseklik 5000 ft. ve hız 122 knot trim noktası için hesaplanan parametre değerleri Tablo 2'de verilmiştir [22].

Hava aracına 3 eksen üzerinde kuvvet etki etmektedir. Uçak matematiksel modeli doğrusal hale getirildiğinde dikey eksendeki kuvvetlerin etkilerinin düşük olması sebebiyle

ihmal edilmektedir. Doğrusal matematiksel modelin denklemleri uzunlamasına eksen ve yanlamasına eksen için dikkate alınmaktadır. Doğrusal hareket denklemlerinin durum uzay modelleri uzunlamasına eksen için Denklem (1) ve yanlamasına eksen için Denklem (2) 'de verilmiştir [23].

Tablo 1. Eyleyici fiziksel sınır değerleri

Eyleyici ismi	Alt limit	Üst limit
İtki Kuvveti	0	1300(N)
İstikamet Dümeni	-17º	17º
Kanatçık Dümeni	-15º	15º
Yükseliş Dümeni	-24º	24º

Tablo 2. 5000 ft yükseklik için parametre değerleri

Değişken	Değeri	Birimi
V	122	knot
h	5000	ft
α	-0.0204	rad
β	2.0767e-04	rad
θ	-0.0204	rad
φ	0.0103	rad
ψ	1.4776	rad
p	0.0106	rad/s
q	3.4859e-05	rad/s
r	0.0016	rad/s
δ_e	-0.0096	rad
δ_a	0.0029	rad
δ_r	0.0030	rad
δ_{th}	94.90	%

$$\begin{bmatrix}\dot{V}\\ \dot{\alpha}\\ \dot{q}\\ \dot{\theta}\\ \dot{h}\end{bmatrix} = A_{long}\begin{bmatrix}V\\ \alpha\\ q\\ \theta\\ h\end{bmatrix} + B_{long}\begin{bmatrix}\delta_e\\ \delta_T\end{bmatrix} + B_{gust}\begin{bmatrix}u_g\\ w_g\\ q_g\end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix}\dot{\beta}\\ \dot{p}\\ \dot{r}\\ \dot{\emptyset}\end{bmatrix} = A_{lat}\begin{bmatrix}V\\ \alpha\\ r\\ \emptyset\end{bmatrix} + B_{lat}\begin{bmatrix}\delta_a\\ \delta_r\end{bmatrix} + B_{gust}\begin{bmatrix}u_g\\ w_g\\ q_g\end{bmatrix} \quad (2)$$

Burada A_{long} ve B_{lat} sistem matrislerini, B_{long} ve B_{lat} giriş matrislerini, B_{gust} Von Karman türbülans modelinden elde edilen bozucu giriş matrisini temsil etmektedir. u_g, w_g, q_g ise üç eksende etki eden rüzgâr hızlarının değerlerini göstermektedir.

δ_T ve δ_e sırasıyla itki ve yükseliş dümeni değerleri uzunlamasına eksen etrafındaki hareket için kontrol girişlerini temsil eder. V uzunlamasına eksendeki hızı, α hücum açısını, θ yunuslama açısını, h yüksekliği, q ise yanlamasına eksendeki açısal hız değişim oranını gösteren sistem durumlarıdır.

δ_a ve δ_r ise yanlamasına eksen için kanatçık dümeni ve istikamet dümeni kontrol girişlerini göstermektedir. β yana kayma açısını, p uzunlamasına eksendeki açısal hız değişim oranını, r dikey eksendeki açısal hız değişim oranını ve $\emptyset$ yanlamasına eksendeki açı değişimini gösteren sistem durumlarıdır.

2.2 X-Plane uçuş simülatörü

X-Plane, Laminar Research tarafından geliştirilmiş, Windows, Linux veya Mac OS işletim sistemlerine sahip bilgisayarlara kurulabilen, ticari olarak temin edilebilen bir uçuş simülatörüdür. Profesyonel pilotlar, havacılık mühendisleri ve eğitim kurumları tarafından eğitim, uçuş testleri ve uçuş simülasyonları için kullanılır. Kullanıcılar, gerçek dünya uçuş senaryolarını taklit edebilir ve farklı hava koşullarında uçuş deneyimleyebilirler. Gerçek dünya ile bilgi alışverişi yapılmasına imkân veren X-Plane, gerçek uçuş deneyimine en yakın simülasyonlarından biri olarak kabul edilmektedir ve havacılık endüstrisinde geniş bir kabul görmektedir. C/C++, MATLAB/Simulink ve Phyton gibi programlama dillerine uyumludur ve veri alma ve gönderme işlemleri UDP vasıtasıyla sağlanmaktadır [24].

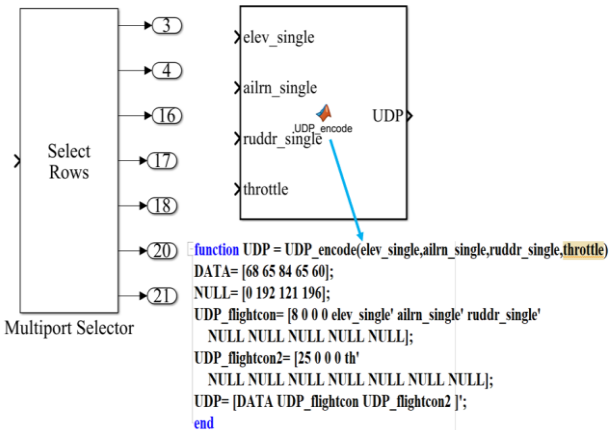
X-Plane ayarlarını yapmak için öncelikle gönderilmek veya alınmak istenen verilerin X-Plane uçuş simülatöründe ve Simulink'te belirtilmesi gerekmektedir. Simülasyon ortamında kullanılan alıcı ve verici fonksiyon blokları ve şeçilen veriler Şekil 1'de gösterilmiştir.

Şekil 2'de gösterildiği gibi verilerin Simulink ortamına aktarılabilmesi için X-Plane uçuş simülatöründe IP numarası ve port değerleri ayarlanmalıdır.

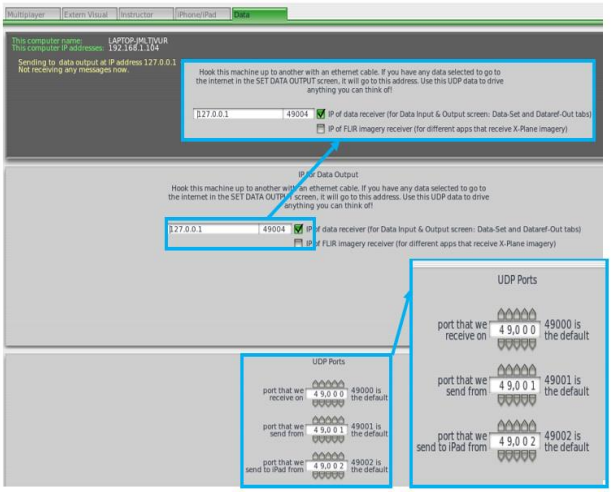
Verilerin UDP üzerinden gönderilmesi için yapılması gereken ayarlar Şekil 3'te gösterilmektedir. Veri giriş/çıkış sekmesi, 133 farklı verinin Simulink üzerine UDP aracılığıyla aktarılmasına izin vermektedir. Her verinin yanında dört adet kutucuk bulunmaktadır ve dördüncüsü verileri UDP aracılığıyla aktarmak için kullanılmaktadır. Seçilen parametrelerin, Şekil 1'deki değerlerle aynı olması gerekmektedir.

Şekil 4'te X-Plane'in rüzgâr hızı, yönü ve türbülans gibi meteorolojik parametrelerin değiştirilmesine izin verdiği atmosfer özellikleri sayfası görülmektedir. Bu sayfa, uçuşun gerçekleştirileceği yükseklik değerine bağlı olarak rüzgâr

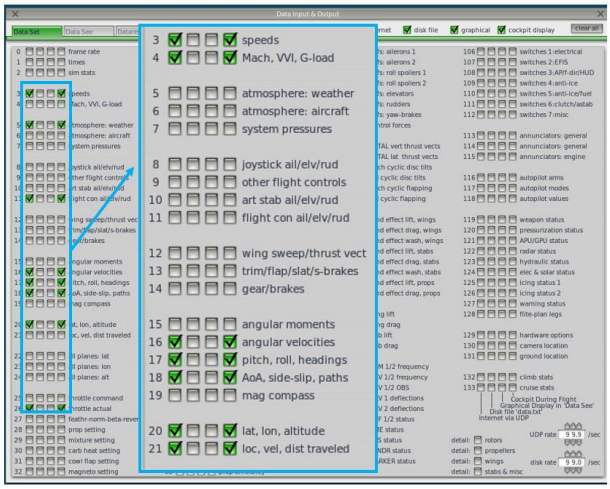
hızı, yönü ve türbülans değerlerini ayarlamaya olanak tanımaktadır.



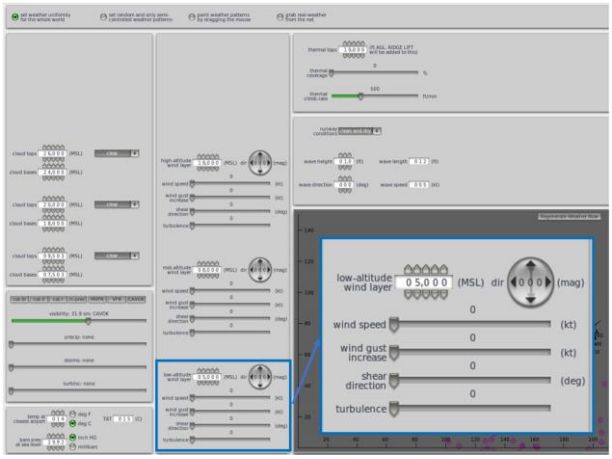
Şekil 1. MATLAB/Simulink alıcı/verici blok



Şekil 2. X-Plane UDP port ayarı



Şekil 3. X-Plane gönderilecek veri ayarı



Şekil 4. X-Plane atmosferik özellikler

2.3 Model öngörülü kontrol (MPC)

Model öngörülü kontrol, model tabanlı olarak geliştirilen, sistemi çevrimiçi bir optimizasyon problemi olarak ele alan ve sistemin gelecek cevaplarını ve kontrol girişlerini sistemin modeline ve performans ölçütlerine göre tahmin eden kontrol yöntemidir [25]. Optimizasyon temelli yöntemler kullanılarak belirlenen kısıtlar dâhilinde maliyet fonksiyonunun minimum değerde tutulması amaçlanır [26].

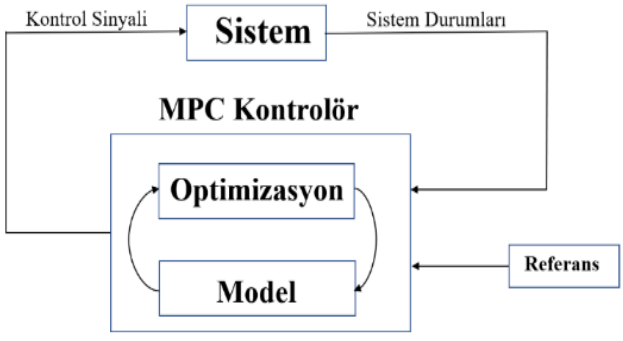
Sistemin ayrık zamanlı durum uzay modeli aşağıdaki gibidir.

$$x(k+1) = A_d x(k) + B_d u(k) + B_{gust} d(k)$$
$$y(k+1) = C_d x(k) \quad (3)$$

Burada A_d ve B_d Denklem (3)'te verilen A_{long} ve B_{long} matrisleridir. Sisteme bozucu eklenerek oluşturulmuş durum uzay modeli (4)'te verilmiştir.

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} A_d & B_{gust} \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ d(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_d \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(k) \\ 0 \end{bmatrix}$$
$$y(k+1) = [C_d \quad I] \begin{bmatrix} x(k) \\ d(k) \end{bmatrix} \quad (4)$$

MPC formülasyonu için düzenlenmiş genel durum uzay modeli (4)'te verildiği gibidir.



Şekil 5. MPC sisteminin blok diyagram

Ayrık zamanlı durum uzay modelinin tahmin ufku (N) değerine göre düzenlenmiş durum uzay modeli (5)'da verilmiştir.

$$X_{dev} = \hat{A}x_0 + \hat{B}u_{ref} - x_{ref} \tag{5}$$

Burada $\hat{A}$ ve $\hat{B}$ değerleri (6) ve (7)'de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$\hat{A} = \begin{pmatrix} A \\ A^2 \\ \vdots \\ A^{N-1} \\ A^N \end{pmatrix} \tag{6}$$

$$\hat{B} = \begin{pmatrix} B & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ AB & B & \cdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \ddots & 0 & 0 \\ A^{N-2}B & A^{N-3}B & \ldots & B & 0 \\ A^{N-1}B & A^{N-2}B & \ldots & AB & B \end{pmatrix} \tag{7}$$

Tahmin ufku boyunca oluşturulan durum uzay modeline bağlı maliyet fonksiyonu (8)'de verilmiştir.

$$J = 2X_{dev}^T \hat{Q}_x + X_v^T \hat{Q}_x X_v + u^T \hat{Q}_u u \tag{8}$$

Burada $X_{dev} = x_i - x_{ref,i}$ sistem durumları hatasını ve u kontrol sinyalini göstermektedir. Referans durumlar x_{ref} (9)'da gösterildiği gibidir.

$$x_{ref} = \begin{pmatrix} x_{ref,0} \\ x_{ref,1} \\ \vdots \\ x_{ref,N-1} \end{pmatrix} \tag{9}$$

Durum ağırlık matrisleri $Q_x \geq 0, Q_u > 0 \; ve \; S > 0$ pozitif tanımlı olmak üzere (10) ve (11)'de verilmiştir.

$$\widehat{Q_x} = \begin{pmatrix} Q_x & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & Q_x & \cdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ldots & Q_x & 0 \\ 0 & 0 & \ldots & 0 & S \end{pmatrix} \tag{10}$$

$$\widehat{Q_u} = \begin{pmatrix} Q_u & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & Q_u & \cdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ldots & Q_u & 0 \\ 0 & 0 & \ldots & 0 & Q_u \end{pmatrix} \tag{11}$$

Denklem (8)'de yer alan maliyet fonksiyonu $X_v = \hat{B}v$ olacak şekilde Denklem (12)'teki gibi kuadratik biçime dönüştürülmektedir.

$$\begin{aligned} \min_v \; & J = v^T H v + h^T v \\ \text{s.t.} \; & (5) \\ & Lv \leq b \end{aligned} \tag{12}$$

Denklem (12)'de yer alan matrisler $H = \hat{B}^T \widehat{Q_x} \hat{B} + \widehat{Q_u}$ ve $h = X_{dev}^T \widehat{Q_x} \hat{B}$ olmaktadır.

3 Bulgular ve tartışma

Bu çalışmada, Cessna 172 uçağının PID ve MPC ile hız kontrolü uygulaması SIL benzetim ortamında MATLAB/Simulink ve X-Plane 10 uçuş simülatör platformları kullanılarak incelenmiştir. Cessna 172 hava aracının doğrusal olmayan modeli, yükseklik 5000 ft ve hız değeri 80 knot olarak belirlenen trim noktasına göre doğrusal bir modele dönüştürülmüştür. Hız kontrolörü tasarımı uzunlamasına eksende gerçekleştirildiği için hava aracının 5000 ft yükseklikte düz uçuş yaptığı varsayımı yapılmıştır. Hız kontrolcüsünün girişi hava aracının hızını kontrol etmek için kullanılan motor gaz kolundaki sapmadır. Cessna 172'nin hızının 80 knot, rüzgâr hızının 0 knot ve yüksekliğin 5000 ft olduğu koşullarda X-Plane uçuş simülatöründeki görseli Şekil 6' da verilmiştir. Tasarlanan kontrolörler, öncelikle rüzgârsız, ardından rüzgârlı atmosferik koşullar altında test edilmiştir.

MPC kontrolde Cessna 172 uçağının uzunlamasına eksen matematiksel modeli kullanılmıştır. Sistemin giriş ve çıkışındaki fiziksel kısıtlar dikkate alınarak oluşturulan çevrimiçi optimizasyon probleminin çözümü için quadprog, MpcActiveSet, qp-OASES, CasADİ ve CVX gibi solverlar kullanılmaktadır. Çevrimiçi olarak gerçekleştirilmesi gereken SIL ve gerçek zamanlı uygulamalarda CVX, qp-OASES ve CasADİ uygun olmamakta veya hız açısından yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple bu çalışmada quadprog tercih edilmiştir.

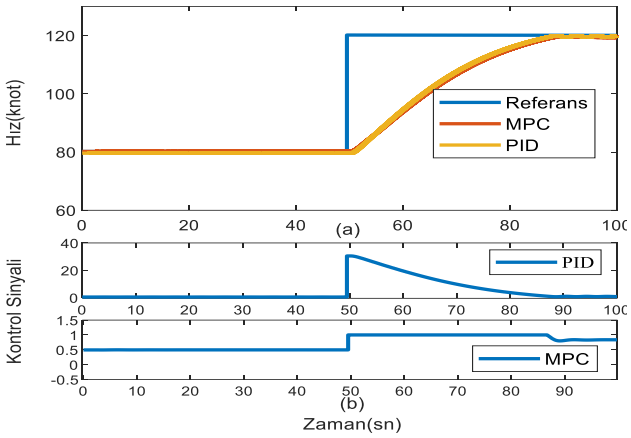


Şekil 6. X-Plane Cessna 172 görüntüsü

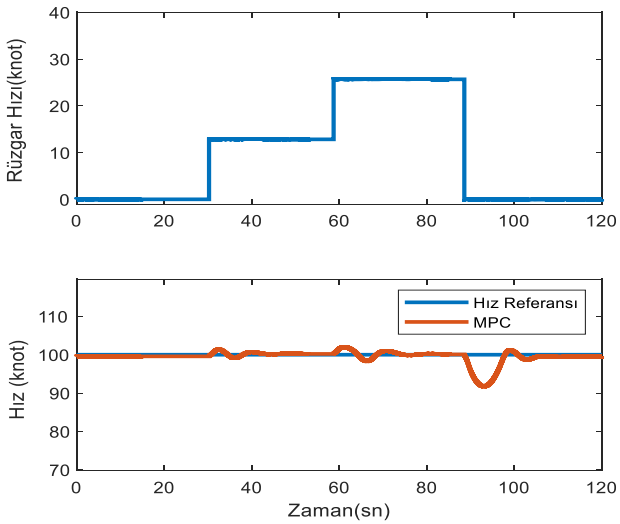
Bu çalışmada, tahmin ufku değeri 20 olarak belirlenmiştir ve gaz kolundaki sapmanın hız kontrolcüsünde 0 ile 1 arasında değişmesi gerekmektedir. Bu gereksinim, MPC maliyet fonksiyonuna giriş kısıtı olarak dahil edilmiştir. Tasarlanan hız kontrolcülerinin verilen referansı takip etme sonuçları Şekil 7' de gösterilmektedir. Simülasyonda Cessna 172 hava aracı için hız referansı 50. saniyede 80 knot'tan 120 knot'a yükseltilmiştir. MPC, kontrol sinyalini başarılı bir şekilde 0 ile 1 arasında tutarken PID kontrolcünün hız referansı değiştiğinde, gaz kolundaki sapmanın değerini kısıtlar içinde tutma konusunda başarılı olamadığı görülmektedir.

Rüzgârlı ve türbülanslı hava koşullarında gerçekleşen uçuşlarda, tasarlanan kontrolcü sisteminin bu etkilere karşı dayanıklı olması gerekmektedir. 12 knot ve 25 knot rüzgâr hızıyla yapılan simülasyon çalışmalarının sonuçları Şekil 8'de sunulmuştur. Sistemde rüzgâr bozucu etkisi varlığına rağmen, MPC'nin başarılı bir şekilde hız referansını takip ettiği görülmektedir.

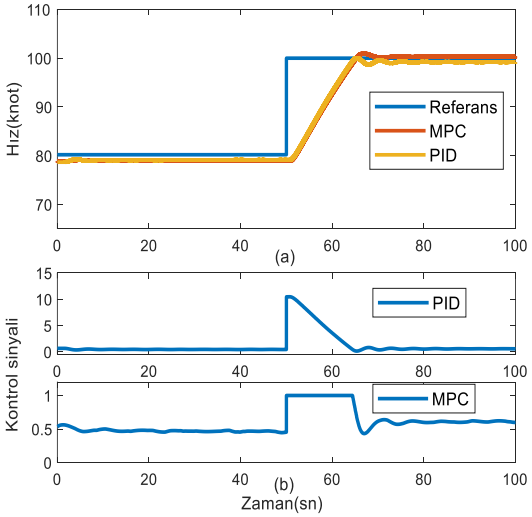
Şekil 9'da ise 5 knot rüzgâr hızı etkisi altında MPC ve PID sonuçları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Hava aracı 80 knot hız ile başlamıştır ve 50. saniyede hız referansı 100 knot değerine çıkarılmıştır. Şekilden de görüldüğü üzere 5 knot rüzgâr hızı bozucusu etkisi altında MPC hız referansı takibinde daha iyi sonuçlar vermiştir.



Şekil 7. (a) Hız referansı takibi (b) Kontrol sinyali



Şekil 8. Çeşitli rüzgâr hızlarında simülasyon sonuçları



Şekil 9. 5 knot rüzgâr etkisinde a) Hız referansı takibi b) Kontrol sinyali

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, Cessna 172 hava aracı için MATLAB/Simulink ve X-Plane uçuş simülatörü kullanılarak SIL benzetim ortamında hız kontrolcüsü çalışmaları gerçekleştirilmiştir. SIL ortamında gerçekleştirilen önceki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada hız kontrolünde rüzgâr bozucu etkisi altında MPC kontrolcü uygulanmıştır. Doğrusal matematiksel model kullanılarak gerçekleştirilen MPC, PID kontrolcüyle karşılaştırıldığında, MPC'nin giriş kısıtı olarak uygulanan gaz kolundaki sapma değerinin limitleri arasında bir kontrol sinyali ile daha başarılı bir şekilde referans takibi yapabildiği görülmüştür. Ayrıca, çevrimiçi bir yöntem olmasının avantajı olarak bozucu etkilerin üstesinden gelme konusunda da üstün olduğu sonuçlarda gösterilmiştir.

Teşekkür

Bu makale, birinci yazarın doktora tezinden üretilmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %11

Kaynaklar

[1] A. Kaviyarasu, A. Saravanakumar and M. Logavenkatesh, Software in Loop Simulation based Waypoint Navigation for Fixed Wing UAV, Defence Science Journal, 71 (4), pp. 448-455, 2021. https://doi.org/10.14429/dsj.71.16164

[2] M. A. Tahir, I. Mir and T. U. Islam, A review of UAV platforms for autonomous applications: comprehensive analysis and future directions, IEEE Access, 11, pp. 52540-52554, 2023. doi:10.1109/ACCESS.2023.3273780.

[3] L. Yu, G. He, S. Zhao, X. Wang and L. Shen, Design and Implementation of a Hardware-in-the-Loop Simulation System for a Tilt Trirotor UAV, Journal of

AdvancedTransportation, 2020. https://doi.org/10.1155/2020/4305742
[4] K. P. Valavanis and G. J. Vachtsevanos Introduction Handbook of Unmanned Aerial Vehicles 2015.
[5] D. Sartori, F. Quagliotti, M. J. Rutherford and K.P. Valavanis, Design and development of a backstepping controller autopilot for fixed-wing UAVs, The Aeronautical Journal, 125 (1294), pp. 2087-2113, 2021. doi:10.1017/aer.2021.53
[6] M. G. Michailidis, M. J. Rutherford and Kç P. Valavanis, A Survey of Controller Designs for New Generation UAVs: The Challenge of Uncertain Aerodynamic Parameters, International Journal of Control, Automation and Systems, pp. 1-16, 2019. https://doi.org/10.1007/s12555-018-0489-8
[7] T.E.Fraire, A. Dzul, F. C.Martínez, and W. Giernacki, Real-time Implementation and Flight Tests using Linear and Nonlinear Controllers for a Fixed-wing Miniature Aerial Vehicle (MAV). Int. J. Control Autom. Syst., 16, 392–396, 2018. https://doi.org/10.1007/s12555-016-0590-9
[8] Y. C. Wang, W. S. Chen, S. X. Zhang, J. W. Zhu and L. J. Cao, Command-filtered incremental backstepping controller for small unmanned aerial vehicles. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 41 (4), 954-967, 2018. https://doi.org/10.2514/1.G003001
[9] A. Brezoescu, T. Espinoza, P. Castillo and R. Lozano, Adaptive Trajectory Following for a Fixed-Wing UAV in Presence of Crosswind, J Intell Robot Syst, 69:257–271,2013. https://doi.org/10.1007/s10846-012-9756-8
[10] A.T. E. Fraire, Y. Chen, A. Dzul and R. Lozano, Fixed-wing MAV adaptive PD control based on a modified MIT rule with sliding-mode control, International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), pp. 1647-1656, Miami, FL, USA, 2017
[11] Z. Latif, A. Shahzad, A. I. Bhatti, J. F. Whidborne and R. Samar, Autonomous Landing of an UAV Using H∞ Based Model Predictive Control, Drones 6, 2022. https://doi.org/10.3390/drones6120416
[12] H. Zhuang , Q. Sun, Z. Chen and X. Zeng , Robust adaptive sliding mode attitude control for aircraft systems based on back-stepping method, Aerospace Science and Technology, 118, 1-18, 2021. https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.107069
[13] U. Gunes, A. Sel, C. Kasnakoglu and U. Kaynak, Output Feedback Sliding Mode Control of a Fixed-Wing UAV Under Rudder Loss, AIAA Scitech 2019. https://doi.org/10.2514/6.2019-0911
[14] L. Cavanini,G. Ippoliti and E. F. Camacho, Model Predictive Control for a Linear Parameter Varying Model of an UAV, Journal of Intelligent & Robotic Systems,101:57,2022. https://doi.org/10.1007/s10846-021-01337-x
[15] S. R. Movahhed and M. A. Hamed, Output tracking of a 6-DOF flying wing UAV in longitudinal motion using LQR optimized sliding mode control with integral action,7th International Conference on Control, Instrumentation and Automation (ICCIA), pp. 1-5,2022. doi: 10.1109/ICCIA52082.2021.9403604
[16] M. Mammarella and E. Capello, A Robust MPC-based autopilot for mini UAVs, International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), pp. 1227–1235, 2018.https://doi.org/10.1109/ICUAS.2018.8453290
[17] H. Ülker, C. Baykara and C. Özsoy, Design of MPCs for a fixed wing UAV, Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 89(6), pp.893901, 2017. https://doi.org/10.1108/AEAT-08-2015-0198
[18] Nelson, R. C. (2007). Flight Stability and Automatic Control, 2nd ed., McGrawHill, New York
[19] Chen, P.; Zhang, G.; Li, J.; Chang, Z.; Yan, Q. Path-Following Control of Small Fixed-Wing UAVs under Wind Disturbance. Drones, 7,253,2017. https://doi.org/10.3390/drones7040253
[20] Li, F.; Song, W.P.; Song, B.F.; Jiao, J. Dynamic Simulation and Conceptual Layout Study on a Quad-Plane in VTOL Mode in Wind Disturbance Environment. Int. J. Aerosp. Eng., 2022, 5867825.
[21] Y. Çantaş and A. Akbulut, Sabit kanatlı hava araçları için otopilot tasarımı ve benzetimi, Politeknik Dergisi, 25(4), 1523-1534, 2021. doi:10.2339/politeknik.894796
[22] E. Çetin, System identification and control of a fixed wing aircraft by using flight data obtained from x-plane flight simulator, The Degree of Master of Science, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Türkiye, 2018.
[23] J. Smith, J. Su, J. C. Liu and W. H. Chen, Disturbance observer based control with anti-windup applied to a small fixed wing UAV for disturbance rejection, Journal of Intelligent & Robotic Systems, 88, pp. 329-346, 2017. https://doi.org/10.1007/s10846-017-0534-5
[24] E. Ersoy and M. K. Yalçın , Designing autopilot system for fixed-wing flight mode of a tilt-rotor UAV in a virtual environment: X-Plane, International Advanced Researches and Engineering Journal, 2 (1),33-42, 2018.
[25] S. Mathisen, K. Gryte, S. Gros, et al. Precision Deep-Stall Landing of Fixed-Wing UAVs Using Nonlinear Model Predictive Control. J Intell Robot Syst 101 (24), 2021. https://doi.org/10.1007/s10846-020-01264-3
[26] U. Dursun, F. Y. Taşçıkaraoğlu and İ. Üstoğlu, An algebraic and suboptimal solution of constrained model predictive control via tangent hyperbolic function. Asian Journal of Control, 23 (5), 2420–2430, 2021. https://doi.org/10.1002/asjc.2357

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 325-333

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Ses analizi ile müzik türlerinin sınıflandırılmasına yönelik kapsamlı bir çalışma

A comprehensive study of classification of music genres with voice analysis

Zekeriya Anıl Güven[1,*]

[1] *İzmir Bakırçay Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 35665, İzmir Türkiye*

Öz

Ses analizi; hastalık tespiti, duygu analizi, müzik türleri sınıflandırma gibi birçok alanda uygulanabilen bir analiz türüdür. Ses karakteristik özellikleri ile probleme göre görüntü analizi, veri analizi uygulanarak sınıflandırma yapılabilmektedir. Bu çalışmada, ses karakteristik özellikleri çıkarılarak müzik türlerinin sınıflandırması gerçekleştirilmiştir. Veri seti olarak 10 müzik türü etiketinden oluşan GTZAN kullanılmıştır. Analiz aşamasında, ses bölütleme işlemi ve özellik seçme yöntemlerinin de müzik türünü sınıflandırmaya etkisi araştırılmıştır. Sınıflandırma için makine öğrenme yöntemleri ve derin sinir ağlarından yararlanılmıştır. Analizin ilk aşamasında, sadece ses bölütleme işlemi uygulanmasıyla doğruluk değeri %10.58 artış göstermiştir. Çalışmanın sonucunda, ses bölütleme işlemi ve özellik seçme yöntemleri uygulanması sonrasında öğrenme yöntemlerinden Derin Sinir Ağları yöntemi %95.19 doğruluk değeriyle %14.19 başarı artışı sağlamıştır.

Anahtar kelimeler: Ses analizi, Makine öğrenmesi, Derin sinir ağları, Özellik seçme, Ses bölütleme

Abstract

Voice analysis is a type of analysis that can be applied in many areas such as disease detection, emotion analysis, and classification of music genres. Classification can be made by applying image or data analysis according to the problem with voice characteristics. In this study, the classification of music genres was performed by extracting the voice characteristics. GTZAN, which consists of 10 music genre tags, was used as the dataset. In the analysis phase, the effects of audio segmentation and feature selection methods on the classification of music genres were investigated. Machine learning methods and deep neural networks were used for classification. In the first stage of the analysis, the accuracy value increased by 10.58% by applying only the audio segmentation. As a result of this study, after the application of audio segmentation and feature selection methods, Deep Neural Network provided an increase of 14.19% with an accuracy of 95.19%.

Keywords: Voice analysis, Machine learning, Deep neural networks, Feature selection, Audio segmentation

1 Giriş

Günümüzde ses analizi ile alakalı sağlık, müzik, konuşma (aksan), güvenlik gibi birçok alanda çalışmalar yapılmaktadır. Ses (konuşma) analizi, ses dosyaları üzerinden ses karakteristik özellikleri çıkarılarak yapılan analiz türüdür. Ses analizi ile çıkarılan bu özellikler eğitime veri (mfcc, tempo, …) olarak verilebilmektedir veya sesin görüntüye (spectrogram, chromogram, …) dönüştürüldüğü özellikler olarak görüntü işleme yoluyla sistemde eğitilebilmektedir. Her iki özellik türü düşünüldüğünde, ses analizinin çalışma alanı oldukça geniştir.

Ses analizi aracılığıyla ses dosyaları sayısal verilere dönüştürülmektedir. Bu sayısal veriler ile özellik çıkarımı işlemi uygulanmaktadır. Elde edilen bu özellikler, sesin karakteristik özelliklerini oluşturmaktadır. Ses karakteristik özelliklerinin eğitim aşamasında kullanılması ile oluşturulan sistemin başarısı test verileri ile ölçülmektedir.

Ses analizi kullanılması müzik türlerinin tespiti için oldukça yaygındır. Birçok çevrimiçi müzik platformu, otomatik olarak müzik türlerinin belirlenmesini sağlayan sistemlerin faydalı olacağını düşünmektedir. Böylece yüklenen müzikler, daha rahat bir şekilde otomatik olarak sınıflandırılabilecektir. Ancak direk ses özellikleri ile bunu yapabilmek zordur, spektrogram gibi görüntüler ile kullanılabilen özelliklerde ses karakteristik özellikleri ile sisteme verildiğinde belli başarı sağlamaktadır.

Ses analizinde ses dosyasının süresinin uzun olabilmesinden dolayı ses dosyasının ayrıştırılarak ses bölütleme işlemi ile analiz gerçekleştirilebilmektedir. Böylece hem veri sayısında artış hem de daha doğru analiz sağlanabilmektedir. Ayrıca elde edilen birçok özellik ile beraber analiz aşamasında fayda sağlamayan özellikler bulunabilmektedir. Bundan dolayı özellik seçme yöntemleri kullanılarak özellik sayısı azaltılmaktadır. Geleneksel yöntemlerin kullanımı yaygın olsa da, son zamanlarda bu görev için literatürde oldukça fazla yöntem önerilmiştir [1-2].

Literatür incelendiğinde müzik alanı ile alakalı birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar genel olarak görüntü işlemeyle ses analizinin kullanılmasına dayanmaktadır. Pelchat ve Gelowitz [3], şarkıları kendi müzik türlerine göre sınıflandırmak için yapay sinir ağlarına girdi olarak şarkıların zaman dilimlerinden oluşturulan spektrogramların görüntülerini kullanmışlardır. Elbir ve Aydin [4], melspectogramların girdi olarak verildiği yeni bir derin sinir ağı modeli ile elde edilen akustik özelliklerin çıkarılmasına odaklanan bir müzik türü sınıflandırma sistemi ve müzik öneri motoru önermişlerdir. Ghildiyal vd. [5], ses

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: anilguven1055@gmail.com (Z.A. Güven)
Geliş / Recieved: 17.08.2023 Kabul / Accepted: 11.12.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1344605

melspektrogramı ile birlikte çeşitli modeller için çoklu girdileri CNN ve makine öğrenme yöntemleri için kullanarak GTZAN veri seti üzerinde müzik türlerini sınıflandırmışlardır. Senac vd. [6], müzik türü tespiti için CNN girdileri olarak, dinamikler, tını ve tonalite üç ana müzik boyutundan seçilen sekiz müzik özelliğinden oluşan küçük bir dizi kullanınımı önermişlerdir ve GTZAN veri setinin başarısını ölçmüşlerdir. Bahuleyan [7], CNN modelinin yalnızca spektrogramını kullanarak bir ses sinyalinin tür etiketini tahmin etmek için uçtan uca eğitildiği bir derin öğrenme yaklaşımlı model ile hem zaman alanından hem de frekans alanından el yapımı özellikleri kullanan modeli makine öğrenme yöntemleri ile eğiterek performanslarını karşılaştırmışlardır. Cheng vd. [8], bir müzik türü sınıflandırma modeli uygulamak için ön işlemede, orijinal ses dosyalarını karşılık gelen Mel spektrumlarına dönüştürmüşler ve eğitim için bu spektrumları önerilen CNN modeline vermişlerdir. Nanni vd. [9], hem görsel hem de akustik olmak üzere farklı özellik gruplarının birleşimine dayanan otomatik ses sınıflandırması yaklaşımı önermişler ve Latin Müzik, ISMIR 2004 ve GTZAN veri seti üzerinde analiz gerçekleştirmişlerdir. Barros vd. [10], karmaşık ses tanımanın genelleştirme yönlerini geliştirmek için kanallar arası bir mimari kullanmayı önermişler ve analiz için SAVEE, GTZAN ve EmotiW veri setlerini kullanmışlardır. Prabhakar ve Lee [11], müzik türü sınıflandırması için beş yeni metodoloji önermişlerdir. Bu metodolojileri, derin öğrenme, seyrek temsil ve transfer öğrenme çerçeveleri, geleneksel makine öğrenimi teknikleriyle karşılaştırıldığında oldukça başarılı ve çok yönlü olmasına dayandırmışlardır. Panagakis ve Kotropoulos [12], yeni müzik sınıflandırma çervevesi sunmuşlardır. Bu çerçevede, müzik temsili için kortikal temsillere başvururken, tür sınıflandırması için seyrek temsile dayalı sınıflandırma kullanılmışlardır. Ses analizi müzik haricinde duygu analizi ([13]), aktivite ([14]), hastalık ([15-17]), aksan ([18]) tespiti ve robotik ([19]) gibi birçok alanda da uygulanmaktadır.

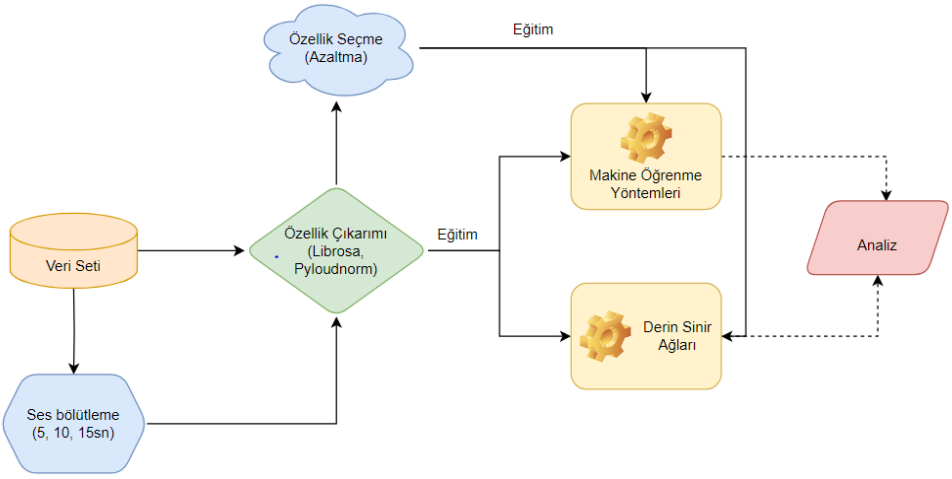
Çalışmada spektogram gibi görüntüden yararlanan özellikler kullanılmadan, ses karakteristik özellikleri ile müzik türlerinin tespit edilmesi amaçlanmaktadır. GTZAN veri setine ait müzik seslerinden çıkarılan ses karakteristik özellikleri ile makine öğrenme yöntemleri ve derin sinir ağı (deep neural network - DNN) modeli eğitilerek müzik türünü sınıflandırmanın başarısı ölçülmektedir. Analiz aşamasında, 3, 5, 10, 15, 30sn'lik ses bölütleme işlemi ve çıkarılan özellikler üzerinde özellik seçme yöntemleri uygulamanın etkisi de araştırılmaktadır. Çalışmanın katkıları şunlardır:

- Sadece ses karakteristik özellikleri ile analiz gerçekleştirilmiştir.
- Ses bölütlemenin analize olumlu etkisi gösterilmiştir.
- Özellik seçme yöntemleri kıyaslanarak ses bölütleme ile etkisi araştırılmıştır.

Çalışmanın akışı düşünüldüğünde, veri seti ve makine öğrenme yöntemleri gibi kullanılan tüm materyal ve metotlar ikinci başlık altında anlatılmaktadır. "Bulgular" başlığı altında ise uygulanan tüm analizler tablo ve şekiller ile beraber açıklanmaktadır. Çalışmanın sonuçlarının değerlendirilip tartışılması ise dördüncü başlık altında gerçekleştirilmektedir. "Sonuç" başlığı altında ise çalışmanın özetiyle beraber sonucu aktarılmaktadır.

2 Materyal ve metot

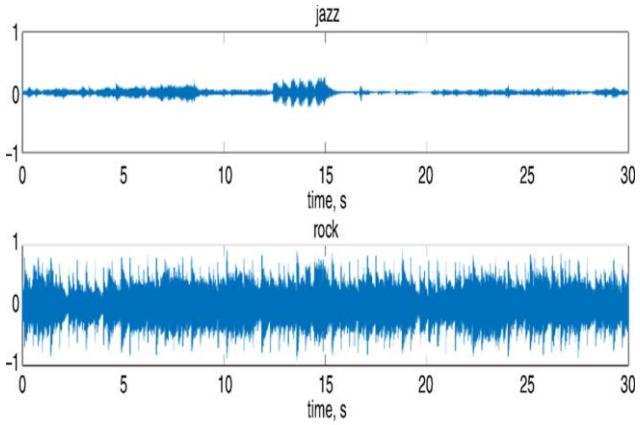
Veri seti, özellik seçme teknikleri, makine öğrenme yöntemleri ve DNN algoritması bu başlık altında anlatılmaktadır. İlk aşamada veri setindeki ses dosyaları Librosa kütüphanesi aracılığıyla sayısal verilere dönüştürülerek ses karakteristik özellikleri çıkarılmaktadır. Ses dosyalarının normal özellik çıkarımına ek olarak hem ses bölütleme (3, 5, 10, 15, 30sn), hem de özellik seçme yöntemi uygulanarak bu özellikler ile yeni eğitim dosyaları elde edilmiştir. Tüm bu varyasyonlar ile Naïve Bayes (NB), k-en Yakın Komşu (K-NN), Rastgele Orman (RO), Destek Vektör Makineleri (DVM), Lojistik Regresyon (LR), Ekstrem Gradient Artırma (XGB) makine öğrenme ve DNN yöntemleri eğitilerek sistemlerin başarısı analiz edilmiştir. Sistemin işleyişine ait metodoloji Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Sistemin metodolojisi

2.1 Veri seti

Müzik türlerini sınıflandırma açısından değerlendirmek için GTZAN veri seti [20] kullanılmıştır. Veri seti; toplam 10 sınıf tan, her biri için 100 tane olmak üzere 1000 müzik içermektedir. Her biri 30sn olan müziklerin örnekleme frekansı 22.500 Hz, çözünürlüğü ise 16 bittir. GTZAN'daki müzik türleri blues, klasik, country, disko, hip-hop, jazz, metal, pop, reggae ve rock'tır [20]. GTZAN veri setine ait müzik türlerinin zaman domaininde gösterimine ait bir örnek Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde jazz ve rock müzik türünün görüntüsünün farklı olduğu gözükmektedir.



Şekil 2. Zaman domaininde örnek veri gösterimi [5]

2.2 Özellik çıkarım kütüphaneleri

Ses karakteristik özelliklerinin çıkarılması için librosa[1] ve pyloudnorm[2] kütüphanesi kullanılmıştır. Librosa, müzik ve ses analizi için bir python paketidir. Müzik bilgisi alma sistemleri oluşturmak için gerekli yapı taşlarını, özelliklerini sağlamaktadır [21]. Pyloudnorm ise ses yüksekliğinin ölçülmesini sağlayan bir Python kütüphanesidir [22]. Bu kütüphaneler aracılığıyla çıkarılan özellikler Tablo 1'de verilmiştir. Tablo incelendiğinde frekans domaininde olan spectral özelliklerin maksimum, minimum, ortalama, medyan, standart sapma, uzunluk (range), basıklık (kurtosis), çarpıklık (skew) değerleri de özellik olarak çıkarılmaktadır. Mel-frequency cepstral coefficients (MFCC) özelliğinin ise normal ve birinci türevinin değerleri alınarak yine minimum, maksimum, vs. değerleri elde edilmektedir. Buradaki varyasyonların hepsi göz önüne alındığında toplam çıkarılan özellik sayısı her bir ses kaydı için 242'dir. Tüm özellikler üzerinde eğitim ve test işlemi makine öğrenme yöntemleri ve derin sinir ağları ile gerçekleştirildikten sonra, özellik seçme yöntemleri uygulanarak özellik sayısı azaltılmaktadır. Seçilerek elde edilen yeni özellikler ile makine öğrenme ve derin sinir ağları yöntemlerinde eğitim ve test işlemi gerçekleştirilmektedir.

Tablo 1. Kütüphaneler aracılığı ile çıkarılan özellikler

Kütüphane	Çıkarılan Özellik
Librosa	Spectral centroid
	Spectral flux
	Spectral bandwidth
	Spectral flatness
	Spectral rolloff
	Zero crossing rate
	Root mean squared error
	Chromagram
	Harmonic
	Tempo
	Mel-frequency cepstral coefficients
Pyloudnorm	Loudness

2.3 Özellik Seçme Yöntemleri

Çıkarılan özellikler arasında en uygunları seçebilmek ve özellik sayısını azaltabilmek için özellik seçme yöntemleri kullanılmaktadır. 242 olan özellik sayısı yöntemlere göre 50-100 arasında özelliğe düşürülmektedir. Çalışmada kullanılan özellik seçme yöntemleri şunlardır:

- Geri Yönlü Eleme (Backward Feature Elimination - BFE): Prosedür, tüm özeliklerle başlamaktadır. Her adımda, kümede kalan en kötü özellik kaldırılmaktadır [23].
- Düşük Varyans Filtresi (Low Variance Filter - LVF): Her bir sütuna ait varyans değeri hesaplanarak varyans değeri belirli bir eşikten düşük olan özellikleri kaldırmaktadır. Sadece sayısal sütunlar için bu yöntem kullanılmaktadır [24].
- Ki-kare (Chi Square - CS): Sınıflandırma modellerinin performansını artıran özellikleri seçmek için "Ki-kare" istatistiklerini kullanmaktadır. Yöntem özelliklerin hedef sınıfa bağımlılığı veya bağımsızlığı kavramına dayanmaktadır [25].
- Özyinelemeli Özellik Eleme (Recursive Feature Elimination - RFE): RFE, sarmalayıcı tipi bir özellik seçim algoritmasıdır. Bu, yöntemin özünde farklı bir makine öğrenimi algoritmasının verildiği (SVM, RF, vs.) ve kullanıldığı, RFE tarafından sarıldığı ve özelliklerin seçilmesine yardımcı olmak için kullanıldığı anlamına gelmektedir [26].

2.4 Makine öğrenme yöntemleri

Özellik çıkarım, ses bölütleme ve özellik seçme işlemleri uygulanması ile eğitim ve test aşamasında makine öğrenme yöntemleri kullanılmaktadır. Kullanılan makine öğrenme yöntemleri:

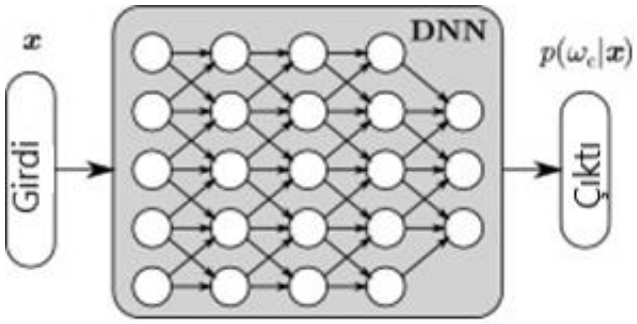
[1] https://librosa.org/doc/latest/index.html

[2] https://github.com/csteinmetz1/pyloudnorm

- Naïve Bayes: Olasılık prensiplerine göre hesaplama yapılarak, verilerin sınıfını olasılıksal tespit etmeyi amaçlamaktadır [27].
- Rastgele Orman: Veri setinden birden fazla eğitim veri seti elde ederek her bir önyüklemeli eğitim veri seti için bir ağaç üretmektedir. Test aşamasında ağaçların çoğunluk oyu ile sınıflandırma yapılmaktadır [28].
- k-En Yakın Komşu: Belirlenen k sayıda yakın komşunun mesafesini inceleyerek test edilecek bir verinin hangi sınıfa atanacağını belirlemektedir [29].
- Lojistik Regresyon: Sınıflandırılmış bağımlı bir değişken ile birden çok bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi, en az değişkeni kullanarak en iyi uyum ile tanımlamaya çalışan bir algoritmadır [30].
- Extreme Gradient Boosting: Karar ağacı altyapısını kullanarak eğim boosting yöntemini hesaplamalara dahil eden algoritmadır [31].
- Destek Vektör Makineleri: İki veya fazla sınıflı verileri birbirinden ayırabilecek en uygun olan n-boyutlu hiper düzlemi bulma esasına dayanmaktadır [32].

2.5 Derin sinir ağları

Bir DNN, nöronların önceki katmandan nöron aktivasyonlarını girdi olarak aldığı ve basit bir hesaplama gerçekleştirdiği (örneğin, girdinin ağırlıklı bir toplamı ve ardından doğrusal olmayan bir aktivasyon) birden çok katman dizisinde düzenlenmiş bir nöron koleksiyonudur. Ağın nöronları, girdiden çıktıya karmaşık doğrusal olmayan



Şekil 3. DNN mimarisine bir örnek [33]

bir eşlemeyi (mapping) ortaklaşa uygulamaktadır. Bu eşleme, hata geri yayılımı yöntemi kullanılarak her bir nöronun ağırlıklarının uyarlanmasıyla verilerden öğrenilmektedir [33]. Örnek bir DNN yapısı Şekil 3'te gösterilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

Librosa ve pyloudnorm kütüphaneleri ile çıkarılan tüm özellikler üzerinde ilk olarak normalizasyon işlemi uygulanmıştır. Bunun nedeni verilerin belli bir standarta getirilmesidir. Normalizasyon tekniği olarak standartscaler (standart ölçeklendirici) kullanılmıştır. Bu yöntem ile veri setinin her bir öznitelik değerinin ortalaması sıfır ve standart sapması bir olacak şekilde yeniden ölçeklendirilmektedir.

Her bir verisi 30sn olan normal veri setine ait normalize edilen tüm özellikler makine öğrenme ve derin sinir ağları yöntemlerine verilmiştir. Eğitim esnasında ayrıca 5-katmanlı çapraz doğrulama yönteminden de yararlanılmıştır. Tüm aşamalarda veri setinin %80'i eğitim, %20'si ise test aşaması için kullanılmıştır. 30sn'lik ses kayıtlarından oluşan 10 sınıflı veri setine ait yöntemlerin başarısı Tablo 2'de verilmiştir. DNN için epoch sayısı 50 belirlenerek öğrenme oranına göre erken durdurma uygulanmıştır. Tablodaki sonuçlara göre, en yüksek doğruluk ve F1-skor değerini normal analiz sonucunda XGB yöntemi vermiştir.

Tablo 2. 30sn'lik veri setinin yöntemlerdeki başarısı (%)

	Normal Analiz		*5-Çapraz Doğrulama*	
Yöntem	**F1-skor**	**Doğruluk**	**F1-skor**	**Doğruluk**
NB	67.48	67.50	64.61	65.16
K-NN	42.27	43.50	72.01	72.07
RO	79.95	80.00	74.21	74.67
DVM	36.56	39.50	76.80	77.17
LR	50.11	51.00	78.40	78.67
XGB	**80.87**	**81.00**	78.02	78.37
DNN	76.86	76.99	80.50	80.25

Sonraki aşamada literatürde sık kullanılan ses bölütleme işlemi 30sn'lik veri setine uygulanmıştır. 3'er, 5'er, 10'ar ve 15'er sn olmak üzere 30sn'lik ses kaydı parçalara ayrılarak daha fazla ses kaydı elde edilmiştir (3'er sn'lik yaklaşık 10 kat, 5'er sn'lik yaklaşık 6 kat, 10'ar sn'lik yaklaşık 3'er kat, 15'er sn'lik yaklaşık 2 kat fazla eğitim-test verisi). Ses bölütleme işlemi sonrası ses kaydı ve özellik sayısı Tablo 3'te verilmiştir. Tablo incelendiğinde bölütleme yapılacak saniye sayısı azaldıkça, ses kaydı ve özellik sayısının arttığı gözükmektedir.

Tablo 3. Ses bölütleme sonucu ses kaydı ve özellik sayısı

Ses bölütleme (sn)	**Toplam ses kaydı**	**Özellik sayısı**
3	9980	9980 x 242
5	5984	5984 x 242
10	2987	2987 x 242
15	1988	1988 x 242
30	999	999 x 242

Ses bölütleme işlemi sonrası tüm çıkarılan özelliklere ait dosyalar, makine öğrenme ve derin sinir ağlarına eğitim ve test aşaması için verilmiştir. Ayrıca 5-katmanlı çapraz doğrulamanın da analize etkisi araştırılmıştır. Ses bölütleme işlemine göre tüm yöntemlerin başarısı Tablo 4'te gösterilmektedir. Tablodaki sonuçlar gösteriyor ki en yüksek F1-skor ve doğruluk değeri 3sn'lik ses kaydı içeren veriler ile XGB yönteminde elde edilmiş ve Tablo 3'e göre doğruluk değeri artışı sağlanmıştır.

Tablo 4. Ses bölütleme uygulanan veri setinin yöntemlerdeki başarısı (%)

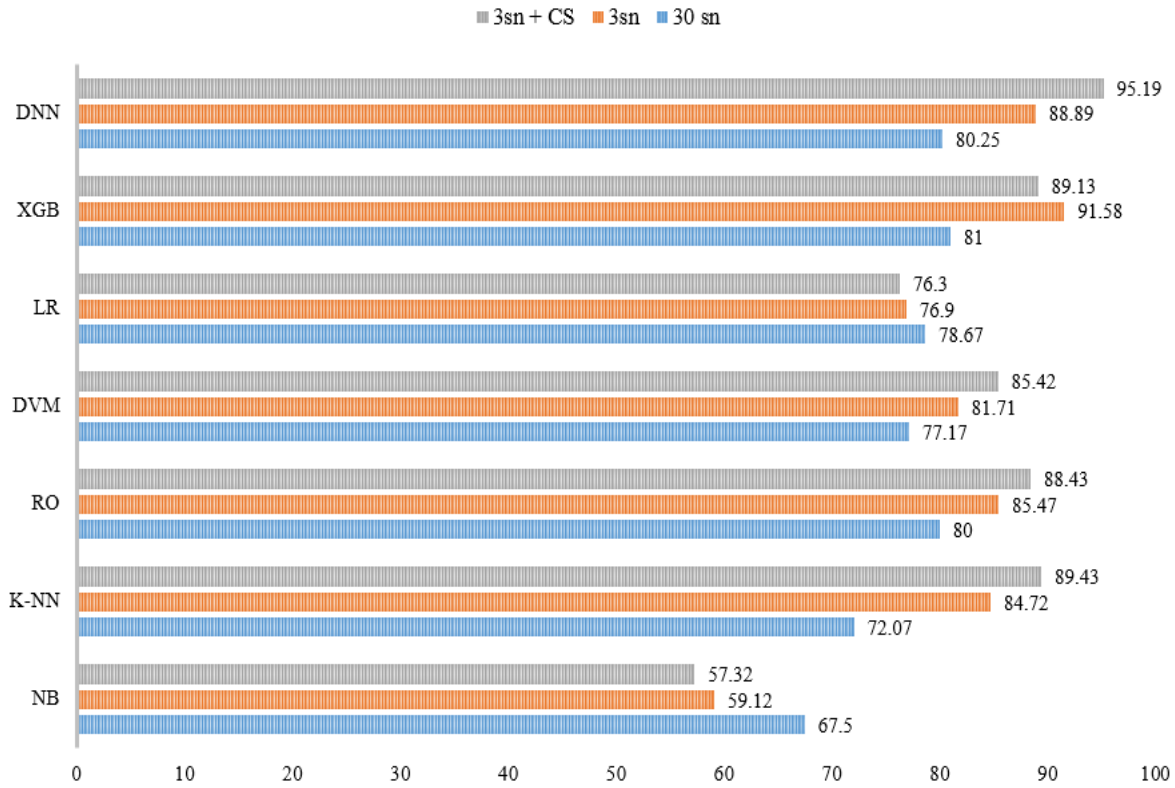
		5-Çapraz Doğrulama = Yok						
		NB	**K-NN**	**RO**	**DVM**	**LR**	**XGB**	**DNN**
3sn	***F1-skor***	58.54	84.77	85.40	81.60	76.81	**91.58**	88.98
	Doğruluk	59.12	84.72	85.47	81.71	76.90	**91.58**	88.89
5sn	***F1-skor***	60.08	49.29	84.87	38.13	45.48	89.68	88.91
	Doğruluk	60.65	49.88	84.96	41.02	46.95	89.72	88.47
10sn	***F1-skor***	64.10	47.47	82.39	41.56	49.52	85.88	84.59
	Doğruluk	64.72	49.16	82.61	44.31	50.84	85.95	84.28
15sn	***F1-skor***	61.33	44.26	77.75	37.42	45.24	84.36	83.64
	Doğruluk	61.81	45.48	77.89	40.45	46.23	84.42	83.67
		5-Çapraz Doğrulama = Var						
3sn	***F1-skor***	55.81	69.91	70.83	74.33	71.73	78.14	89.49
	Doğruluk	56.68	69.99	71.34	74.53	71.95	78.26	89.44
5sn	***F1-skor***	58.90	71.30	72.19	76.23	74.85	77.22	88.54
	Doğruluk	59.42	71.02	72.64	76.27	75.00	77.29	88.82
10sn	***F1-skor***	61.31	73.18	73.87	76.93	76.72	77.97	83.68
	Doğruluk	61.57	72.85	74.39	76.17	76.80	78.07	83.72
15sn	***F1-skor***	62.87	73.62	74.89	77.98	78.39	78.11	80.60
	Doğruluk	63.33	73.29	75.30	78.07	78.42	78.22	80.67

Ses bölütleme yapılma işleminin ardından 3, 5, 10, 15, 30sn'lik oluşturulan tüm dosyalar üzerinde BFE, LVF, CS, RFE özellik seçme yöntemleri kullanılarak çıkarılan özellikler azaltılmıştır. Azaltılan özellikler üzerinde tüm sistem yeniden eğitilerek test edilmiştir. Özellik azaltılmanın makine öğrenme ve derin sinir ağları yöntemleri üzerindeki etkisi Tablo 5'te gösterilmiştir. Tablo incelendiğinde özellik seçme uygulanması ve ses bölütleme işlemi ile daha başarılı sınıflandırma yapılabildiği gösterilmiştir. Her sn veri seti için normal veri setine göre başarı artışı sağlanmıştır. Sırasıyla en yüksek F1-skor ve doğruluk değerleri, 3sn'lik ses kayıtları ile CS özellik seçme yöntemleri kullanılarak %95.37, %95.19 ile elde edilmiştir. Çalışmanın her aşaması için en iyi F1-skor ve doğruluk değerleri kullanılması sonucunda analizlerin etkileri Şekil 4'te gösterilmiştir. Ses bölütleme işlemi ve özellik seçme yöntemleri uygulanmasıyla başarı oranında artış sağlanmıştır.

En son aşamada 10 müzik türü için en başarılı yöntemlerin sınıflandırma raporları çıkarılmıştır. Bunun sonucunda hangi müzik türlerinin her aşamada daha doğru tespit edildiği analiz edilmiştir. İlk olarak 30sn için en başarılı olan XGB yöntemine ait sınıflandırma raporu Tablo 6'da gösterilmiştir. Sınıflandırma raporuna göre rock etiketine sahip müzik türleri en başarısız olarak sınıflandırılırken, klasik etiketli müzik türü en başarılı olarak sınıflandırılmıştır. Bir diğer analiz için ise ses bölütleme ve özellik seçme işlemleri sonrası en başarılı olan 3sn'lik ses kayıtları için CS özellik seçme yöntemi seçilmiştir. Bu yönteme ait sınıflandırma raporu Tablo 7'de verilmiştir. Tablo incelendiğinde klasik ve hiphop müzik türü en başarılı sınıflandırılırken, rock müzik türü en başarısız sınıflandırılmıştır. Bunun nedeni olarak rock müzik türünün reggae, hip-hop, metal gibi temposu benzer müzik türleriyle karışması belirtilebilir.

Tablo 5. Ses bölütleme ve özellik seçme yöntemlerine göre yöntemlerin başarısı (%) (sırasıyla F1-skor, doğruluk)

Sn	Yöntem	*NB*	*K-NN*	*RO*	*DVM*	*LR*	*XGB*	*DNN*
3sn	*BFE*	47.78, 48.55	67.57, 67.79	70.35, 70.69	63.04, 63.33	54.28, 55.11	70.92, 70.89	94.72.94.64
	CS	55.53, 57.32	89.38, 89.43	88.39, 88.43	85.36, 85.42	76.21, 76.30	89.17, 89.13	**95.37, 95.19**
	LVF	41.01, 43.74	67.78, 67.89	71.29, 71.54	61.26, 61.92	51.03, 52.86	70.91, 70.94	95.16, 95.14
	RFE	55.53, 57.32	89.38, 89.43	88.33, 88.38	85.36, 85.42	76.21, 76.30	89.17, 89.13	94.97, 94.40
5sn	*BFE*	54.25, 55.56	76.57, 76.69	75.85, 76.19	73.43, 73.52	62.44, 63.16	78.50, 78.53	81.17, 80.87
	CS	59.69, 60.90	86.48, 86.55	87.66, 87.72	87.10, 87.14	78.78, 78.86	89.05, 89.06	94.02, 93.82
	LVF	46.87, 49.12	73.70, 73.94	78.59, 78.53	68.78, 68.92	58.27, 59.15	80.43, 80.45	83.81, 83.54
	RFE	59.69, 60.90	86.48, 86.55	87.58, 87.64	87.10, 87.14	78.78, 78.86	89.05, 89.06	93.56, 93.57
10sn	*BFE*	55.43, 56.19	69.74, 69.90	70.83, 71.41	69.35, 69.73	61.12, 62.21	73.32, 73.58	73.96, 73.71
	CS	63.21, 64.38	80.43, 80.60	82.64, 82.78	84.70, 84.78	78.38, 78.60	84.66, 84.78	90.57, 90.47
	LVF	52.49, 54.85	70.25, 70.40	78.79, 78.93	75.56, 75.75	65.86, 66.39	81.02, 81.10	84.39, 84.28
	RFE	63.21, 64.38	80.43, 80.60	85.35, 85.45	84.70, 84.78	78.38, 78.60	84.66, 84.78	89.99, 89.80
15sn	*BFE*	50.30, 51.51	60.49, 60.80	67.04, 67.59	62.99, 63.32	57.61, 58.79	68.46, 68.34	69.06, 68.59
	CS	67.11, 67.34	78.27, 78.14	81.80, 81.91	83.28, 83.17	78.94, 79.15	84.82, 84.93	87.92, 87.44
	LVF	50.97, 53.02	67.34, 67.09	79.14, 79.15	73.86, 73.87	71.12, 71.36	81.25, 81.16	82.69, 82.16
	RFE	67.11, 67.34	78.27, 78.14	82.35, 82.41	83.28, 83.17	78.94, 79.15	84.82, 84.93	86.40, 85.93
30sn	*BFE*	62.95, 63.00	72.67, 72.00	76.57, 77.00	78.67, 79.00	75.11, 75.50	74.33, 74.50	81.35, 79.00
	CS	70.15, 70.00	75.34, 76.00	78.49, 78.50	86.91, 87.00	82.32, 82.50	81.06, 81.50	82.59, 82.00
	LVF	64.10, 64.50	66.91, 67.50	75.62, 76.00	78.46, 78.50	77.50, 77.50	81.33, 81.50	76.55, 78.50
	RFE	70.15, 70.00	75.34, 76.00	80.25, 80.50	86.91, 87.00	82.32, 82.50	81.06, 81.50	81.99, 80.50



Şekil 4. Her aşama için en başarılı yöntemlerin doğruluk değerlerini içeren grafik (%)

Tablo 6. 30sn'lik veri seti için XGB yönteminin sınıflandırma raporu

Etiketler	Kesinlik	Geri Çağırma	F1-skor	Destek
Disko	0.73	0.76	0.74	21
Metal	0.75	1	0.86	12
Reggae	0.75	0.88	0.81	24
Blues	0.86	0.82	0.84	22
Rock	0.5	0.47	**0.48**	15
Klasik	0.93	0.96	**0.95**	28
Jazz	0.86	0.71	0.77	17
Hiphop	0.94	0.84	0.89	19
Country	0.8	0.73	0.76	22
Pop	0.89	0.85	0.87	20
Doğruluk			**0.81**	200
Makro ort.	0.8	0.8	0.8	200
Ağırlıklı ort.	0.81	0.81	0.81	200

Tablo 7. 3sn'lik ses bölütleme veri seti için CS yöntemi sonrası DNN yönteminin sınıflandırma raporu

Etiketler	Kesinlik	Geri Çağırma	F1-skor	Destek
Disko	0.93	0.94	0.93	186
Metal	0.98	0.95	0.96	192
Reggae	0.95	0.98	0.96	202
Blues	0.96	0.97	0.97	206
Rock	0.90	0.92	0.91	192
Klasik	0.98	0.97	0.97	206
Jazz	0.95	0.96	0.96	189
Hiphop	0.96	0.97	0.97	218
Country	0.95	0.92	0.93	189
Pop	0.96	0.96	0.96	216
Doğruluk			**0.95**	1996
Makro ort.	0.95	0.95	0.95	1996
Ağırlıklı ort.	0.95	0.95	0.95	1996

Geçmiş çalışmalarda kullanılan GTZAN veri setinin başarı kıyaslaması Tablo 8'de verilmiştir. Ses bölütleme ve özellik seçme yöntemlerinin etkisi analiz edildiğinde çalışma başarı konusunda ön plana çıkmıştır. Diğer çalışmalarda spektrogram ile görüntü analizi de yoğunlukta olduğundan, bu çalışma sadece ses üzerine analiz gerçekleştirme açısından özgündür.

Tablo 8. Geçmiş çalışmalar ile başarı kıyaslaması

Çalışma	Doğruluk (%)
Cheng vd. [8]	83.3
Nanni vd. [9]	90.7
Ghildiyal vd. [5]	91.0
Senac vd. [6]	91.0
Prabhakar ve Lee [11]	93.5
Panagakis ve Kotropoulos [12]	93.7
Çalışmanın Başarısı	**95.2**
Barros vd. [10]	96.4
Elbir ve Aydin [4]	97.6

4 Sonuçlar

Çalışmada GTZAN veri seti kullanılarak müzik türlerinin sınıflandırması amaçlanmıştır. Sınıflandırma için spektogram gibi görüntü özelliklerinden ziyade sayısal değerlere sahip özelliklerden (mfcc, tempo, flux, vs.) yararlanılmıştır. Analiz aşamasında ses bölütleme ve özellik seçme yöntemlerinin müzik türlerini sınıflandırmaya etkisi de araştırılmıştır. Bunun için 3, 5, 10, 15sn'lik ses bölütleme işlemi ve RFE, LVF, CS, BFE özellik seçme yöntemleri sisteme uygulanmıştır.

İlk aşamada 30sn'lik veri setinin özellikleri çıkarılarak makine öğrenme ve DNN yöntemleriyle analiz edilmiştir. Analiz sonucunda XGB yöntemi %81.00'lik doğruluk değeri elde etmiştir. Sonraki aşamada ses bölütleme işlemi uygulanarak ses kaydı sayısı artırılmış ve daha fazla eğitim-test verisi elde edilmiştir. Ses bölütleme işlemi ile eğitilen sistemde 3sn için %91.58, 5sn için %89.72, 10sn için %85.95, 15sn için ise %84.42'lik doğruluk değerleri XGB yöntemi ile elde edilmiştir. Makine öğrenme yöntemleri incelendiğinde XGB yöntemleri diğer tüm yöntemlerden daha başarılı olmuştur. Bu analizlerin sonucunda, 30sn'lik ses kaydının test sonuçlarına göre %10.58 doğruluk değeri artışı sağlanmıştır. Bunun nedeni olarak ses kaydı sayısının artması ve müzik türlerinin daha belirgin eğitilmesi gösterilebilir.

Ses bölütleme işlemi sonrasında, elde edilen veri setlerine özellik seçme yöntemleri uygulanmıştır. Özellik seçme yöntemleri uygulanması ile elde edilen analizler sonucunda, tüm veri setlerinde başarı artışı sağlanmıştır. En yüksek başarı, 5sn ses kaydı için CS uygulanması ile DNN yöntemi kullanılarak %95.19 doğruluk değeri ile elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde özellik seçme yöntemleri uygulandığında en iyi özellikler seçilerek eğitim-test işlemi gerçekleştirilmektedir. Böylece başarı artışı sağlanmıştır. Ses bölütleme işlemi ve özellik seçme uygulanması sonucunda %14.19'luk doğruluk değeri artışı gerçekleşmiştir.

Müzik türlerinin kendi içerisinde başarısı da analiz edilmiştir. Bunun için, 30sn'lik ses kaydına herhangi işlem uygulanmadan elde edilen en iyi başarıya sahip XGB ve 3sn'lik CS yöntemi uygulanması ile en başarılı olan DNN yönteminin sınıflandırma raporları incelenmiştir. Raporların sonuçları rock müzik türünün daha zor, en kolay ise klasik müzik türünün tespit edilebildiğini göstermiştir.

Gelecek çalışmalar sağlık alanında ses analizi çalışmalarına odaklanılması planlanmaktadır. Hastalık evreleri tespiti, hastalığın olup olmadığı ses analizi yoluyla elde edilmeye çalışılacaktır.

Çıkar çatışması

Çıkar çatışması yoktur.

Benzerlik oranı (Turnitin): %9

Kaynaklar

[1] M. B. Gulmezoglu, V. Dzhafarov, M. Keskin, and A. Barkana, A novel approach to isolated word recognition. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 7(6), 620-628, 1999. https://doi.org/10.1109/89.799687

[2] S. Keser, Improvement of face recognition performance using a new hybrid subspace classifier. Signal, Image and Video Processing, 17(5), 2511-2520, 2023.

[3] N. Pelchat and C. M. Gelowitz, Neural network music genre classification. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 43(3), 170-173, 2020. https://doi.org/10.1109/CJECE.2020.2970144

[4] A. Elbir and N. Aydin, Music genre classification and music recommendation by using deep learning. Electronics Letters, 56(12), 627-629, 2020. https://doi.org/10.1049/el.2019.4202

[5] A. Ghildiyal, K. Singh and S. Sharma, Music genre classification using machine learning. In 2020 4th international conference on electronics, communication and aerospace technology (ICECA), pp. 1368-1372, India, 5-7 November 2020.

[6] C. Senac, T. Pellegrini, F. Mouret and J. Pinquier, Music feature maps with convolutional neural networks for music genre classification. In Proceedings of the 15th international workshop on content-based multimedia indexing, 1-5, Florence, Italy, 19-21 June 2017. https://doi.org/10.1145/3095713.3095733

[7] H. Bahuleyan, Music genre classification using machine learning techniques. arXiv preprint, 2018. arXiv:1804.01149.

[8] Y. H. Cheng, P. C. Chang and C. N. Kuo, Convolutional neural networks approach for music genre classification. In 2020 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C), 399-403, Taiwan, 13-16 November 2020. https://doi.org/10.1109/IS3C50286.2020.00109

[9] L. Nanni, Y. M. Costa, D. R. Lucio, C. N. Silla Jr, and S. Brahnam, Combining visual and acoustic features for audio classification tasks. Pattern Recognition

Letters, 88, 49-56, 2017. https://doi.org/10.1016/j.patrec.2017.01.013
[10] P. Barros, C. Weber, and S. Wermter, Learning auditory neural representations for emotion recognition. In 2016 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 921-928, July 2016.
[11] S. K. Prabhakar, and S. W. Lee, Holistic approaches to music genre classification using efficient transfer and deep learning techniques. Expert Systems with Applications, 211, 118636, 2023. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118636
[12] Y. Panagakis, and C. Kotropoulos, Music genre classification via topology preserving non-negative tensor factorization and sparse representations. In 2010 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 249-252, March 2010.
[13] C. Bakir, and M. Yuzkat, Speech emotion classification and recognition with different methods for Turkish language. Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering, 6(2), 122-128, 2018. https://doi.org/10.17694/bajece.419557
[14] M. Sharma, S. Joshi, T. Chatterjee, and R. Hamid, A comprehensive empirical review of modern voice activity detection approaches for movies and TV shows. Neurocomputing, 494, 116-131, 2022. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.04.084
[15] O. Karaman, H. Çakın, A. Alhudhaif and K. Polat, Robust automated Parkinson disease detection based on voice signals with transfer learning. Expert Systems with Applications, 178, 115013, 2021. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115013
[16] C. Quan, K. Ren and Z. Luo, A deep learning based method for Parkinson's disease detection using dynamic features of speech. IEEE Access, 9, 10239-10252, 2021. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3051432
[17] O. Amir, W.T. Abraham, Z. S. Azzam, G. Berger, S. D. Anker, S. P. Pinney, D. Burkhoff, I. D. Shallom, C. Lotan and E. R. Edelman, Remote speech analysis in the evaluation of hospitalized patients with acute decompensated heart failure. Heart Failure, 10(1), 41-49, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jchf.2021.08.008
[18] Z. Al-Jumaili, T. Bassiouny, A. Alanezi, W. Khan, D. Al-Jumeily and A. J., Hussain, Classification of spoken English accents using deep learning and speech analysis. In International Conference on Intelligent Computing, 277-287, Xi'an, China, 7-11 August 2022.
[19] O. F. Çıplak, ve S. Keser, Gerçek Zamanlı Ses Tanıma ile Robot Kolu Kontrolü. Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi, (31), 34-39, 2021. https://doi.org/10.31590/ejosat.969608
[20] G. Tzanetakis, and P. Cook, Musical genre classification of audio signals. IEEE Transactions on speech and audio processing, 10(5), 293-302, 2002. https://doi.org/10.1109/TSA.2002.800560
[21] B. McFee, C. Raffel, D. Liang, D. P. Ellis, M. McVicar, E. Battenberg and O. Nieto, librosa: Audio and music signal analysis in python. In Proceedings of the 14th python in science conference, 18-25, Texas, (8), 6-12 July 2015.
[22] C. J. Steinmetz, and J. Reiss, pyloudnorm: A simple yet flexible loudness meter in Python. In Audio Engineering Society Convention 150. Audio Engineering Society, 2021.
[23] J. Han, M., Kamber and J. Pei, Data preprocessing. Data Mining (Third Edition). The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems, pp. 83-124, 2012.
[24] L. V. Filter, and P. Filter, Seven techniques for dimensionality reduction. Technical report, 2014.
[25] A. Sikri, N. P. Singh, and S. Dalal, Chi-Square Method of feature selection: impact of pre-processing of data. International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering, 11(3s), 241-248, 2023.
[26] I. Guyon, J. Weston, S. Barnhill, and V. Vapnik, Gene selection for cancer classification using support vector machines. Machine learning, 46, 389-422, 2002.
[27] Ö. Şahinaslan, H. Dalyan, ve E. Şahinaslan. Naive bayes sınıflandırıcısı kullanılarak youtube verileri üzerinden çok dilli duygu analizi. Bilişim Teknolojileri Dergisi, 15 (2), 221-229, 2022. http://doi.org/10.17671/gazibtd.999960
[28] E. Çavuş ve İ. Sancaktar, Batarya sağlık durumunun makine öğrenmesi ile kestirimi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11 (3), 601-610, 2022. https://doi.org/10.28948/ngumuh.1112985.
[29] N. Akyel ve K. Seçkin. K-en Yakin Komşuluk Algoritmasının Hile Denetiminde Kullanımı. Journal of Accounting and Taxation Studies, 5(1), 21-40, 2012.
[30] A. C. Başara ve Y. Şişman, Frekans oranı, kanıt ağırlığı ve lojistik regresyon yöntemleri kullanılarak heyelan duyarlılık haritalarının CBS tabanlı karşılaştırılması. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11 (3), 647-660, 2022. https://doi.org/10.28948/ngumuh.1065284
[31] A. C. Kelle ve H. Yüce, MQTT Trafiğinde DoS Saldırılarının Makine Öğrenmesi ile Sınıflandırılması ve Modelin SHAP ile Yorumlanması. Journal of Materials and Mechatronics: A, 3(1), 50-62, 2022.
[32] M. Açıkkar, Prediction Of Gross Calorific Value Of Coal From Proximate And Ultimate Analysis Variables Using Support Vector Machines With Feature Selection. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9 (2), 1129-1141, 2020. https://doi.org/10.28948/ngumuh.585596.
[33] G. Montavon, W. Samek, and K. R. Müller, Methods for interpreting and understanding deep neural networks. Digital signal processing, 73, 1-15, 2018.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 334-341

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Entegre sabit biyofilm sistem ile karbon, azot ve fosfor gideriminin araştırılması

Investigation of carbon, nitrogen and phosphorus removal with integrated fixed biofilm systems

Jamila Mohamad[1,*], Mustafa Işık[2]

[1,2] *Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray, Türkiye*

Öz

Klasik aktif çamur sistemleri, evsel atıksu arıtımında yüz yıldan uzun bir süredir kullanılmaktadır. Ancak son yıllarda su kaynaklarının korunması için sadece karbon giderimi değil, azot ve fosfor giderimi de gereklilik haline gelmiştir. Bu bağlamda bilim insanları, etkili ve sürdürülebilir çözümler arayışındadır. Bu çalışmada, klasik aktif çamur prosesine sabit biyofilm entegre edilerek oluşturulan entegre biyolojik aktif çamur (EBAÇ) prosesi, ardışık kesikli reaktör (AKR) ile birleştirerek uygulanmıştır. EBAÇ-AKR sistemi, ardışık kesikli reaktöre, %40 doluluk hacminde hareketli destek materyali ilave edilerek anaerobik(An) / aerobik(Ox) / anoksik (Ox) faz sırası, 36 saat hidrolik bekleme süresi (HBS) ve 11.8 gün çamur yaşı (ÇY) ile işletilerek uygulanmıştır. Çalışma aşamalarında ortalama kimyasal oksijen ihtiyacı (KOI) %92.7, toplam azot (TN) %79.5 ve fosfat fosforu (PO_4-P) giderimi %59.3 olarak elde edilmiştir. Deşarj kriterleri dikkate alındığında reaktör KOI ve TN gideriminde başarılı olurken P gideriminde yetersiz kalmıştır. EBAÇ-AKR reaktörü optimize edilmiş şartlarla atıksu standartlarını sağlama potansiyeli bulunmaktadır.

Anahtar kelimeler: AKR, Arıtım, Atıksu, EBAÇ, Nütrient

Abstract

Classical activated sludge systems have been used for over a century in domestic wastewater treatment. However, in recent years, not only carbon removal but also nitrogen and phosphorus removal have become essential for preserving water resources. In this context, scientists are searching for effective and sustainable solutions. In this study, the integrated biological activated sludge (IFAS) process, which is created by integrating fixed biofilm into the classical activated sludge process, was applied by combining it with a sequential batch reactor SBR). The IFAS-SBR system was applied in the sequencing batch reactor with a 40% volume fill ratio of moving support material, utilizing anaerobic (An)/aerobic (Ox)/anoxic (Ox) cycles, with a 36 hour hydraulic retention time (HRT) and an 11.8-day sludge retention time (SRT). During the operational phases, average removal efficiencies of 92.7% for chemical oxygen demand (COD), 79.5% for total nitrogen (TN), and 59.3% for phosphate phosphorus (PO_4-P) were achieved. Considering discharge criteria, the reactor achieved successful COD and TN removal, but fell short in terms of phosphorus removal. The IFAS-SBR reactor, has the potential to meet wastewater standards under optimized conditions.

Keywords: SBR, Treatment, Wastewater, IFAS, Nutrient

1 Giriş

Organik ve nütrient içeren kentsel ve endüstriyel atıksular genellikle aerobik aktif çamur işlemi kullanılarak arıtılmaktadır. Klasik biyolojik arıtım sistemleri ile arıtılamayan N ve P içeren atıksuların su kaynaklarına ulaşması su kullanımı etkileyen ötrofikasyon başta olmak üzere ciddi su kalite problemlerine neden olmaktadır. Su kaynaklarının sürdürülebilir şekilde yönetimi için atıksu deşarjlarında N ve P giderimi de gerekli olmaya başlamıştır.

Entegre sabit biyofilm aktif çamur (EBAÇ) teknolojisi, dünya çapındaki atıksu arıtma tesislerinde biyolojik nütrient gideriminin (BNR) verimliliğini artırmak için geliştirilen sürdürülebilir sistemlerden bir tanesidir. EBAÇ konfigürasyonunda, biyolojik taşıyıcılar, bakteri için yüzey alanı sağlayarak, geleneksel aktif çamur reaktörlerine entegre edilebilme özelliği taşımaktadır.

Klasik aktif çamur reaktörleri içerisinde yaygın olarak kullanılan reaktör tiplerinden bir tanesi de ardışık kesikli reaktördür (AKR). Sürekli akışlı reaktörlerle karşılaştırıldığında, AKR işletimi daha kolay ve esnektir. AKR'nin tam ölçekli uygulamasında, parametreler (pH, substrat konsantrasyonları ve çözünmüş oksijen gibi) online analizörler tarafından izlenebilir. Biyolojik giderim süreci, zamanlayıcılar veya programlanmış kontrol cihazları ayarlanarak kolayca kontrol edilebilir. Sedimentasyon reaktörün kendisinde gerçekleşeceği için AKR için ayrı çöktürücüye gerek yoktur [1].

Son yirmi yıldan beri EBAÇ sistemleri üzerine araştırmaların sayısı artmıştır. EBAÇ sistemleri hem evsel hem de endüstriyel atıksular için uygun bir seçenek haline gelmeye başlamıştır [2]. 1994 yılından bu yana, EBAÇ teknolojisi, küçük ve kırsal topluluklar için sürdürülebilir bir çözüm sağlayabilen etkin bir seçenek olarak ortaya çıkmıştır [3]. EBAÇ sistemi, biyoreaktörlerde biyokütlenin reaktöre ilave edilen özel biyokütle taşıyıcılar üzerinde çoğaldığı bağlı ve süspanse büyüme ile biyokütle derişimimin artırıldığı ve her iki büyümenin avantajlarının kullanıldığı

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: jamila.mohamad@asu.edu.tr (J. Mohamad)
Geliş / Recieved: 29.08.2023 Kabul / Accepted: 11.12.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1351759

entegre bir sistemdir. Bu entegre sistemle atıksularda kompakt biyokütle ile eş zamanlı olarak karbon, azot ve fosfor gideriminin mümkün olduğuna işaret edilmiştir [4].

EBAÇ sistemleri tek bir tankta karbon ve azot oksidasyonu (nitrifikasyon) için kullanılabilirken [3], anoksik ve anaerobik bölgeler kullanılarak karbon, azot ve fosfor giderimi [5-8] için de çözüm olabilmektedir. EBAÇ proseslerinin sadece karbon oksidasyonu yapan klasik aktif çamur tesislerinin nitrifikasyon kapasitesini artırarak fazlalık hacmi ön anoksik tank olarak kullanıp Değiştirilmiş Ludzack Ettinger prosesine dönüştürerek günümüzde yaygın kullanım potansiyeli bulunmaktadır [4].

Bu çalışmada ile EBAÇ-AKR sistemi ile orta kirlilikte evsel ham atıksuları temsil edecek şekilde hazırlanan sentetik atıksudan destek materyalinin kimyasal oksijen ihtiyacı (KOI), toplam azot (TN) ve toplam fosfor (TP) giderim performansı araştırılmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 Sentetik atıksu bileşimi ve hazırlanması

Bu çalışmada C, N ve P giderimi üzerinde biyofilm taşıyıcı destek materyalinin, çamur yaşı vb. değişkenlerinin etkisini değişen atıksu karakteristiğinden bağımsız olarak araştırabilmek için sentetik atıksu ile çalışılmıştır. Atıksular içerinde C giderimi yanında N ve P giderimi gerekliliği de bulunan, yaygın olarak C, N ve P kirliliği içeren evsel atıksuların KOI, N ve P açısından orta kirlilik düzeyleri [4] dikkate alınarak sentetik atıksu hazırlanmıştır. Çalışma daha çok nütrient giderimi üzerine yoğunlaştığı için TN ve TP derişimleri kuvvetli evsel atıksu, N ve P giderimin de organik madde düşüklüğü kritik olduğu için de kuvvetlinin bir altı orta kirlilikte evsel atıksu özelliklerine göre KOI 508 mg/L, TN 50 mg/L ve TP 10 mg/L olarak belirlenmiştir.

Hazırlanan atıksuyun KOI, N ve P özellikleri Tablo 1'de verilen kimyasal stok çözeltilerinden mL hacim eklenerek ve g tartılarak hazırlanmıştır. Seyreltme işleminde Aksaray çeşme suyu kullanılmış, tüm mikroorganizmalar için gerekli sodyum, potasyum, kalsiyum, klorür, selenyum gibi esas diğer elementler ve mangan, demir, kobalt, nikel, bakır, çinko, molibden, tungsten ve vanadyum gibi iz metallerin çeşme suyundan karşılandığı kabul edilmiştir. Nitrifikasyonda alkalinite tüketiminin olası pH düşüşüne neden olarak P gideren fosfor biriktiren organizma (PAO)'lar ile glikojen biriktiren organizma (GAO)'lar arasındaki rekabette kritik pH 7.25'in altına düşmemesi için [4] besleme suyuna ilave olarak 200 mg $CaCO_3$/L $NaHCO_3$ olarak bikarbonat alkalinitesi eklenmiştir. Çalışmada seyreltme suyu olarak kullanılan çeşme suyunun özellikleri daha önceki yıllarda aynı laboratuvarlarda yapılan çalışmalarda [9] ve bu çalışmada ölçülen değerler karşılaştırıldığında (Tablo 2) çok farklılık göstermemiştir. Çeşme suyundan gelen organik madde, N ve P yükleri hazırlanan sentetik bileşiminde öngörülen derişimlerini çok az artırmıştır. Klorun mikroorganizmalar üzerine olası etkileri düşünülerek en az bir gün bekletilmiş çeşme suyu kullanılmıştır.

Tablo 1. Sentetik atıksu bileşimi hesap tablosu

Parametre	Hedef Derişim, mg/L	Bileşik	Stok		1 L atısu	
			Bileşik, g	Hedef, g/L	Ekleneck hacim, mL	Saf katı, g
KOI	508	Glikoz($C_6H_{12}O_6$)	103.2	100	5.08	0.5243
TN	50	-	-	-	-	-
• Org N	15	CH_4N_2O	21.45	10	1.50	0.0322
• NH_4-N	35	NH_4Cl	38.19	10	3.50	0.1337
TP	10	KH_2PO_4	43.94	10	1.00	0.0439
Alkalinite	200	$NaHCO_3$	67.15	40	5.00	0.3357

Tablo 2. Sentetik atıksu bileşiminde kullanılan çeşme suyunun bazı özellikleri

Parametre	Aralık *	Nisan*	Haziran*	Temmuz-Bu çalışma
pH	7.29	7.00	6.75	7.23
İletkenlik, (µs/cm)	507	482	514	820
Toplam çözünmüş katı madde (TÇKM) (mg/L)	433	401	369	457
Bulanıklık, (NTU)	0.180	0.400	0.910	-
TN (mg/L)	1.30	1.37	1.14	0.780
Sertlik, (mg/L)	192	176	166	324
Alkalinite (mg/L)	236	221	202	300
Oksidasyon, redüksiyon potansiyeli (ORP), (mV)	759	757	609	292
UV_{254}	0.890	0.074	0.052	0.067
Nitrat, (mg/L)	13.7	6.3	5.60	14.5
Sülfat, (mg/L)	48.7	47.9	44.14	112
Fosfat, (mg/L)	18.5	2.85	1.87	0.634
Klorür, (mg/L)	68.8	60.1	52.0	71.0

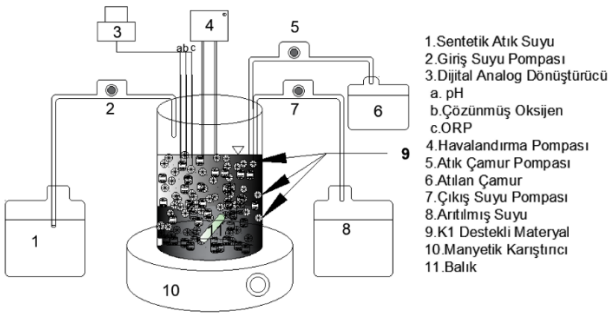
*[9]

2.2 *Reaktör sistem ve işletimi*

Çalışmada, anaerobik/aerobik biyolojik proseslerle süt endüstrisi atıksularını arıtan bir atıksu arıtma tesisinden karışık bir mikroorganizma kültürü alınıp, EBAÇ-AKR reaktörü aşılanmıştır

Reaktörün işletmeye alınma periyodu yaklaşık 54 gün sürmüştür. Reaktör 1.5 L/gün debide sentetik atıksu ile beslenmiştir. HBS 24 saat, organik yükleme hızı (OYH) 1.20 kg.KOI/m^3.gün, besi/mikroorganizma (F/M) oranı 0.3 kg.KOI /kg AKM. gün ve çamur yaşı (ÇY) 25 gün olarak işletilmiştir.

Laboratuvar ölçekli ardışık kesikli beslemeli reaktör içerisine tavsiye edilen %30-60 aralık içerinde olan [4] % 40 hacimce doluluk oranlarında destek materyali ilave edilerek EBAÇ sistemi oluşturulmuştur. İçerisine ilave edilen ticari K1 PE03 destek materyali ile üzerinde oluşacak biyofilm tabakası ile elde edilecek ilave fonksiyonel biyokütle ile karbon, azot ve fosfor giderimini iyileştirici ek kapasite sağlanması amaçlanmıştır. Bu reaktör sistemi EBAÇ-AKR olarak isimlendirilmektedir [10]. Kurulan reaktör sisteminin etkin sıvı hacmi 1.5 L, reaktör yüksekliği 18 cm, reaktör su yüksekliği 12 cm ve çapı ise 14 cm'dir. Sistemin şematik görünümü Şekil 1'de gösterildiği gibidir. Çalışmada HDPE den ticari olarak üretimi yapılan destek materyalinin Şekil 2'de gösterilen K1 PE03 modeli [11] biyofilm gelişimi için kullanılmıştır.

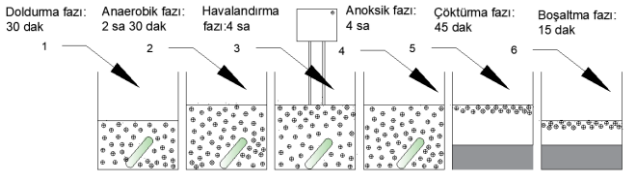


Şekil 1. EBAÇ-AKR reaktör sistemi



Şekil 2. K1 PE03 biyofilm destek materyali [11]

Destek materyali üzerinde biyofilm oluşumu ve yeterli bir nitrifikasyon verimi elde edebilmek için EBAÇ-AKR sistemi %40 doluluk oranla işletme şartları Tablo 3'te verilmiştir. Periyot döngü fazları ve süreleri Şekil 3'te şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3. Çalışma periyot fazları (toplam 12 saat günde 2 döngü)

Çalışma periyodunun fazları şu şekilde gerçekleştirilmiştir. 30 dakika doldurma olmak üzere anaerobik fazı 3 saat, havalandırma fazı 4 saat, anoksik fazı 4 saat, çöktürme fazı 45 dakika ve boşaltma fazı 15 dakika olmuştur. Günde 2 döngü olacak şekilde her döngü toplamı 12 saat sürmüştür.

2.3 *Analiz yöntemleri ve kullanılan ekipman*

Faz ve reaktör arıtma performanslarının değerlendirilmesi için alınan numuneler 5 dakika 10000 rpm'de (SIGMA 1-15PK) santrifüjlenmiş ve eğer gözle görünür süspanse katı maddeler var ise filtre kağıdından süzülerek süzüntüde analizler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan analiz yöntemleri ve yardımcı cihaz/ekipman Tablo 4'te verilmektedir.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 *Reaktör işletme parametreleri değişimi*

Reaktörde genel olarak haftada 3 gün olmak üzere reaktörün besleme debisi, aerobik fazda pH, çözünmüş oksijen (ÇO), tam karışımdan çamur yaşı için atılan çamurda askıda katı madde (AKM), çamur hacim indeksi (ÇHİ) ve boşaltma fazından sonra çıkış KOI, AKM, amonyum azotu (NH_4-N), nitrat azotu (NO_3-N), nitrit azotu (NO_2-N) ve fosfat fosforu (PO_4-P) ölçümleri yapılmıştır.

Tablo 3. Çalışmanın işletme şartları

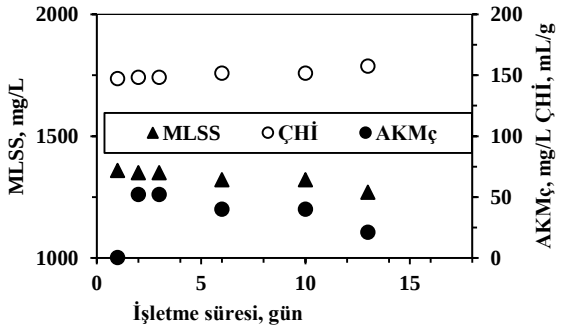
Parametreler	Değer
Süre, gün	18
Doluluk, %	40
ÇY, gün	11.8
HBS, saat	36.0
*OYH kg $BOİ_5$/m^3-gün	0.230
**F/M, kg BOİ/kg UAKM-gün	0.204
TN yükleme hızı, kg N/m^3-gün	0.035
TP Yükleme hızı, kg P/m^3-gün	0.007
AKM, mg/L	1322
Döngü sayısı	2
Faz sırası ve süreleri	Doldurma: 0.5saat Anaerobik:2.5 saat Aerobik:4.0 saat Anoksik:4.0 saat Çöktürme:0.75 saat Boşaltma:0.25 saat

Tablo 4. Çalışmada yapılan analizler ve kullanılan yöntemler

Parametreler*	Metot	Cihazlar
KOI	SM 5220 D*	WTWCR4200 termoreaktör
NH_4-N	Merck 14752 Reagent test,	SPECTRO UV-VIS
NO_3-N	Merck 09713 cell test,	SPECTRO UV-VIS
NO_2-N	Merck 14776 cell test,	SPECTRO UV-VIS
PO_4-P	Merck 14848 cell test,	SPECTRO UV-VIS
pH, T	SM 4500-H + B*	WTW Multi 3420
ÇO	SM 4500-O*	WTW Multi 3420
ORP	SM 2580 A*	WTW 330/340
BOİ	SM 5210 D*	Oxitop
AKM	SM 2440 D*	-
İletkenlik	SM 2510 B*	
Alkalinite	SM 2320 B*	
Sertlik	SM 2320 C*	

*: [12]

Çamur atımı havalandırmanın olduğu tam karışımın olduğu aerobik fazda gerçekleştirilmiş atılan karışımda biyokütle ölçümü ve çökelebilirlik testi eş zamanlı gerçekleştirilmiştir. Çalışma boyunca AKM derişimi ve ÇHİ değerleri ve AKMÇ Şekil 4'te verilmektedir.



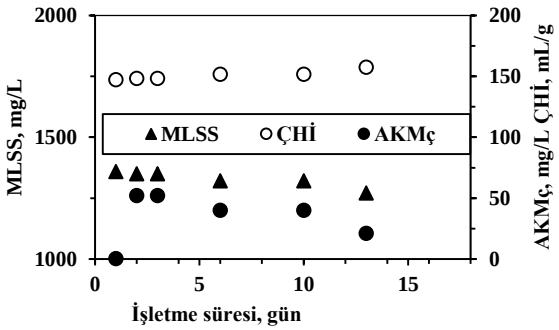
Şekil 4. Çalışma süresince aerobik faz AKM ve boşaltma fazı çıkış AKM değerleri

AKM değerleri çalışma boyunca 1000-1500 mg/L arasında değişmiştir. Çamur hacim indeksleri genellikle tavsiye edilen 150 ml/g civarında kalmıştır. Buna bağlı olarak çıkış sularındaki askıda katı madde değerleri de çoğu zaman düşük çıkmıştır. PAO'ların miktarının fazla olduğu yani biyolojik fosfor giderimi yapılan sistemlerde anaerobik şartların çökelebilirliği geliştirdiği literatürden [4] bilinmektedir.

3.2 EBAÇ-AKR reaktöründe KOI, N ve P giderim performansı

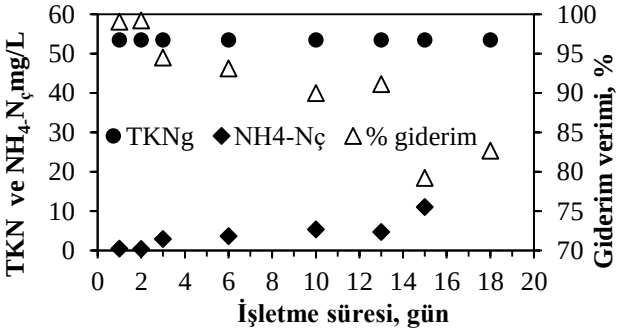
Çalışma süresince işletme koşullarında gün içerisindeki döngülerden birinin boşaltma fazından elde edilen reaktör çıkış suyunda performans parametresi olarak KOI ölçümleri yapılmış ve Şekil 5'te gösterilen sonuçlar elde edilmiştir. KOI çıkış değerleri 11.8 mg/L ile 44 mg/L arasında değişirken, KOI giderimi %90-95-arasında değişmektedir. KOI giriş değeri (≈500 mg/L) ile kıyaslandığında %95'in üstünde arıtım verimi elde edilmiştir. Çalışma süresince tüm KOI çıkış değerleri evsel atıksuların alıcı ortama deşarj standardı olan 125 mg/L [13] değerinin oldukça altında çıkmıştır. Mevzuat değerleri toplam KOI değeri olarak verilmiş olsa da reaktörde elde edilen AKM değerleri de (Şekil 4) düşük olduğundan, toplam KOI çıkış değerleri mevzuat sınırlarının altında kalacaktır. Sytek-Szmeichel, vd. [14] tarafından yapılan çalışmada EBAÇ-AKR reaktörü %25 doluluk oran ile sentetik atıksu (pepton+nişasta+glikoz) beslenen reaktörde KOI giderimi %95.1 elde edilmiştir. ChangveHao [15] tarafından yapılan çalışmada ise sentetik atıksu ile beslenen AKR reaktörü KOI giderimi %88 elde edilmiştir.

Reaktördeki N giderimi boşaltma fazında alınan örneklerin filtre kağıdından geçirilmiş kısmına NH_4-N, NO_3-N ve NO_2-N ölçümleri yapılarak değerlendirilmiştir. Sentetik atıksuya ilave edilen ürenin mikroorganizmalar tarafından tamamen amonyağa dönüştüğü kabul edilerek, çıkış suyundaki mikrobiyal ürünlerden kaynaklanan organik azot (org N) ihmal edilerek TN bileşenlerinin yukarıda sayılan azot formlarından oluştuğu kabul edilmiştir.



Şekil 5. Çalışma süresince KOI değerleri ve giderim yüzdeleri

Amonyum derişimleri çıkış suyundaki değişimleri ve NH_4-N giderim yüzdeleri Şekil 6'da gösterilmektedir. Giriş azot derişimi üre ve amonyak azotundan kaynaklandığı için toplam Kjeldahl azot (TKN) olarak ifade edilmiştir.

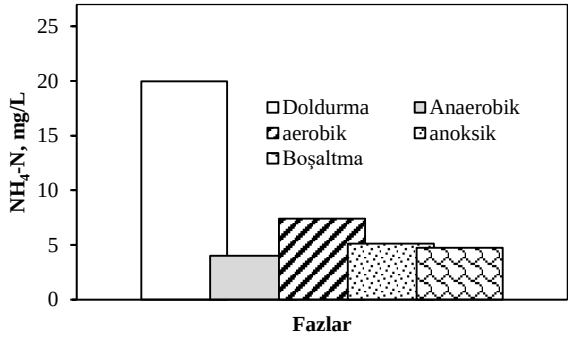


Şekil 6. Çalışma süresince giriş TKN ve çıkış NH4-N değerleri ve giderim yüzdeleri

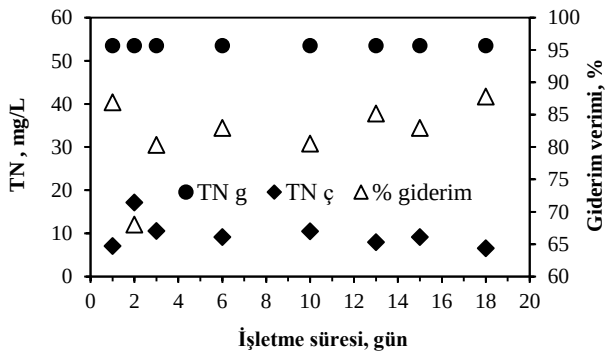
Amonyum çıkış değerleri 0.517-11.1 mg/L elde edilirken giderim verimi ise %79.2-99.2 arasında değişmiştir. Reaktörde ÇO >3 mg/L ve ÇY >10 olduğu için şartlar nitrifikasyon için uygun olup sistemde amonyum nitrifiye edilebilmiştir. Çalışma boyunca zaman zaman gün içerisindeki döngülerin faz sonundan örneklemeler yapılarak azot türleri ve fosfat fosforu izlenmiştir. Fazlardaki NH4-N değişimi ise Şekil 7'de gösterilmiştir. Anaerobik faz sonunda en düşük 4.0 mg/L NH_4-N derişimi elde edilmesinin nedeni KOI giderimine bağlı olarak mevcut amonyumun sentezde kullanımı, aerobik fazda yükselmesinin nedeni ise ürenin hidrolizi ile oluşan amonyağın yeterince nitrifiye edilememesi, anoksik ve çıkışta daha düşük değerlerin olması sentezde kullanımının devam etmesi olabilir.

TN çıkış değerleri ve giderim yüzdeleri Şekil 8'de gösterilmektedir. TN giderimi %68.0-87.8 arasında elde edilirken, çıkış değerleri ise 6.52 -17.1 mg/L arasında değişmiştir. Sytek-Szmeichel, vdl. [14] çalışmasında TN giderimi %99.3 elde edilmiştir. Chang ve Hao [15] çalışmasında ise TN giderimi %60 elde edilmiştir.

Fazlardaki NO_2-N değişimi Şekil 9'da, NO_3-N değişimi ise Şekil 10'da gösterilmiştir. Aerobik aşamada nitrifikasyon sonunda var olan NH_4-N büyük bir kısmı NO_2-N ye ve az bir kısmı ise NO_3-N dönüştürülmüştür. Sonraki fazlarda NO_2-N düşmüştür. Bunun nedeni sonraki fazlarda kalan oksijen ile NO_3-N dönüşmesi ve/veya anammox bakterileri tarafından NO_2'nin elektron alıcı olarak kullanılıp N_2 gazına dönüşmesi ile açıklanabilir.



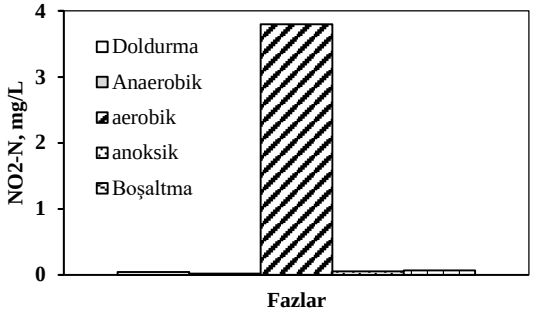
Şekil 7. Fazlardaki NH_4-N değişimi



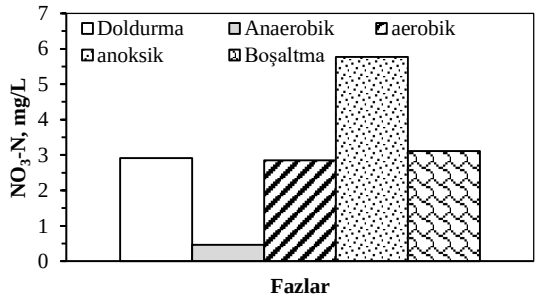
Şekil 8. Çalışma süresince çıkış TN değerleri ve giderim yüzdeleri

Sentetik atıksuya PO_4 olarak verilen P'un çıkış değerleri ve giderim yüzdeleri Şekil 11'de verilmiştir. Fazlardaki PO_4-P değişimi ise Şekil 12'de gösterilmiştir.

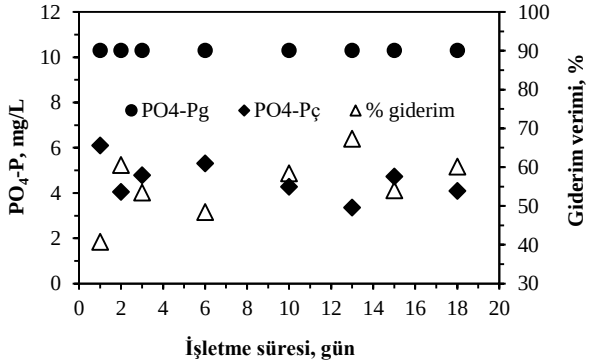
PO_4-P giriş değerleri yaklaşık 10 mg/L iken çalışmada çıkış değerleri 3.37- 6.10 mg/L arasında elde edilmiştir. % 40.8-67.3 arasında giderim sağlanmıştır. TP giderimi benzer bir çalışmada [14] %91.7 diğer çalışmada [15] ise %21 elde edilmiştir. Fosfat salımını anaerobik fazda en yüksek olur. Anaerobik aşamada salınan Orto-P derişimi giriş atıksuyunda bulunan derişimin 2-3 katına çıkabilir. Anaerobik fazda fosfor salınımı bu yolla fosfor gideriminin bir göstergesi olarak görülür [4]. Daha önce yapılan çalışmalarda [3] tarafından gerçekleştirilen tek kademeli EBAÇ sistemi ile evsel atıksuyun arıtımında optimize edilmiş şartlarda %92 KOI, %91 BOİ, %90 AKM, %88 TN ve %50 TP giderim verimlerine ulaşılmıştır.



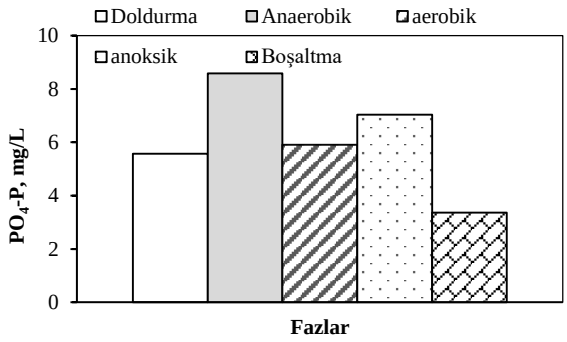
Şekil 9. Fazlardaki NO_2-N değişimi



Şekil 10. Fazlardaki NO_3-N değişimi



Şekil 11. Çıkış PO_4-P değerleri ve giderim yüzdeleri

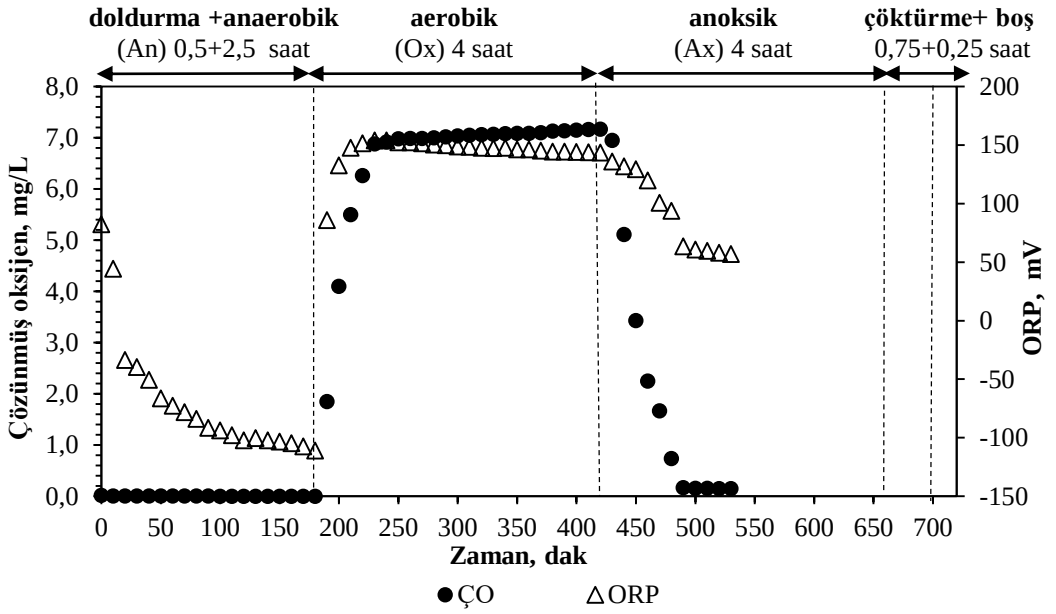


Şekil 2. Fazlardaki PO_4-P değişimi

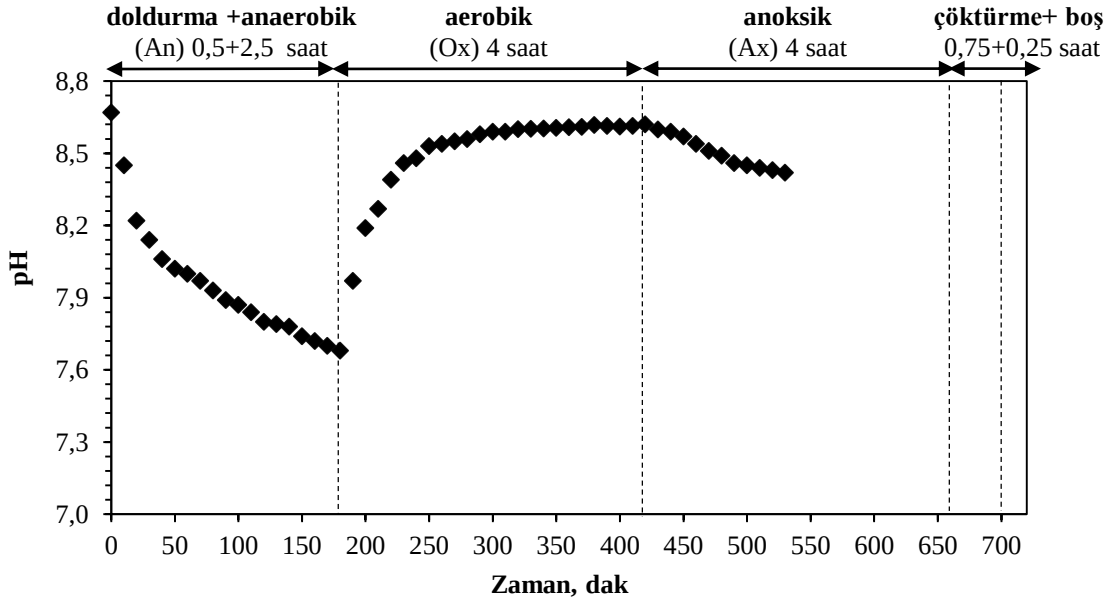
Yine bir çalışmada [7] AKR-EBAÇ reaktöründe yeni geliştirilen petek şeklinde bir destek materyali ile eş zamanlı nitrifikasyon, denitrifikasyon ve P giderimi araştırılmıştır. 233 gün işletilen lab ölçekli ardışık kesikli reaktörde % 94.5 azot, ve >%99.0 fosfor giderimi elde edilebilmiştir. Çalışmada yeni geliştirilen destek materyalinin de yardımıyla eş zamanlı etkin nitrifikasyon, denitrifikasyon ve fosfor giderimi yapılabileceğini göstermiştir.

3.3 Reaktör fazlarında pH, ÇO ve ORP değişimleri

Çalışma sonunda kararlı çıkış değerlerinin alındığı bir döngü süresince reaktörde ÇO, ORP ve pH, değişimi izlenmiştir. Döngü süresince Şekil 13'te ÇO ve ORP ve Şekil 14'te pH değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3. Çalışmada (%40 doluluk oranında) döngü süresince ÇO ve ORP değişimleri



Şekil 4. Çalışmada (%40 doluluk oranında) döngü süresince pH değişimi

Reaktör, kesikli işletildiği için her besleme döngüsü boyunca reaktör içeriği sürekli değişkenlik gösterir. Doldurma ve anaerobik fazlarda, sistem oksijenle beslenmediği için tam anlamıyla anaerobik koşullar sağlanmıştır. Bu aşamada yapılan karıştırma işlemiyle birlikte, fosfor salınımı için elverişli bir ortam oluşmuş ve bu, pH değerlerinin belirgin bir şekilde değişim göstermesine neden olmuştur. Başlangıçta 7.8 olan pH değeri, 30 dakika içinde yaklaşık 6.7 civarına düşmüştür. En düşük seviye olan 6,68 ise 40. dakikada kaydedilmiştir. Aynı süre içinde ORP (Oksidasyon İndirgeme Potansiyeli) değerleri de -15 mV'dan, tam anaerobik koşulların istikrarlı bir göstergesi olan -436 mV'a düşmüştür. pH ve ORP değerlerindeki bu düşüşler, PO4-P (fosfat) salınımının bu süre zarfında tamamlandığını işaret eder.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada hareketli destek materyali kullanılarak oluşturulan klasik aktif çamur proseslerine alternatif bir reaktör olan EBAÇ-AKR sisteminde KOI açısından orta, N ve P açısından yüksek derişimlere sahip evsel atıksuları temsil eden sentetik atıksuda C, N ve P giderimleri araştırılmıştır. Çalışmada giriş suyu KOI:TN:PO4-P oranları sırasıyla ortalama 507:52.9:10.7 olan atıksu %40'lik destek materyali doluluk oranı, 36 saatlik HBS, 11.8 günlük ÇY, günde 2 döngü ile işletilen reaktörde KOI, TN ve PO4-P giderimleri sırasıyla %92.7, %79.2 ve % 59.3 olarak elde edilmiştir.

N, P ve organik madde seviyeleri sürekli olarak değişkenlik gösterdiğinden, bu parametrelerin anlık değişimlerini takip etmek hem pratik olmayabilir hem de maliyetli bir süreç olabilir. Ancak, reaktör içindeki pH, ÇO ve ORP değerleri gibi parametreler, online sensörler yardımıyla sürekli olarak ölçülüp izlenebilir. Bu parametrelerin değişimi, ortamda gerçekleşen biyokimyasal reaksiyonlar hakkında önemli bilgiler sunar. Bu değişkenlerin izlenmesi, nitrifikasyon ve fosfor biriktirme organizmalarının (PAO) toplam popülasyon içindeki paylarıyla ilişkilendirilerek, her bir aşamadaki toplam reaktör bekleme sürelerinin kısaltılmasına yönelik bir imkân sağlamaktadır. Bu, sistemin daha etkin bir şekilde kullanılmasını sağlayabilir. Bu verilerin analizi ve sürekli izlenmesi sayesinde, biyokimyasal tepkimelerin dinamiklerini daha iyi anlayabiliriz. Bu da nitrifikasyon ve fosfor biriktirme gibi önemli süreçlerin verimini artırmak ve istenmeyen sonuçları öngörmek için kritik bir avantaj sağlar. Sonuç olarak, online sensörler aracılığıyla reaktör içindeki pH, ÇO ve ORP değerlerinin izlenmesi, su arıtım sistemlerinin optimize edilmesi ve daha verimli hale getirilmesi için önemli bir araçtır. Bu sayede, sürekli değişen parametrelerin etkilerini anlamak ve biyokimyasal reaksiyonların yönetimini geliştirmek mümkün olabilir.

EBAÇ-AKR reaktörü, evsel atıksuların etkili şekilde arıtılmasını sağlayan bir sistemdir. Ancak bu çalışmada da olduğu gibi fosfor giderimi kritik bir faktördür. Bu nedenle, sistemin fosfor giderim verimini artırmak ve garanti altına almak için kimyasal fosfor giderim ünitesinin alternatif olarak eklenmesi önerilir. Mevcut klasik aktif çamur sistemlerinin içerisine destek materyali ekleyerek EBAÇ sistemleri elde etmek su kalitesinin korunmasında sürdürülebilir bir teknoloji olma potansiyeli bulunmaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

[1] Y. Shao, Y. Shi, A. Mohammed and Y. Liu, Wastewater ammonia removal using an integrated fixed-film activated sludge-sequencing batch biofilm reactor (IFAS-SBR): Comparison of suspended flocs and attached biofilm. International Biodeterioration & Biodegradation, 116, 38-47, 2017. https://doi.org/10.1016/ j.ibiod.2016.09.026.

[2] H. Eslami, M. R. Samaei, E. Shahsavani and A. A. Ebrahimi, Biodegradation and fate of linear alkylbenzene sulfonate in integrated fixed-film activated sludge using synthetic media. Desalination and Water Treatment, 92, 128-133, 2017. 10.5004/dwt.2017.21432.

[3] N. K. Singh and A. A. Kazmi, Environmental performance and microbial investigation of a single stage aerobic integrated fixed-film activated sludge (IFAS) reactor treating municipal wastewater. Journal of Environmental Chemical Engineering, 4(2), 2225-2237, 2016. https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.04.001.

[4] G. Tchobanoglous, H. D. Stensel, R. Tsuchihashi, F. Burton, M. Abu-Orf, G. Bowden and W. Pfrang, Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery. 5th edn, McGraw-Hill, Inc., New York, USA., Fifth ed. McGraw-Hill Education, 2014.

[5] X. Xu, G.-h. Liu, Q. Li, H. Wang, X. Sun, Y. Shao, J. Zhang, S. Liu, F. Luo and Q. Wei, Optimization nutrient removal at different volume ratio of anoxic-to-aerobic zone in integrated fixed-film activated sludge (IFAS) system. Science of the Total Environment, 795, 148824, 2021. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148824.

[6] D. Wang, J. Tao, F. Fan, R. Xu and F. Meng, A novel pilot-scale IFAS-MBR system with low aeration for municipal wastewater treatment: Linkages between nutrient removal and core functional microbiota. Science of The Total Environment, 776, 145858, 2021. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145858.

[7] T. Wu, J. Ding, S.-S. Yang, L. Zhong, B.-F. Liu, G.-J. Xie, F. Yang, J.-W. Pang and N.-Q. Ren, A novel cross-flow honeycomb bionic carrier promotes simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal in IFAS system: Performance, mechanism and keystone species. Water Research, 225, 119132, 2022. https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119132.

[8] W. Zhao and M. Bai, Upgrading integrated fixed-biofilm activated sludge (IFAS) system into separated two-sludge denitrifying phosphorus removal system: Nutrient removal and microbial structure.

Chemosphere, 307, 135918, 2022. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135918.

[9] Z. Ayman and M. Işık, Pharmaceutically active compounds in water, Aksaray, Turkey. CLEAN–Soil, Air, Water, 43(10), 1381-1388, 2015, https://doi.org/10. 1002/clen.201300877.

[10] J. Gu, G. Xu and Y. Liu, An integrated AMBBR and IFAS-SBR process for municipal wastewater treatment towards enhanced energy recovery, reduced energy consumption and sludge production. Water Research, 110, 262-269, 2017. https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.12.031.

[11] K1 PE03 biyofilm destek materyali özellikleri https://turkish.alibaba.com/p-detail/MBBR-1600988596538.html?spm=a2700.details.0.0.715d5a87E4k8qZ Erişim tarihi 21 Haziran 2023.

[12] APHA/AWWA/WEF, American Public Health Association/American Water Works Association/ Water Environment Federation, Rodger B. Baird, Andrew D. Eaton, Eugene W. Rice (Editors), Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition, Washington, D.C., American Public Health Association (APHA), 2017.

[13] T.C. Resmi Gazete, Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği (26047), 08.01.2016. 2006.

[14] K. Sytek-Szmeichel, J. Podedworna and M. Zubrowska-Sudol, Efficiency of wastewater treatment in SBR and IFAS-MBSBBR systems in specified technological conditions. Water Science and Technology, 73(6), 1349-1356, 2016. https://doi.org/10. 2166/wst.2015.611.

[15] C. H. Chang and O. J. Hao, Sequencing batch reactor system for nutrient removal: ORP and pH profiles. Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process Environmental and Clean Technology, 67(1), 27-38, 1996. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4660(199609)67:1%3C27::AID-JCTB430%3E3.0.CO;2-2.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 342-349

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Comparative analysis of various machine learning and deep learning approaches for car resale price prediction in the Turkish market

Türk piyasasında araba ikinci el fiyat tahminleri için çeşitli makine öğrenmesi ve derin öğrenme yaklaşımlarının karşılaştırmalı analizi

Fatih Uysal[1,*]

[1] Kafkas University, Electrical and Electronics Engineering Department, 36100, Kars, Türkiye

Abstract

With escalating environmental concerns worldwide, the shift towards second-hand car markets has emerged as an eco-friendly alternative to reduce the carbon footprint associated with manufacturing new vehicles. However, the lack of accurate and efficient price prediction mechanisms may impede the growth and efficiency of these markets. This study, focusing on the Turkish second-hand car market, contributes towards addressing this gap by introducing a unique, comprehensive dataset gathered from various online markets across Turkey, thereby offering a broad spectrum of data pertaining to different vehicle types, specifications, and resale conditions. The study employs both classical machine learning methods, specifically decision trees, and deep learning models to predict used car prices. This comparative analysis aims to assess the potential of these methods in improving the predictability and transparency of resale price determination. Despite the superior performance of decision tree models, the study found that deep learning techniques achieved comparable results, indicating their potential for further optimization and enhancement. The accurate prediction of resale prices could streamline the operations of second-hand car markets, increasing their appeal to potential buyers and sellers. This could also contribute to environmental sustainability by significantly reducing the demand for new cars.

Keywords: Resale price prediction, Tabular data, Deep learning, Decision trees

Öz

Çevresel kaygıların yoğunlaşmasıyla birlikte, ikinci el araç piyasaları, yeni araçların üretimindeki karbon ayak izini azaltma konusunda çevre dostu bir alternatif olarak ön plana çıkmıştır. Ancak, etkili ve doğru fiyat tahmin mekanizmalarının yetersizliği, bu piyasaların büyüme ve verimliliği üzerinde engelleyici bir etkiye sahip olabilir. Bu çalışma, bu sorunu çözme hedefine yönelik olarak, özellikle Türk ikinci el araç piyasası üzerinde durmuştur ve Türkiye genelindeki farklı online pazarlardan derlenen geniş bir veri seti sunmuştur. Bu veri seti, çeşitli araç türleri, özellikleri ve yeniden satış koşulları hakkında geniş kapsamlı bilgiler sağlamaktadır. Çalışmada, ikinci el araç fiyatlarının tahmininde hem klasik makine öğrenmesi yöntemleri -özellikle karar ağaçları- hem de derin öğrenme modelleri kullanılmıştır. Bu karşılaştırmalı analizin amacı, bu metotların yeniden satış fiyatının belirlenmesinde tahmin gücünü ve şeffaflığı nasıl iyileştirebileceğini değerlendirmektir. Karar ağaçlarının daha yüksek performans göstermiş olmasına rağmen, derin öğrenme tekniklerinin de benzer sonuçlar elde ettiği ve bu nedenle daha fazla optimizasyon ve geliştirme potansiyeli taşıdığı tespit edilmiştir. Yeniden satış fiyatlarının doğru bir şekilde tahmin edilmesi, ikinci el araç piyasalarının işleyişini daha verimli hale getirebilir ve potansiyel alıcılar ve satıcılar için daha çekici kılabilir. Ayrıca bu durum, yeni araç talebini önemli ölçüde azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunabilir.

Anahtar kelimeler: Yeniden satış fiyatı tahminleme, Tablo verisi, Derin öğrenme, Karar ağaçları

1 Introduction

Artificial Intelligence (AI) has found its place in many sectors, transforming traditional systems by improving their accuracy, efficiency, and predictability. The second-hand car market is one such sector within the broader automotive industry. Second-hand cars provide a more eco-friendly option than new vehicles, reducing the carbon footprint linked to vehicle production. However, this market's full potential remains largely untapped, mostly due to the lack of efficient and accurate pricing prediction tools.

The Turkish second-hand car market is diverse in terms of vehicle types, conditions, and prices [1]. Yet, there is a noticeable lack of a comprehensive dataset, making it difficult to fully utilize AI for price predictions. This research aims to fill this gap by creating a unique dataset from various online Turkish markets. This dataset, which covers a broad range of vehicle types and specifications, forms the basis for our comparative analysis of traditional and modern predictive models.

This research uses decision trees, a widely accepted machine learning tool known for their simplicity, interpretability, and robustness. In contrast, it also explores deep learning models, a newer approach known for its ability to identify complex patterns in high-dimensional, non-linear data. Even though the results from deep learning models currently match those from decision trees, they offer

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: fatih.uysal@kafkas.edu.tr (F. Uysal)
Geliş / Recieved: 31.08.2023 Kabul / Accepted: 11.12.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1353526

promising opportunities for future improvement, which could enhance price predictability in the second-hand car market.

In summary, this research seeks to deepen our understanding of the second-hand car market in Turkey by studying the role of AI in predicting prices accurately. By comparing traditional machine learning and deep learning methods, the study aims to add to the discussion on the benefits and limitations of different AI technologies in this specific application. The introduction of a unique dataset from various Turkish online markets also aims to enrich the existing literature. The next section will review related studies, their methods, the datasets used, and their results, providing a broader context for this research and its potential impact on used car price predictions.

2 Related works

Price prediction, particularly in the used car market, has seen significant strides in recent years, and is a key area of interest that has been widely explored in numerous research studies. This paper aims to build upon existing knowledge and probe further into the comparative performance of traditional machine learning and deep learning methodologies, whilst shedding light on their potential to transform market operations and advance environmentally sustainable practices.

Several key studies have been instrumental in forming the bedrock of our understanding of car price prediction. These works, such as Liu et al. [2], Bukvić et al. [3], Celik and Osmanoglu [4], Samruddhi and Kumar [5], Asghar et al. [6], Longani [7], Snehit Shaprapawad et al. [8], Li et al. [9], Nikmah et al. [10] , Alhakamy et al. [11] , Yılmaz and Selvi [12] , Voß and Lessmann [13] and Adhikary et al. [14] predominantly rely on classical machine learning techniques for price prediction, yielding noteworthy results and underlining the strength of these methods. However, these studies, while effective, have tended to not fully explore the potential of deep learning methodologies in the realm of car price prediction.

This research addresses this gap, navigating uncharted territory to assess the potential of deep learning in the realm of used car price prediction. Our work is distinctive in that it introduces a unique dataset 'Car Prices in the Wild' compiled from a variety of online Turkish markets. It also provides a rigorous comparison of the performances of classical machine learning and deep learning techniques, thereby enriching the current body of research.

To provide a clearer perspective, Table 1 and 2 outline a comparison of this study with several other key studies conducted in the realm of used car price prediction. The tables delineate the methods employed, the datasets used, the volume of data considered, and the reported accuracy of each study.

The democratization of car valuation is a crucial aspect of this study. By developing a model that can accurately predict car prices, we are providing a valuable resource for those who might not be able to afford expert services to determine the value of a vehicle. In the following section, we delve into the process of dataset collection, followed by an explanation of the training process.

Table 1. Comparison of previous studies with used methods and data sets

Study	Used Methods	Data sets
Liu et al.	PSO-GRA-BP Neural Network	iAutos (Scraped)
Bukvić et al.	Linear Regression	Njuškalo (Scraped)
Celik and Osmanoglu	Linear Regression, Correlation analysis	IkinciYeni
Samruddhi and Kumar	K-Nearest Neighbor	Kaggle
Asghar et al.	Linear Regression (with RFE and VIF)	Kaggle
Longani	Random Forest, XGBoost	Mumbai Region (Scraped)
Snehit Shaprapawad et al.	Support Vector Regressor	Kaggle
Li et al.	Random forest and LightGBM	Scraped Wubatongcheng
Nikmah et al.	Various ML Methods	Kaggle
Alhakamy et al.	Linear Regression	Kaggle
Yılmaz and Selvi	Various ML Methods	Scraped
Voß and Lessmann	Various ML Methods	Real world sales data
Adhikary et al .	Various ML Methods	Kaggle
This Study	Various ML and DL Methods	Scraped from Various Platforms

PSO: Particle swarm optimization, GRA: Grey Relation Analysis, BPNN: BP Neural Network, RFE: Recursive Feature Elimination, VIF: Variance Inflation Factor, ML: Machine Learning, DL: Deep Learning, XGBoost: Extreme Gradient Boosting, LightGBM: Light Gradient Boosting Machine

3 Methodology

The methodology of this study consisted of several stages, commencing with data collection, followed by data preparation and concluding with model training.

The data collection process was initiated by scraping several Turkish car auction websites. For each platform, a custom Selenium WebDriver script was developed to automate and facilitate the data gathering process. Selenium WebDriver, which is a powerful tool for controlling a web browser through the program, was instrumental in navigating through the websites and systematically collecting necessary information.

Table 2. Comparison of previous studies with data count and reported accuracy

Study	Data Count	Reported Accuracy
Liu et al.	10.260	MAPE: 3.936%, MAE: 0.475, R: 0.998, R2: 0.984
Bukvić et al.	4388	Accuracy: 85%
Celik and Osmanoglu	5.048	Proximity Rate: 81.15%
Samruddhi and Kumar	N/A	Accuracy: 85%
Asghar et al.	N/A	R2-Score: 90%
Longani	2.454	RMSE: 3.44 (Random Forest), RMSE: 0.53 (XGBoost)
Snehit Shaprapawad et al.	6019	R2-Score: 95.2%
Li et al.	3421	R2-Score: 93.6%
Nikmah et al.	5918	MSE :117.142273
Alhakamy et al.	11.914	MAE : 1.86 MSE : 2.04
Yılmaz and Selvi	17.245	R2 97.8% , 0.021 MSE
Voß and Lessmann	N/A	MAR 3.97%
Adhikary et al .	6019	RMSE 2.35
This Study	39.053	R2: 0.9552, MAPE: 0.0842

Given the inherent variability in the design and structure of different platforms, each script was tailored to address the unique nuances of its corresponding website. It should be noted that the scraping process adhered to all ethical considerations and terms of service of the platforms.

The selection of attributes for collection was guided by a commonality principle. Only those features that were consistently present across different platforms were considered. This approach ensures the comparability and coherence of data points from different sources, thereby enhancing the robustness and reliability of the resulting dataset.

Once data from various platforms was collected, the next step involved merging this information to create a unified, comprehensive dataset. This consolidation process necessitated meticulous alignment of corresponding attributes from different sources to ensure seamless integration into the final dataset. Rigorous quality checks were conducted to ensure that the final dataset is devoid of inconsistencies and discrepancies. With a well-structured, reliable dataset at our disposal, the subsequent stage involved the training of various machine learning and deep learning models.

3.1 Dataset

The methodology employed in this study represents a significant advancement over previous approaches in the field, particularly regarding the composition and depth of the dataset. Traditional datasets in the realm of automotive market analysis have typically relied on single or limited sources for data collection. This approach often results in datasets that, while functional for basic statistical analyses, fall short in terms of the diversity and volume of data required for more advanced applications, especially in the context of deep learning.

In contrast, our methodology involves aggregating data from multiple Turkish car auction websites, which offers a more holistic and comprehensive view of the market. This approach addresses a critical gap in existing datasets by providing a richer, more varied collection of data points. Such a dataset is not only beneficial for conventional statistical analyses but is particularly valuable for deep learning applications, which require large and diverse datasets to effectively learn and generalize.

Data was collected from Turkish online marketplace during a period from 08/02/2021 to 22/03/2021. The detailed breakdown of car brands within the dataset can be found in Table 3 [15, 16].

As it can be seen there are repeating values with small character changes and there are some rarely occurring values. They can be dealt in preprocessing steps or it can be expected from the model to deal with them.

In Figure 1, we provide a histogram and a violin plot of car prices within our dataset. These plots offer insights into the distribution and variability of prices, highlighting key aspects such as the median price, interquartile ranges, and potential outliers.

Table 3. Car brand frequency counts

Brand	Count	Brand	Count
Renault	6048	Nissan	233
Volkswagen	5841	Mazda	121
Opel	3053	Mini	95
Fiat	2837	Alfa Romeo	69
Ford	2687	Lada	66
BMW	2607	Porsche	62
Mercedes Benz	2132	Mitsubishi	56
Hyundai	2064	Suzuki	56
Chrysler	31	Land Rover	21
Rover	21	DS Automobiles	21
Tata	18	Daewoo	15
Jeep	13	Smart	13
Geely	12	Daihatsu	12
Chery	10	Saab	10
Lancia	9	Proton	9
Ford - Otosan	7	Maserati	6

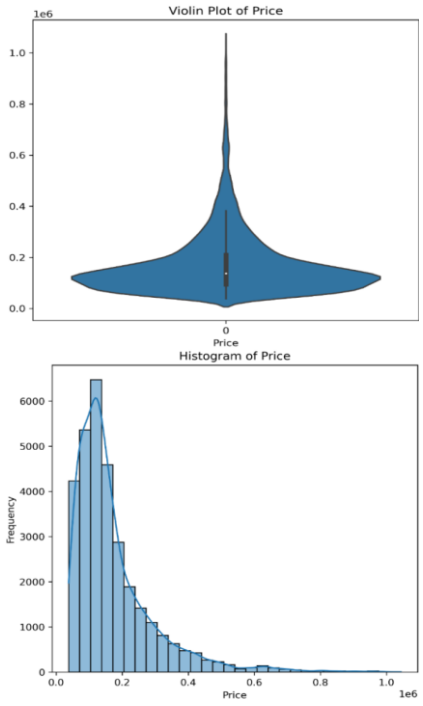


Figure 1. Violin and histogram plot of price data

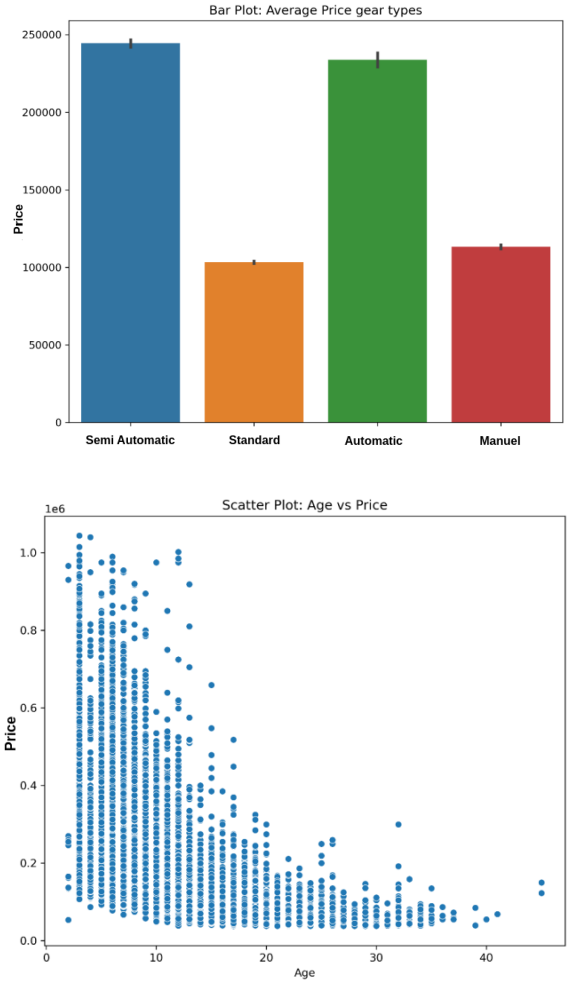


Figure 2. Scatter plot for age and average price for gear types

Additionally, we investigated the influence of gear type and model year on price. Average prices across different gear types are presented in Figure 2, alongside a scatter plot depicting the relationship between the model year of a car and its price. The scatter plot aids in visualizing the depreciation of car value over time.

The graphical representations of the top 10 locations with the highest average car prices, and the scatter plot showing the relationship between mileage and car price are presented in Figure 3. In Figure 3, the first subplot portrays the correlation between the vehicle's mileage and its price, while the second subplot exhibits the cities with the highest average car prices. These visuals provide an insightful perspective on how location and mileage influence car prices in the Turkish second-hand car market.

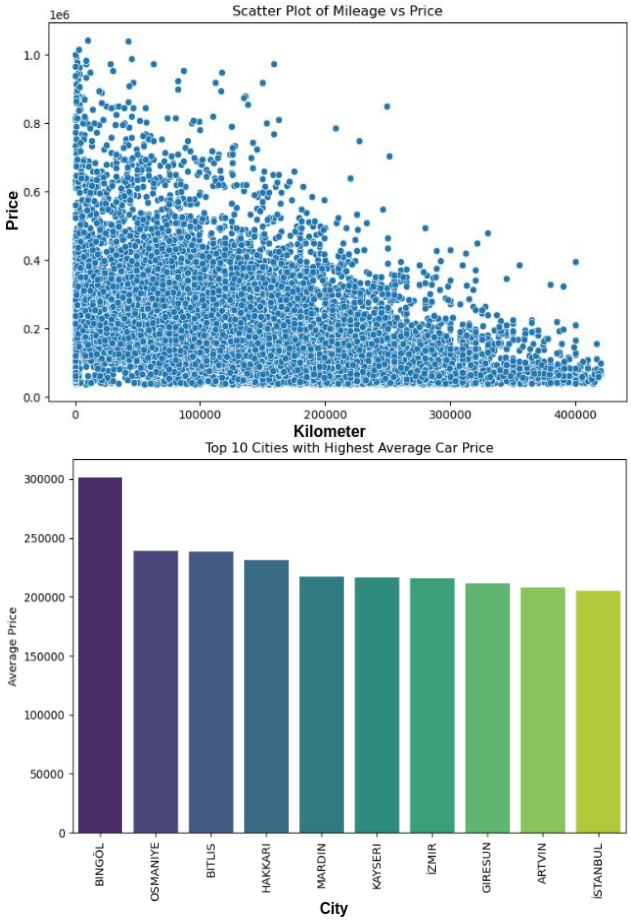


Figure 3. Average price for cities and scatter plot for millage vs price

A comprehensive understanding of the dataset is essential for the success of any data-driven project. In the context of our study, the dataset comprises various columns each representing unique characteristics of the used cars listed in the Turkish online marketplace. Table 4 contains the data explanation.

Table 4. Data explanation

Explanation	Explanation
Brand of the car	Transmission type
Model of the car	Mileage of the car
Series of the car	Body type
Year of production	Engine power
Fuel type	Engine volume
Traction type	Color of the car
Seller category	Day of the sale
City of the that being sold	Month of the sale
Price of the car	Year of the sale

3.2 Price prediction models

In this section, we discuss the utilized models for predicting the resale price of pre-owned vehicles. We explore two types of models: decision trees, which are a staple of classical machine learning, and more modern deep learning models including the Category Embedding Model [17] and AutoInt [18]. These models were specifically chosen due to their adeptness at handling datasets composed of a mixture of categorical and continuous variables, a characteristic inherent to our used car dataset.

3.2.1 Decision trees

Decision trees, a class of supervised machine learning algorithms, are renowned for their proficiency in tackling classification problems. Nevertheless, their versatility allows their application to regression tasks, such as predicting pre-owned car resale prices. These models reflect the human decision-making process, thus facilitating their comprehension and interpretation.

A decision tree builds a tree-structured model through the progressive partitioning of a dataset into increasingly smaller subsets. Each internal node in the constructed decision tree signifies a feature in the dataset, every branch embodies a decision rule, and each leaf node denotes the outcome [19]. For regression tasks, attributes are selected based on measures like variation or standard deviation, with the algorithm choosing the split that maximizes the reduction in total variation [20]. Metrics like Information Gain, Gain Ratio, and Gini Index assist in attribute selection when the decision tree splits the dataset on different attributes.

3.2.1.1 Random forest

Random Forest, comprising multiple decision trees, is a flexible machine learning approach capable of managing a diverse range of data items with exceptional precision. This includes continuous and categorical variables, making it applicable to our used car dataset [21]. For regression, the Random Forest algorithm constructs numerous decision trees and amalgamates them for a more accurate and stable prediction. Each tree uses a [21] unique bootstrap sample of the data, and a random sample of features is chosen for splitting at each node [22]. To predict a new instance, all trees in the Random Forest make individual predictions (i.e., estimating a car's resale price), with the final prediction being their average. This ensemble learning method enhances accuracy and model robustness.

3.2.1.2 XGBoost

XGBoost, or "Extreme Gradient Boosting", is a potent machine learning model utilizing the 'boosting' concept. It is an ensemble method where additional models are introduced to rectify errors made by existing models [23]. Unlike Random Forest, XGBoost constructs strong predictive models in a sequential manner like other boosting methods, but it allows optimization of any differentiable loss function. For regression tasks, XGBoost creates a regression tree where each leaf contains a continuous score, and predictions are made by summing these scores across all trees. Due to its exceptional speed and performance, XGBoost often emerges as a top performer in machine learning competitions.

3.2.1.3 Extra trees regressor

The Extra Trees Regressor, or Extremely Randomized Trees, is another decision tree-based ensemble learning method. It introduces an extra layer of randomness into the model by selecting a random value for the split for each feature under consideration, rather than identifying the locally optimal feature/split combination as in classical decision trees or Random Forest [24]. This additional randomness often results in models with reduced variance, albeit with a minor increase in bias.

3.2.1.4 CatBoost

CatBoost, short for "Categorical Boosting", is another powerful gradient boosting algorithm. It offers a distinct advantage over many other machine learning algorithms: it handles categorical variables exceptionally well [25]. CatBoost, like XGBoost, adds new models to correct errors of existing models in a stage-wise manner. Its key strength lies in its ability to handle categorical data without needing extensive pre-processing or one-hot encoding. This makes CatBoost a convenient and effective tool for datasets with multiple categorical variables, like used car data.

In summary, decision trees and their ensemble derivatives, including Random Forest, XGBoost, Extra Trees Regressor, and CatBoost, handle mixed data types with proficiency and excel at regression tasks. Their deployment in our study ensures effective management of mixed data types, an essential aspect for attaining precise used car price predictions.

3.2.2 Deep learning models

While decision trees have been the standard for dealing with mixed data types, the rise of deep learning offers new pathways for handling and analyzing tabular data, like the used car dataset we have. A couple of deep learning models that are specifically adept at dealing with mixed data types are the Category Embedding Model and AutoInt.

3.2.2.1 *Category embedding model*

The Category Embedding Model [17] is a neural network architecture that has gained attention in tasks dealing with categorical data. This model is well-suited to tabular data containing categorical variables with large cardinality. It involves representing categorical variables as dense vectors, or 'embeddings', which are learned by the model during training.

The Category Embedding Model follows the concept of an embedding layer for categorical variables. An embedding layer is a simple look-up table that stores embeddings of a fixed dictionary and size. These embeddings transform categorical variables into continuous representations, bridging the gap between categorical and continuous data types. In other words, each category within a categorical variable is represented by a dense vector (embedding) that captures the semantics of the category, and these embeddings are learned during the model training process.

One advantage of this approach is that it allows the model to capture more complex relationships between categories, which would not be possible with traditional one-hot encoding. Furthermore, the resulting models can be less memory-intensive and more computationally efficient, since they replace high-dimensional sparse vectors with lower-dimensional dense vectors.

3.2.2.2 *AutoInt*

The AutoInt model [18] is a more recent development in deep learning for tabular data. Short for Automatic Feature Interaction, AutoInt is designed to model feature interactions in a more explicit and powerful way compared to previous architectures.

Unlike the Category Embedding Model, which largely focuses on individual categorical features, AutoInt aims to capture interactions between features. The model uses a self-attentive neural network to learn the weights of feature interactions. In other words, it determines how important each feature is to each other feature when making a prediction. This ability to capture complex relationships between both categorical and continuous features enhances its predictive power.

AutoInt treats each feature as an embedding and uses a multi-head self-attention mechanism to model the weights of feature interactions. The self-attention mechanism allows the model to focus on different features for different parts of the input, providing a rich understanding of the dataset.

In conclusion, while traditional machine learning methods like decision trees handle mixed data types with ease, the new wave of deep learning models like the Category Embedding Model and AutoInt provide innovative techniques for managing mixed data types.

3.3 *Performance metrics*

In the evaluation of machine learning models, performance metrics play a crucial role in quantifying the effectiveness of the model in making predictions. These metrics provide insights into various aspects of model accuracy and error, guiding data scientists in model optimization and selection. This section delves into three fundamental performance metrics: Mean Squared Error (MSE), Coefficient of Determination (R^2), and Mean Absolute Percentage Error (MAPE). Each of these metrics offers a unique perspective on model performance, making them indispensable in the realm of machine learning.

3.3.1 *Mean Squared Error (MSE)*

A standard metric for regression models, MSE measures the average of the squares of errors—that is, the average squared difference between the estimated values and the actual value. Lower MSE values indicate better model accuracy.

3.3.2 *Coefficient of determination (R^2)*

Commonly known as R^2, this metric quantifies the proportion of the variance in the dependent variable that is predictable from the independent variables. R^2 values closer to 1 suggest a model that accurately captures the variability in the data.

3.3.3 *Mean Absolute Percentage Error (MAPE)*

Used to assess prediction accuracy, MAPE represents the average absolute percentage difference between the actual and predicted values. Lower MAPE values are desirable, as they indicate higher prediction accuracy.

4 Results

After obtaining the dataset, we then embarked on predicting the prices of the used cars. For this task, we used a mix of deep learning and machine learning models, with implementations from the PyTorch Tabular [17] and PyCaret [26] libraries respectively.

To reduce the impact of outliers on our models, we dropped the upper 0.95 and lower 0.05 values from our train dataset before training. The rest of the model training was carried out using the default settings of the respective libraries, which automatically optimize most of the hyperparameters. The comparative results of these training routines can be found in Table 5.

Table 5. Results

Regressor	Metrics		
	MSE	R2	MAPE
Extra Trees Regressor	6.94e+08	0.9552	0.0842
Gradient Boosting Regressor	1.12e+09	0.9274	0.1217
CatBoost Regressor	1.45e+09	0.9058	0.1671
Random Forest Regressor	1.70e+09	0.8896	0.1419
K Neighbors Regressor	1.84e+09	0.8807	0.1500
Extreme Gradient Boosting	2.01e+09	0.8690	0.2085
Linear Regression	2.31e+09	0.8509	0.2028
Category Embedding Model	1.62e+09	0.9061	0.1372
AutoInt	2.23e+09	0.8684	0.1532

5 Conclusions and future directions

In this study, we introduced a novel dataset 'Car Prices in the Wild' that encapsulates the real-world intricacies of the online used car market in Turkey. The dataset reflects the various challenges encountered in the wild, including data outliers and erroneous entries commonly found in real-world market dynamics. Besides, we leveraged this dataset to evaluate the performance of the newly emerging deep learning architectures against the traditional machine learning methodologies in predicting the resale prices of pre-owned vehicles.

Our results indicated that deep learning architectures, while not exceeding, achieved comparable performance to their classical machine learning counterparts. This is a noteworthy finding considering that the application of deep learning methodologies in the field of used car price prediction was relatively under-explored in previous studies. Hence, our research underscores the potential of deep learning techniques in handling complex prediction tasks and establishes a foundation for their more extensive application in future studies.

The results from our study open several promising directions for future research. While our deep learning models achieved comparable performance, the potential of deep learning architectures, which are known to scale well with larger datasets, wasn't fully exploited due to the limited size of our current dataset. Therefore, future work could involve collecting a larger dataset to fully leverage the potential of deep learning methods.

Besides, the used car market is extremely volatile and greatly influenced by external factors such as changes in taxes and inflation rates. Therefore, another potential avenue for future research could involve designing a system capable of online learning, which can adapt to changes in real-time and provide more accurate price predictions.

Finally, the provision of more public datasets pertaining to this task would be beneficial for future research. The dataset 'Car Prices in the Wild', as introduced in this study, can serve as a good starting point. However, the generation and publication of more such datasets can help accelerate research in this field and encourage the exploration of novel methodologies for used car.

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 7%

References

[1] C. Erdem, İ. Şentürk, A hedonic analysis of used car prices in Turkey. International Journal of Economic Perspectives, 3, 141-149, 2009.

[2] E. Liu, J. Li, A. Zheng, H. Liu and T. Jiang, Research on the prediction model of the used car price in view of the pso-gra-bp neural network. Sustainability, 14, 8993, 2022. https://doi.org/10.3390/su14158993.

[3] L. Bukvić, J. Pašagić Škrinjar, T. Fratrović and B. Abramović, Price Prediction and Classification of Used-Vehicles Using Supervised Machine Learning. Sustainability, 14, 17034, 2022. https://doi.org/10.3390/su142417034.

[4] Ö. Çelik and U.Ö. Osmanoğlu, Prediction of the prices of second-hand cars. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 16, 77-83, 2019. https://doi.org/10.31590/ejosat.542884.

[5] K. Samruddhi, RA Kumar, Used car price prediction using k-nearest neighbor based model. Int. J. Innov. Res. Appl. Sci. Eng. (IJIRASE), 4, 629-632, 2020. https://doi.org/10.29027/IJIRASE.v4.i2.2020.629-632.

[6] M. Asghar, K. Mehmood, S. Yasin and Z.M. Khan, Used cars price prediction using machine learning with optimal features. Pakistan Journal of Engineering and Technology, 4, 113-119, 2021. https://doi.org/10.51846/vol4iss2pp113-119.

[7] C. Longani, S.P. Potharaju and S. Deore, Price prediction for pre-owned cars using ensemble machine learning techniques. in: M. Rajesh et al. (Eds.), Recent Trends Intensive Comput, IOS Press, pp. 178-187, Netherlands, 2021.

[8] S. Shaprapawad, P. Borugadda, and N. Koshika, Car Price Prediction: An Application of Machine Learning. Proceedings of 2023 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT), pp. 242-248, Raleigh, USA, 2023.

[9] Y. Li, Y.Li, and Y. Liu, Research on used car price prediction based on random forest and LightGBM. Proceedings of 2022 IEEE 2nd International Conference on Data Science and Computer Application (ICDSCA), pp. 539-543, Dalian, China, 2022.

[10] T. L. Nikmah, R. M., Syafei, R. Muzayanah, A. Salsabila, and A. A. Nurdin, Prediction of Used Car Prices Using K-Nearest Neighbour, Random Forest, and Adaptive Boosting Algorithm. Int. Conf. Optim. Comput. Appl 1, 17-22, 2022.

[11] A. A. Alhakamy, A. Alhowaity, A. A. Alatawi and H. Alsaadi, Are Used Cars More Sustainable? Price Prediction Based on Linear Regression. Sustainability, 15, 911, 2023.

[12] S. Yılmaz and İ. H. Selvi, Price Prediction Using Web Scraping and Machine Learning Algorithms in the Used Car Market. Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences, 6, 140-148, 2023.

[13] S. Voß and S. Lessmann, Resale Price Prediction In The Used Car Market, In Tristan Symposium VIII, pp. 1-4, San Pedro de Atacama, Chile, 2013.

[14] D. R. Das Adhikary, R. Sahu and S. Pragyna Panda, Prediction of used car prices using machine learning. In Biologically Inspired Techniques in Many Criteria Decision Making: Proceedings of BITMDM, pp. 131-140, Singapore, 2022.

[15] Sahibinden, Turkish online marketplace. https://www.sahibinden.com/, Accessed 22 March 2021.

[16] Arabam, Turkish online marketplace. https://www.arabam.com/, Accessed 22 March 2021.

[17] M. Joseph, Pytorch tabular: A framework for deep learning with tabular data. arXiv preprint 2021; arXiv:2104.13638.

[18] W. Song, C. Shi, Z. Xiao, Z. Duan, Y. Xu, M. Zhang and J. Tang, Autoint: Automatic feature interaction learning via self-attentive neural networks. Proceedings of the 28th ACM international conference on information and knowledge management, pp. 1161-1170, Beijing, China, 2019.

[19] J.R. Quinlan, Induction of decision trees. Machine learning, 1, 81-106, 1986. https://doi.org/10.1007/BF00116251.

[20] L. Breiman, J. Friedman, R. Olshen and C. Stone, Classification and regression trees. CRC Press. Boca Raton, Florida, 1984.

[21] L. Breiman, Random Forests. Machine learning, 45, 5-32, 2001. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324.

[22] T.K. Ho, The random subspace method for constructing decision forests. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 20, 832-844, 1998. https://doi.org/10.1109/34.709601.

[23] T. Chen and C. Guestrin, Xgboost: A scalable tree boosting system. Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining, pp. 785-794, New York, USA, 2016.

[24] P. Geurts, D. Ernst and L. Wehenkel, Extremely randomized trees. Machine learning, 63, 3-42, 2006. https://doi.org/10.1007/s10994-006-6226-1.

[25] L. Prokhorenkova, G. Gusev, A. Vorobev, A.V. Dorogush and A. Gulin, CatBoost: unbiased boosting with categorical features. 32nd Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS), pp. 1-11, Montréal, Canada, 2018.

[26] M. Ali, Moez AliPyCaret: An open source, low-code machine learning library in Python, https://www.pycaret.org/, Accessed 1 January 2023.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 350-358

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Görsel kelime tabanlı ses sahteciliği tespit yöntemi

Audio forgery detection method based on visual word

Beste Üstübioğlu[1,*], Arda Üstübioğlu[2]

[1] *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon Türkiye*
[2] *Trabzon Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, 61335, Trabzon, Türkiye*

Öz

Ses kayıtlarının adli olaylarda delil olarak kullanılması halinde, bu kayıtlarının içeriğinin değiştirilmesi suç teşkil etmektedir. Ses kopyala-yapıştır sahteciliği, konuşmanın içeriğini değiştirmek amacıyla yapılan sahteciliklerden en yaygın olanıdır. Bu sahtecilik, sesteki bir kelime ya da kelime grubunun kopyalanıp, aynı sesin içinde herhangi bir konuma yapıştırılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada ses kopyala-yapıştır sahteciliğini tespit etmek için görsel kelimelere dayalı sağlam ve yeni bir yöntem önerilmektedir. Önerilen yöntem, şüpheli ses dosyasındaki sahtecilik ipuçlarını tespit etmek için sesten elde edilen kelimelerin Mel-Spectogram görüntülerini kullanır. Bu amaçla ses dosyası öncelikle perde bazlı ses aktivite algılama (Voice Activity Detection-VAD) yöntemi kullanılarak kelimelere ayrılır. Daha sonra her kelime Mel Spectogram görüntüsüne dönüştürülür. Spectogram görüntüleri arasındaki benzerliği hesaplamak için yapısal farklılık (Structural Difference-DSSIM) kullanılır. Kelime görüntüleri arasındaki DSSIM değerlerine göre sahte kelimeler işaretlenir. Deneysel sonuçlar, önerilen yöntemin diğer çalışmalara kıyasla son işlem operasyonlarına karşı önemli ölçüde yüksek dayanıklılığa sahip olduğunu ve daha yüksek doğruluk değerini verdiğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Ses sahteciliği, Kopyala-yapıştır, Spectogram, DSSIM.

Abstract

Changing the content of these recordings constitutes a crime if speech recordings are used as evidence in judicial cases. Audio copy-move forgery is the most common forgery made to change the content of the conversation. This forgery is carried out by copying a word or group of words in the speech and pasting it to any position within the same speech. In this study, a robust new method based on visual words is proposed to detect audio copy-move forgery. The proposed method uses Mel-Spectogram images of words extracted from the audio to detect forgery clues in the suspicious audio file. For this purpose, the audio file is first separated into words using the pitch-based VAD method. Each word is then converted into a Mel Spectogram image. DSSIM is used to calculate the similarity between spectrogram images. Forgery segments are marked according to the DSSIM values between word images. Experimental results show that the proposed method has significantly higher robustness to post-processing operations and yields higher accuracy compared to other works.

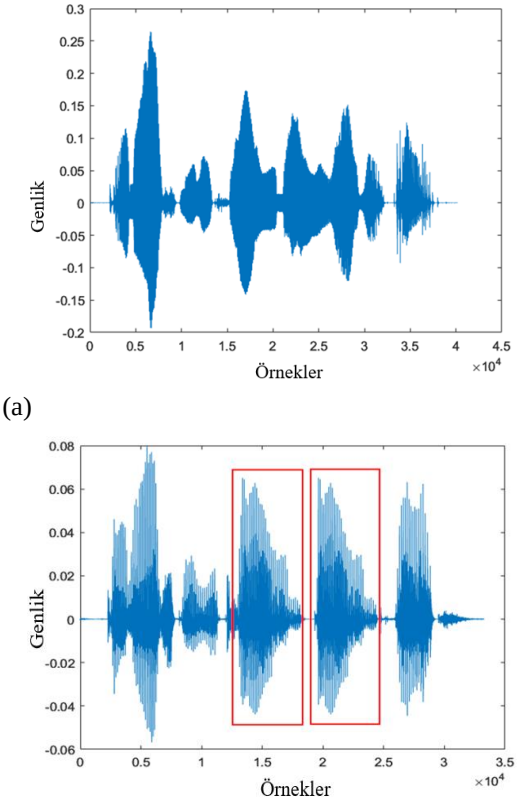
Keywords: Audio forgery, Copy-move, Spectrogram, DSSIM.

1 Giriş

Günümüzde ses teknolojisinde yaşanan hızlı gelişmeler, ses verilerinin çok hızlı bir şekilde üretilmesine, işlenmesine, saklanmasına ve dağıtılmasına olanak sağlamaktadır. Bu durum, çoğu zaman olumlu sonuçlar doğursa da birçok sorunu da beraberinde getirmektedir. Bu sorunlardan en önemlisi ses verisinin güvenilirliğidir. Güvenilirlik, ses verilerinin bütünlüğü ile yani bilgi içeriğinin herhangi bir şekilde yetkisiz değişiklik, silme veya imha tehditlerine karşı korunması ile sağlanmaktadır. Gelişmiş ses düzenleme yazılımlarının kolay kullanılabilirliği sayesinde ses dosyalarının bütünlüğü bozulabilmekte ve saldırganlar tarafından oldukça kolay bir şekilde ses sahteciliği yapılabilmektedir. Ses tanıma alanında [1-3] da sistemi yanıltmak üzere bu tür sahteciliklere oldukça fazla başvurulmaktadır. Bir başka örnek olarak bir dava sırasında mahkemeye delil olarak sunulan bir konuşma kaydının içeriğinde "Olay gecesi Ali oradaydı ama Hasan orada değildi" cümlesi yer almaktadır. Saldırgan tarafından bu cümledeki "orada değildi" cümle parçası kopyalanarak, "oradaydı ama" cümle parçasının üzerine yapıştırılıyor. Böylece ses kaydındaki cümlenin içeriği saldırgan tarafından "Olay gecesi Ali orada değildi, Hasan orada değildi "şeklinde değiştirilmekte ve sahte bir ses kaydı oluşturularak cümlenin anlamı tamamen farklılaştırılmaktadır. Oluşturulan bu sahte kayıt da ilgili davanın gidişatını tamamen tersine çevirebilme durumunu beraberinde getirmektedir. Bu açıdan bakıldığında özellikle adli davalarda ses kayıtlarının doğruluğunun araştırılması büyük önem arz etmektedir. Örnek cümledeki gibi sesteki bir cümle parçasının kopyalanıp aynı sesin başka bir konumuna yapıştırılmasıyla ses kopyala-yapıştır sahteciliği gerçekleştirilmektedir. Şekil 1' de ses kopyala-yapıştır sahteciliği için bir örnek verilmiştir. Şekil 1(a) TIMIT veri tabanından ("sa2.wav") alınan sesi gösterirken, Şekil 1(b)

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: bustubioglu@ktu.edu.tr (B. Üstübioğlu)
Geliş / Recieved: 19.09.2023 Kabul / Accepted: 11.12.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1363316

orijinal sesteki dördüncü kelimenin üçüncü kelime üzerine yapıştırılması ile elde edilen sahte sesi göstermektedir. Şekilde kırmızı çerçeveler kopyalanan ve yapıştırılan bölümleri göstermektedir.



Şekil 1. (a)Orijinal (b) Sahte ses

Kopyala-yapıştır sahteciliğin tespitini zorlaştıran en önemli etkenlerden biri, sahte sesin oluşturulma aşamasında sahtecilik izlerini gizlemek için, saldırganlar tarafından sahte sese uygulanan gürültü ekleme, medyan filtreleme ve sıkıştırma gibi son işlem operasyonlarıdır. Önerilecek sahtecilik tespit yönteminin bu operasyonlara dayanıklı olması gerekmektedir. Literatürde ses kopyala-yapıştır sahteciliğini tespit etmeye yönelik önerilen yöntemler üç sınıfa ayrılabilir: Pencere tabanlı, VAD tabanlı yöntemler ve spectrogram tabanlı.

Pencere tabanlı yöntemlerde, ses dosyası önce örtüşmeyen veya eşit uzunluktaki örtüşen pencerelere bölünmektedir. Daha sonra ses pencerelerinden son işlem operasyonlarına dayanıklı özellikler elde edilir. Pencerelerden elde edilen özellikler arasındaki benzerliğe göre sahte pencereler işaretlenmektedir. Pencere tabanlı ilk çalışma Xiao ve ark. [4] tarafından önerilmiştir. Önerilen çalışmada öncelikle ses dosyası T periyotlu pencerelere bölünmüştür. Pencereler arasındaki benzerliği hesaplamak için hızlı evrişimsel algoritmalardan yararlanılmıştır. Belirli bir eşiğin üzerinde benzerliğe sahip pencereler, sahte pencereler olarak işaretlenmiştir. Bir diğer çalışmada Su ve ark. [5] ses dosyası içerisindeki sesli bölümler içindeki ve arasındaki ses kopyala-yapıştır sahteciliğini tespit etmek için iki ardışık pencere (SW) stratejisi önermiştir. Çalışmada anlık Q kepstral katsayıları (constant Q cepstral coefficients–CQCC) özelliği ile pencerelerden özellik çıkarılmıştır. Farklı kısa pencereler arasındaki benzerlik Pearson korelasyon katsayıları ile hesaplanmıştır. Su ve ark. [6] diğer çalışmasında seste kopyalanan bölümleri tespit etmek için sabit Q spectral çizimlerini ve özelleştirilmiş bir genetik algoritma (GA) ile destek vektör makinesinin (Support Vector Machine-SVM) birleşimini kullanmıştır. Bu amaçla öncelikle CQSS özniteliklerini çıkarmak için kare-büyüklük sabiti Q dönüşümünün logaritmasının ortalamasını aldılar. Daha sonra çıkarılan CQSS özelliklerini optimize etmek için GA' yı kullandılar. Son aşamada ise SVM ile optimize edilen özellikler sınıflandırılıp sahte segmentler işaretlenmiştir.

VAD tabanlı yöntemlerde ses dosyasının sesli bölümleri VAD yöntemleriyle çıkarılmaktadır. Sonrasında sesli bölümlerden elde edilen özellikleri arasında benzerlik hesaplaması yapılmaktadır. Sahte segmentler benzerlik hesabına göre tespit edilmektedir. Wang ve ark. [7], tekil değer ayrıştırma (Singular Value Decomposition-SVD) dönüşümü ve ayrık kosinüs dönüşümü (Discrete Cosinus Transform- DCT) ile ses kopyala-yapıştır sahteciliğini tespit etmek için bir yöntem önermiştir. Önerilen yöntemde ses dosyası VAD yöntemiyle sesli bölümlere ayrıldıktan sonra her ses parçasından DCT katsayıları elde edilmiştir. Daha sonra bu katsayıların kare matrisine SVD uygulanarak özvektörler elde edilmiş ve benzerlik hesaplamasında Öklid uzaklığından (ED) faydalanılmıştır. Yan ve ark. [8] önce ses dosyasından perde dizisini (Pitch) elde etmiştir. Perde dizilerinin benzerliğini hesaplamak için ortalama fark (AD) ve Pearson korelasyon katsayısı (Pearson Correlation Coefficient-PCC) yöntemlerinden faydalanmışlardır. Xie ve ark. [9] sesli bölümlerin her birinden ses perdesi, ayrık Fourier dönüşüm katsayıları (Discrete Fourier Transform-DFT), Mel frekans cepstral katsayıları (Mel-frequency cepstral coefficient-MFCC) ve gamatonlar gibi dört ayrı özellik çıkarmıştır. Bu özelliklerin benzerliklerini PCC ve ADD yöntemlerini kullanarak hesaplamıştır. Bu dört özellikten elde edilen tespit sonuçları, nihai kararı elde etmek için C4 karar ağacıyla birleştirilmiştir. İmran ve ark. [10] yerel ikili örüntü (LBP) yöntemine dayalı bir ses kopyala-yapıştır sahteciliği tespit yöntemi önermiştir. Bu yöntemde de diğer VAD tabanlı yöntemler gibi öncelikle sesli bölümler önerdikleri VAD yöntemiyle elde edilmiştir. Daha sonra, her sesli bölümlerden özellik olarak LBP histogramları üretilmiştir. Histogramların benzerlik hesaplaması MSE ve ER metrikleri ile yapılmıştır. Anh ve ark. [11] fonetik diziye dayalı bir yaklaşım sunmuştur. Yöntemlerinde, çıkarılan sesli bölümlerden fonetik diziler elde edilmiştir. Farklı fonetik diziler arasındaki benzerlik en küçük sapmalarla hesaplanmıştır. Mannepalli ve ark. [12] sesten sesli bölümleri elde ettikten sonra her sesli bölümün MFCC özelliğini çıkarmıştır. MFCC özelliklerinin benzerlik hesaplamasında dinamik zaman bükmesi (Dynamic Time Warping-DTW) yönteminden faydalanılmıştır. Üstübioğlu ve ark. [13] YAAPT yöntemiyle sesten sesli bölümleri çıkarmışlardır. Sonrasında bu sesli bölümlerden MDCT katsayıları elde etmişler ve özellik olarak katsayı matrisinin transpozesinin ortalamasını almışlardır. Sesli bölümlerin

özellikleri arasındaki benzerlikleri ölçmek için Öklid mesafesi (Euclidean Distance-ED) kullanılmıştır. Huang ve diğerleri. [14] sesli bölümlerden DFT katsayılarını çıkarmışlardır. Hesaplama maliyetini azaltmak için, önerdikleri yöntemde bu özellikler sıralanmıştır. Sesli bölümler arasındaki benzerliği hesaplamak için PCC yöntemi kullanılmıştır. Yan ve ark. [15] ses dosyasının sesli bölümlerini normalleştirilmiş düşük frekanslı enerji oranıyla çıkarmıştır. Sesli bölümlerden perde ve formant dizileri çıkarıldıktan sonra DTW yöntemiyle benzerlik hesaplaması yapılmıştır.

Spectrogram tabanlı yöntemlerde ses dosyaları spectrogram görüntüsüne dönüştürülür. Özellik çıkarma aşamasında, VAD ve pencere tabanlı yöntemlerden farklı olarak, giriş verisi ses yerine görüntü olduğundan bu yöntemler, ses özellik çıkarım yöntemleri yerine görüntü özellik çıkarım yöntemlerini kullanır. Özellik çıkarımından sonra, spectrogram görüntüsü üzerinde elde edilen işaretlemeler sese izdüşürülür ve kopyalanan bölümler ses üzerinde işaretlenir. Üstübioğlu ve ark. sahte segmentleri tespit etmek için literatürde ilk kez Mel spectrogramı ile derin öğrenme yöntemini kullanmıştır [16]. Çalışmada önerilen CNN mimarisi, şüpheli Mel spectrogram görüntülerini iki sınıfa ayırmktadır: orijinal ve sahte. Üstubioğlu ve ark. [17] diğer çalışmasında Mel-spectrogram görüntüsündeki anahtar noktaları çıkarmak için SIFT yöntemini kullanmıştır. Görüntü kanallarından elde edilen anahtar noktalar özellik vektörleri aracılığıyla eşleştirilmiş ve anahtar noktaları merkez olarak belirlenen görüntü alt blokları sahte bloklar olarak işaretlenmiştir. Üstubioğlu ve ark. [18] bir başka çalışmalarında şüpheli sesi görselleştirmek için süper çözünürlüklü spectrogram görüntülerini kullanmıştır. Ardından, BRIEF yöntemiyle spectrogram görüntüsünden anahtar noktalar ve tanımlayıcıları çıkarılmıştır. İlgili tanımlayıcıları kümeleme yaklaşımıyla eşleştirmek için OPTICS yöntemi kullanılmıştır. Daha sonra yöntemde, spectrogram görüntüsündeki kümelerde yer alan anahtar noktaların konumuna bağlı olarak kopyalanmış bölümler işaretlenmiştir.

Literatürde ses kopyala-taşı sahteciliğinin tespiti için yapılan bu çalışmalar irdelendiğinde, tüm çalışmalarda genel bir algoritmik yaklaşım uygulandığı görülmüştür. Bu yaklaşımda ses dosyası öncelikle pencerelere veya sesli kısımlara bölünür. Daha sonra bu pencerelerden veya sesli bölümlerden, son işlem operasyonlarına dayanıklı bir ses özellik çıkarım yöntemiyle özellikler elde edilir. Elde edilen özelliklerin benzerliğine göre kopyalanıp yapıştırılan bölümler işaretlenir. Daha önceki çalışmalarımızda Üstübioğlu ve ark. [16-18], literatürdeki bu çalışmalardan farklı olarak ses verileri görüntüye dönüştürülmüş (Mel-spectrogram, Yüksek çözünürlüklü spectrogram) ve giriş verisi olarak ses yerine görüntü alınmıştır. Ses bir görüntü ile temsil edildiğinden diğer çalışmalardan farklı olarak ses özelliği çıkarma yöntemleri yerine görüntüden özellik çıkarma yöntemleri kullanılmıştır. Önerilen bu çalışmada, önceki çalışmalarımızdan farklı olarak spectrogram görüntüsü sesin tamamından oluşturulmamış, sesten elde edilen sesli kısımlar, spectrogram görüntülerine dönüştürülmüştür. Böylece önerilen yöntemde sesin tamamına karşılık gelen spectrogram görüntüsünü çıkarmak yerine, seslendirilen her bir kısma karşılık gelen spectrogram görüntüsü çıkarılarak daha detaylı bilgi içeren bir görüntü elde edilmiştir.

Bu çalışmada son işlem operasyonlarından bağımsız, görsel kelime tabanlı yeni bir ses sahteciliği tespit yöntemi önermektedir. Önerilen yöntem, şüpheli ses dosyasındaki sahtecilik ipuçlarını tespit etmek için sesin sesli bölümlerininin (kelime) Mel spectogram görüntülerini kullanır. Bu amaçla ses dosyası öncelikle ses perdesine dayalı bir VAD yöntemi kullanılarak sesli parçalara bölünmektedir. Daha sonra her sesli bölüm için bir Mel spectogram görüntüsü oluşturulur. Mel spectogram görüntüleri arasındaki benzerliğin hesaplanmasında DSSIM metriği kullanılmaktadır. Mel spectogram görüntüleri arasındaki DSSIM değerlerine göre sahte kelimeler işaretlenmektedir. Önerilen yöntemlerin katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- Literatürde ilk kez, ses dosyasının sesli bölümlerinden elde edilen Mel spectogram görüntüleri kullanılarak ses kopyala yapıştır sahteciliğinin olası ipuçları araştırılmıştır.
- Sesli bölümlerden çıkarılan Mel spectogram görüntülerinin saldırılara karşı dayanıklılığı sayesinde önerilen ses kopyala-yapıştır sahteciliği tespit yöntemi, saldırılardan bağımsız bir yöntemdir.
- Deneysel sonuçlar, önerilen yöntemin, ses kopyala-yapıştır sahteciliğinin tespitinde literatürdeki diğer çalışmalara göre üstün performans gösterdiğini kanıtlamaktadır.

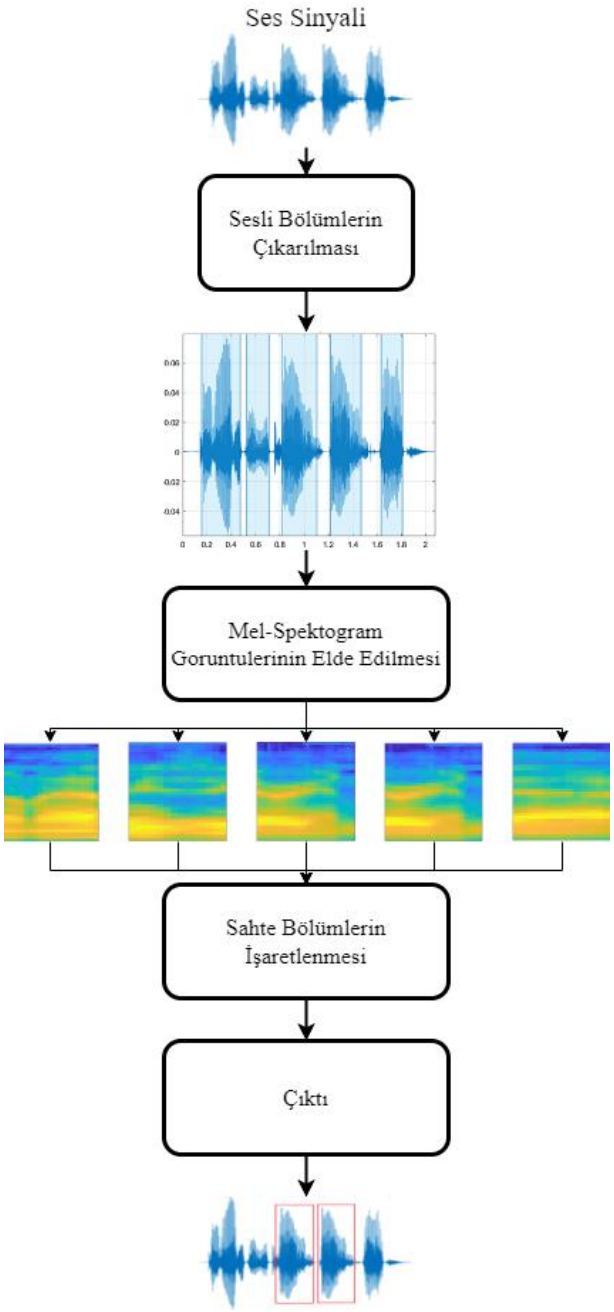
Makalenin geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: Önerilen ses kopyala-yapıştır sahteciliği yönteminin detayları Materyal ve Metot bölümünde verilmiştir. Bulgular ve Tartışma bölümünde ise deneysel metodoloji sonuçlarının sunumunu ve analizi gösterilmektedir. Sonuç bölümünde ise çalışma sonlandırılmıştır.

2 Materyal ve metot

Çalışmada görsel kelime tabanlı yeni bir ses kopyala-yapıştır sahteciliği tespit yöntemi önerilmektedir. Bu bölümde önerilen yöntemin tüm detayları sunulacaktır. Şekil 2' de görüldüğü gibi, önerilen yöntem üç aşamadan oluşmaktadır: Sesli bölümlerin çıkarılması, sesli bölümlerden Mel spectogram görüntülerinin elde edilmesi, Mel spectogram görüntüleri arasındaki benzerliğe göre sahte segmentlerin işaretlenmesi. İlk aşamada, ses dosyasının sesli bölümlerini çıkarmak için perdeye dayalı VAD tekniğini [13] kullanılmaktadır. Daha sonra elde edilen her bir sesli bölüm ikinci aşamada Mel spectogram görüntüsüne dönüştürülmektedir. Son aşamada ise Mel spectogram görüntüleri arasındaki benzerlik hesabında korelasyon kullanılmaktadır. Tüm görüntüler arasında hesaplanan DSSIM değerleri kaydedilir. Görüntüler arasında elde edilen DSSIM değerlerine göre de sahte kelimeler işaretlenmektedir. Aşağıdaki alt bölümlerde, önerilen yöntemin her aşaması detaylandırılacaktır.

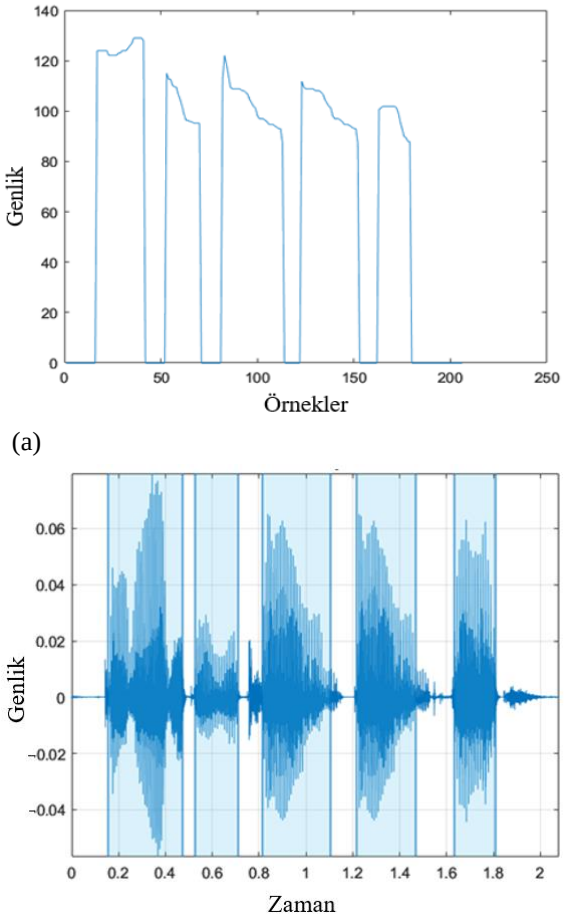
2.1 *Sesli bölümlerin çıkarılması*

Önerilen yöntemde, ses dosyasından sesli bölümlerin çıkarılmasında [13]'da önerilen perde dizisi (Pitch) tabanlı VAD algoritması kullanılmıştır.



Şekil 2. Önerilen yöntemin akış diyagramı

Perde dizisi, temel frekansı ifade eden ve vokal ifadenin titreşim frekansını veren bir kavramdır. Bir kişi aynı sesli bölümleri iki kez söylese bile bu sesli bölümlerin perde dizileri birbirinden farklı olacaktır [19]. YAAPT popüler bir perde dizisi çıkarma yöntemidir. YAAPT yöntemi Ön İşleme, Spectral bilgiyi kullanarak perde dizisi tahmini, Perde dizisi aday tahmini ve Dinamik Programlama ile son perde dizisi belirleme gibi dört aşamadan oluşmaktadır. YAAPT yöntemi ile perde dizisi elde edildikten sonra dizideki sıfırdan büyük frekans değerleri konuşmada sesli bölümler olarak işaretlenir. Şekil 3(a)' da Şekil 1(b)' deki sahte sesten çıkarılan perde dizisi verilmiştir. Şekil 3(b)'deki mavi çizgiler, sesteki perde dizilerine göre elde edilen sesli bölümlerin sınırlarını temsil etmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi sahte konuşma, elde edilen perde dizisine göre beş sesli bölüme ayrılmıştır. Üçüncü ve dördüncü bölümler kopyalanıp yapıştırılmış sahte bölümlerdir.



(a)

(b)

Şekil 3. (a)Perde dizisi (b)Ayrılmış sesli bölümler

2.2 *Sesli bölümlerden mel spectogram görüntülerinin elde edilmesi*

Önerilen yöntemde bir önceki aşamada elde edilen sesli bölümler Mel spectogram görüntüsüne dönüştürülmektedir. Sesli bölümlerinin spectrogramını oluşturmak için Kısa Zamanlı Hızlı Fourier dönüşümünü (STFT) kullanılmıştır. Bunun için ses sinyali öncelikle 30 ms' lik karelere bölünmüş ve her kare Hamming penceresiyle çarpılmıştır. Daha sonra Denklem (1)' e göre tüm alt çerçevelere FFT uygulanmıştır.

$$S(f,t) = \sum_{n=0}^{N-1} w_n x_t(n) \exp(-j2\pi(f/f_s)n) \quad f = k f_s/N \qquad (1)$$

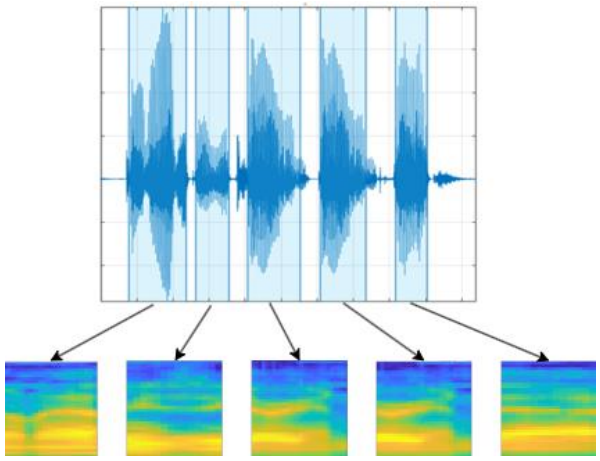
Burada w_n hamming window pencere, *x(n)* orijinal ses sinyali, *f*, *k*=1, 2,…*N*/2+1 için frekans aralığı, *N* her bir çerçevedeki örnek sayısıdır.

Spectrogram gösteriminde genlik spectrogramı, güç spectrogramı, faz spectrogramı ve log genlik spectrogramı gibi birçok farklı yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde frekanslar eşit aralıklarla temsil edilmektedir. Ancak bazı yöntemler aynı zamanda insan duyu sisteminin özelliklerini de kullanır ve düşük frekanslı bileşenlere daha duyarlı, yüksek frekanslı bileşenlere ise daha az duyarlıdır. Mel spectrogramı, insan duyu sistemini temel alan ve giriş sesinin zaman-frekans gösteriminde kullanılan yöntemlerden biridir. Mel spectogram, ses sinyalinin her çerçevesindeki frekans spectrumuna Mel ölçeğinin uygulanması ile elde edilmektedir. Mel spectrogram katsayıları Denklem (2)'ye göre hesaplanır.

$$S_{mel}(f,t) = \sum_{l=0}^{L-1} m_k(l)|S(l,t)|^2 \qquad (2)$$

Burada L frekans bileşeni sayısı, $m_k(l)$ mel filtre bankasının k.filtresidir.

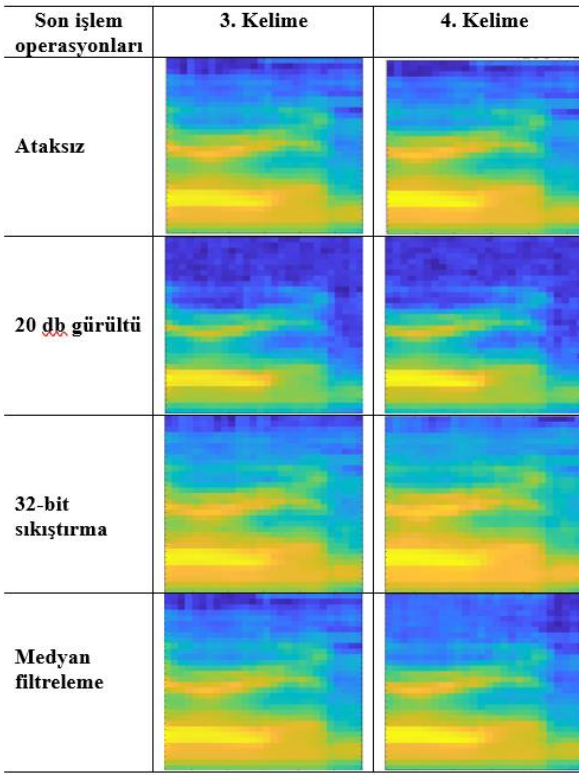
Şekil 4, Şekil 3(b)'de verilen mavi ile ayrılmış beş segmentten elde edilen Mel spectogram görüntülerini sunmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi 3. ve 4. segmentlere karşılık gelen Mel spectogram görüntüleri aynıdır.



Şekil 4. Sesli bölümlerden oluşturulan mel spectogram görüntüleri

Önerilen yöntemde Mel spectogram görüntüleri seçilmesinin bir nedeni bu görüntülerin son işlem operasyonlarına olan dayanıklılığıdır. Bu dayanıklılığı göstermek için Şekil 5' te 3. ve 4. sahte segment görüntülerine atak uygulama sonucunda elde edilen görüntüler verilmiştir.

Şekil 5'te görüldüğü gibi segmentlerin ataksız Mel spectogram görüntüleri ile sıkıştırma, gürültü ekleme ve medyan filtreleme uygulanan görüntüleri oldukça benzerdir. Bu da mel spectogram özelliğinin son işlem operasyonlarına oldukça dayanıklı olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. Sahte sese atak uygulama sonucunda oluşan mel spectogram görüntüleri

2.3 Sahte bölümlerin işaretlenmesi

Önerilen yöntem, Mel spectogram görüntüleri arasındaki benzerliği hesaplamak için Yapısal Farklılık metriğini (DSSIM) kullanmaktadır. Yapısal Benzerlikten (SSIM) çıkarılan Yapısal Farklılık (DSSIM) metriği bir uzaklık metriği olup, x ve y görüntüleri arasında Denklem (3)' teki gibi hesaplanmaktadır.

$$DSSIM(x,y) = (1 - SSIM(x,y))/2 \qquad (3)$$

Buradaki SSIM metriği, iki görüntünün benzerliğini hesaplamak için kullanılan algısal bir ölçümdür [20]. SSIM bir görüntüden üç özelliği çıkarır: parlaklık, kontrast ve yapı. Bu özelliklerin birleşimini görsel bilgi olarak kullanır. İki görüntü arasında hesaplanan SSIM değeri -1 ile 1 arasında değişmektedir. 1 değeri, benzerliği hesaplanan iki görüntünün aynı olduğunu, -1 değeri ise bu görüntülerin çok farklı olduğunu göstermektedir. Temel olarak, iki x ve y görüntüsü arasındaki yapısal benzerlik indeksi, bir mesafe ölçümünü tanımlar.

$$SSIM(x,y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_x\sigma_y + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \qquad (4)$$

Burada μ_x ve μ_y sırasıyla görüntü ortalamalarını gösterirken $\sigma_x$ve σ_y standard sapmayı göstermektedir. c_1 ve c_2 sabitlerinin değerleri ise 0,01 ve 0,03 olarak ayarlanmıştır. Bu şekilde ses dosyasındaki sesli bölümlerden çıkarılan Mel

spectogram görüntüleri arasındaki benzerlik hesaplanmaktadır. Hesaplanan benzerlik değerlerinden, belirlenen benzerlik eşiği *t*' den büyük olan değeri veren kelime görüntüleri sahte segmentler olarak işaretlenmektedir. Önerilen çalışmada SSIM metriği yerine DSSIM metriği kullanılmıştır. Çünkü DSSIM değerleri 0 ile 1 arasında değiştiği için eşik değeri daha kolay seçilmiştir. Tablo 1, Şekil 4'te verilen Mel spectogram görüntülerinden elde edilen DSSIM değerlerini göstermektedir. Kalın ile gösterilen değerler eşik değerinden küçük olduğu için bu değerleri veren x ve y kelimeleri sahte kelimeler olarak tespit edilmiştir.

Tablo 1. Segmentler arasındaki DSSIM değerleri

DSSIM	Segment çiftleri	
0.2257	1	2
0.2043	1	3
0.2078	1	4
0.1617	1	5
0.1994	2	3
0.19741	2	4
0.1948	2	5
0.06553	**3**	**4**
0.1828	3	5
0.1842	4	5

3 Bulgular ve tartışma

Çalışmanın bu bölümünde önerilen yöntemin ve literatürdeki benzer çalışmaların performans değerlendirme sonuçlarına yer verilecektir. Sonuçlar ses kopyala-yapıştır sahteciliği ile oluşturulmuş sahte ses veri tabanı [13] üzerinde elde edilmiştir. Bu veri tabanı iki saniyeden altı saniyeye kadar İngilizce konuşmalardan oluşan TIMIT konuşma veri tabanındaki [21] sesler kullanılarak oluşturulmuştur. Sahte sesler, ses dosyalarındaki rastgele bir sesli bölüm kopyalanıp aynı ses dosyasındaki herhangi bir konuma yapıştırılarak oluşturulmuştur. Her sahte segmentin süresi yaklaşık olarak 0,2 saniye ile 0,6 saniye arasındadır. Toplamda 368 adet sahte ses bulunmaktadır. Önerilen yöntemin son işlem operasyonlarına dayanıklılığını göstermek için bu seslere 30 dB ve 20 dB'lik gürültü ekleme, medyan filtreleme ve 32 kbps ve 64 kbps atakları uygulanmıştır. Böylece veri setinde ataklı seslerde dahil toplam 2208 adet sahte ses bulunmaktadır.

Önerilen yöntemi diğer yöntemlerle kapsamlı bir şekilde karşılaştırmak için bu çalışmada Doğruluk, Kesinlik (Precision), Duyarlılık (TPR, Recall) ve F skor metrikleri kullanılmıştır. Doğruluk, doğru tespit edilen sahte seslerin ile doğru tespit edilen orijinal seslerinin toplamının toplam ses sayısına oranıdır. Doğruluk, Denklem (5)' e göre hesaplanmaktadır.

$$Doğruluk = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (5)$$

Burada TP, sahte ses olarak tespit edilen sahte ses sayısıdır; TN orijinal ses olarak tespit edilen orijinal seslerin sayısıdır; FP sahte ses olarak tespit edilen orijinal seslerin sayısıdır; FN, orijinal sesler olarak tespit edilen sahte seslerin sayısıdır. Hassasiyet, doğru şekilde tespit edilen sahte seslerin toplam tespit edilen sahte seslere oranını gösterirken; Kesinlik, doğru şekilde tespit edilen sahte seslerin tüm sahte seslere oranını gösterir. F-ölçüsü kesinlik ve duyarlılığın ağırlıklı ortalamasıdır. Hassasiyet, Duyarlılık ve F-skor ölçümleri sırasıyla Denklem (6), (7) ve (8)' de verilmiştir.

$$Hassasiyet = \frac{TP}{TP + FP} \quad (6)$$

$$Duyarlılık = \frac{TP}{TP + FN} \quad (7)$$

$$F\_skor = \frac{2xPrecisionxRecall}{Precision + Recall} \quad (8)$$

Yüksek bir F-skor değeri, hassasiyet ve duyarlılık açısından daha iyi bir genel performansı göstermektedir.

Sahte ses veri tabanı kullanılarak ve bu metriklerle gerçekleştirilecek ilk deneyde önerilen yöntemin ataklara karşı dayanıklılığı test edilmiştir. Bu amaçla her bir atak için önerilen yöntemin performansı değerlendirilmiştir. Tablo 2, ataklı ve ataksız sesler ile önerilen yöntemden elde edilen Doğruluk, Duyarlılık, Hassasiyet ve F-skor değerlerini göstermektedir.

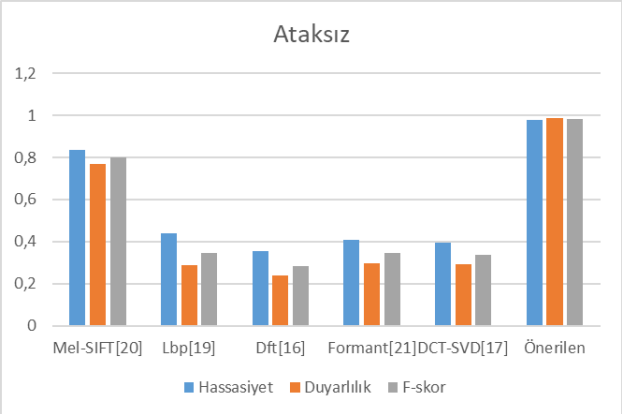
Tablo 2. Önerilen yöntemin tespit sonuçları

	Doğruluk	Hassasiyet	Duyarlılık	F1 skor
Ataksız	0.9758	0.9785	0.9891	0.9838
30db	0.9758	0.9785	0.9891	0.9838
20db	0.9677	0.9785	0.9891	0.9783
Medyan	0.9194	0.9767	0.913	0.9438
32 bit	0.9597	0.978	0.9674	0.9727
64 bit	0.9617	0.9781	0.9701	0.9741

Tablo 1' den görülebileceği gibi, önerilen yöntem sıkıştırma, medyan filtreleme ve gürültü ekleme sonrası işleme işlemlerine karşı oldukça dayanıklıdır. Önerilen yöntemin F1-puan değerleri incelendiğinde 0,94 ve üzerinde olduğu görülmektedir. Bununla birlikte beş atak sonucunda elde edilen F1 skoru değerleri birbirine oldukça yakındır. Atağa rağmen elde edilen skorların yakın olması da önerilen yöntemin atak bağımsız bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Bir başka deney olarak önerilen ses kopyala-yapıştır sahtecilik tespit yöntemi literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmalar Lbp [10], Dft [14], Formant [15], DCT-SVD [7] ve Mel-SIFT [17] olarak adlandırılmıştır. Bu çalışmalardan LBP, Formant ve DCT-

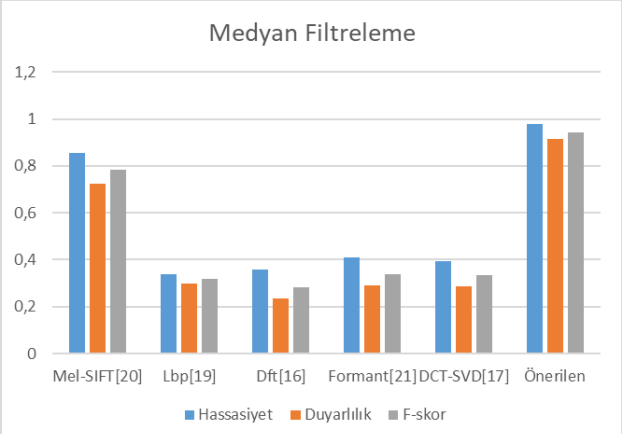
SVD yöntemleri VAD tabanlı yöntemler oldukları için çalışmalarda belirtilen ilgili VAD yöntemleri uygulanmıştır. Şekil 6 ataksız seslerle Mel-SIFT, Lbp, Dft, Formant, DCT-SVD ve önerilen yöntemden elde edilen ortalama Hassasiyet, Duyarlılık ve F-skor sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 6. Ataksız seslerde yöntemlerin tespit sonuçları

Şekil 6'da görülebileceği gibi, önerilen yöntem Mel-SIFT, Lbp, Dft, Formant, DCT-SVD yöntemlerine göre oldukça yüksek performans göstermiştir. Önerilen yöntemden 0.98 F-skor değeri elde edilirken, önerilen yönteme en yakın F-skor değeri Mel-SIFT yöntemiyle elde edilmiştir. Mel-SIFT yöntemi dışındaki yöntemlerin performansı oldukça düşüktür.

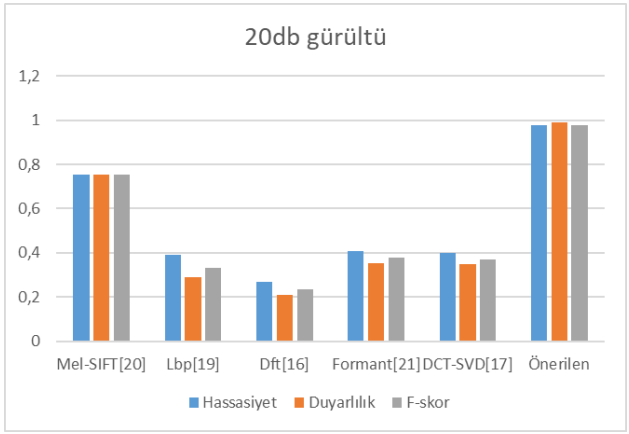
Yöntemlerin medyan filtreleme atağına karşı dayanıklılığı da analiz edilmiştir. Şekil 7, medyan filtreleme sonucunda MelSIFT, Lbp, Dft, Formant, DCT-SVD ve önerilen yönteme ait ortalama Hassasiyet, Duyarlılık ve F-skor sonuçlarını sunmaktadır.



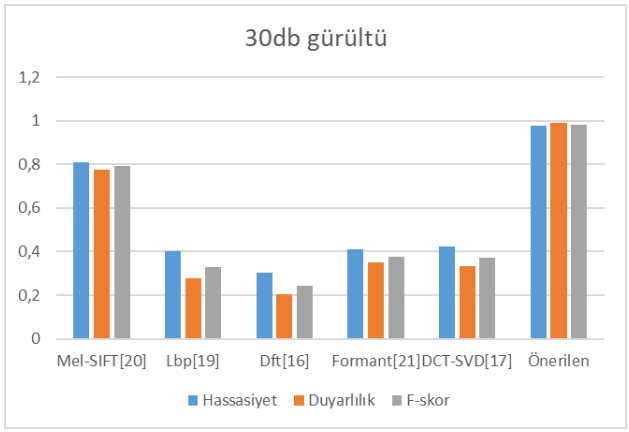
Şekil 7. Medyan filtreleme uygulanmış seslerde yöntemlerin tespit sonuçları

Şekil 7' de verilen değerler incelendiğinde en yüksek F-skor değeri 0.94' ü önerilen yöntem verirken, en düşük değer 0.28'i DFT yöntemi vermektedir. Arada oldukça büyük bir fark olduğu görülmektedir. Bu sonuçta önerilen yöntemin medyan filtreleme saldırısına karşı diğer yöntemlere göre çok daha sağlam olduğunu göstermektedir.

Gürültü atağı değerlendirmek için de önerilen yöntem ve diğer yöntemler hem 20 db hem de 30 db'lik gürültülü seslerle test edilmiştir. Elde edilen performans ölçüm sonuçları, 20db gürültü için Şekil 8(a)'da ve 30db gürültü için Şekil 8(b)'de verilmiştir.



(a)



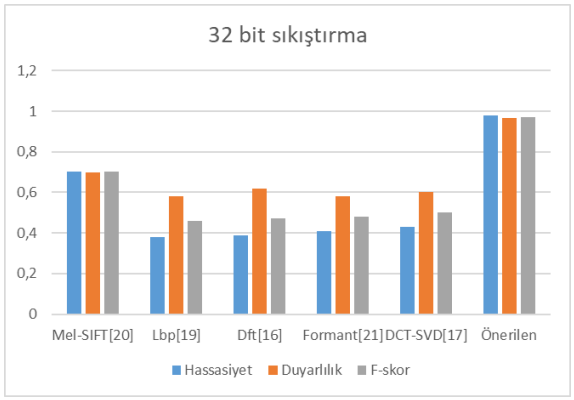
(b)

Şekil 8. Tespit sonuçları (a) 20db (b) 30db gürültü eklenmiş seslerde

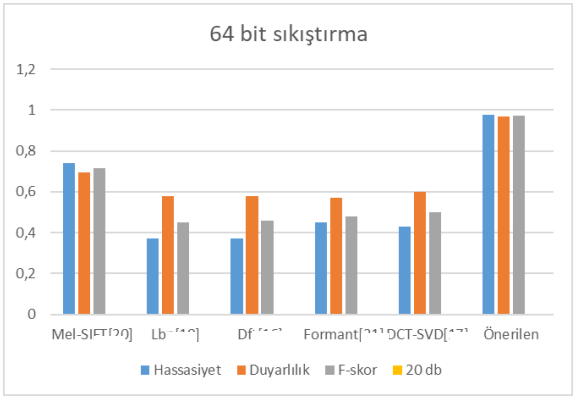
Şekil 8'den de görülebileceği gibi önerilen yöntem için 30db gürültü eklenmesi sonucunda elde edilen Hassasiyet, Duyarlılık ve F-skor değerleri sırasıyla 0.97, 0.98 ve 0.98'dir. Bu değerler oldukça yüksek değerlerdir. 20 db'lik gürültü ekleme için elde edilen Hassasiyet, Duyarlılık ve F-skor değerleri sırasıyla 0.97, 0.98 ve 0.97' dir. Gürültü miktarı artmasına rağmen değerlerin neredeyse değişmediği ve oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca önerilen yöntem dışında 20db ve 30db gürültü için elde edilen en yüksek F1 skoru değerleri sırasıyla 0.75 ve 0.79 olup Mel-SIFT yöntemiyle elde edilmiştir. Bu deneyden elde edilen sonuçlara göre önerilen ses kopyala-taşı sahtecilik tespit yöntemi gürültüye karşı oldukça dayanıklı ve yüksek doğruluk vermektedir.

Son olarak ise sıkıştırma atağı analiz edilmiştir. Yöntemlerden elde edilen performans metrikleri 32 kbps sıkıştırma için Şekil 9(a)'da ve 64 kbps sıkıştırma için Şekil 9(b)'de verilmektedir. Şekil 9' dan görüldüğü gibi Lbp yöntemi en düşük ortalama değerleri verirken, önerilen

yöntem hem 32 kbps sıkıştırmada hem de 64 kbps sıkıştırmada en yüksek ortalama değerleri vermektedir. Önerilen yöntemle F-skor değerleri sırasıyla 32 ve 64 bit sıkıştırma için 0.97 olarak elde edilmiştir. Farklı sıkıştırma değerlerine rağmen F-skor değeri değişmemiştir. Mel-SIFT yöntemi önerilen yönteme en yakın F-skor değerini vermiştir. Tüm analiz sonuçları değerlendirildiğinde, ses dosyalarına çeşitli ataklar uygulansa dahi önerilen yöntem, literatürdeki diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında oldukça yüksek bir performans göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 9. Tespit sonuçları (a)32 bit sıkıştırma (b) 64 bit sıkıştırma uygulanmış seslerde

4 Sonuçlar

Bu çalışmada ses kopyala-yapıştır sahteciliğini tespit etmek için yeni bir yaklaşım önerilmektedir. Giriş verilerinin ses dosyası olması nedeniyle bu alanda önerilen yöntemlerde 1D özellik çıkarımı ve benzerlik hesaplama yöntemlerini kullanmaktadır. 2D özellik çıkarma ve benzerlik hesaplama yöntemlerinin çeşitliliği göz önüne alındığında, bu durum ses sahteciliği tespit alanını sınırlamaktadır. Bu amaçla ses dosyasındaki her sesli bölümden Mel spectogram görüntüleri çıkarılmıştır. Mel spectogram görüntülerinin benzerlik hesaplaması için DSSIM metriğinden faydalanılmıştır. Önerilen yöntem, TIMIT veri setinden oluşturulan sahte ses veri seti ile alandaki yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, önerilen ses kopyala-yapıştır sahteciliği tespit yönteminin ilgili alanda üstün performans sağladığını, etkili ve atak bağımsız olduğunu göstermektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

[1] S. Keser, Ö. N. Gerek, E. Seke, M. B. Gülmezoğlu, A subspace based progressive coding method for speech compression. Speech Communication, 94, 50-61, 2017. https://doi.org/10.1016/j.specom.2017.09.002

[2] S. Keser, R. Edizkan, Phonem-based isolated Turkish word recognition with subspace classifier. In 2009 IEEE 17th Signal Processing and Communications Applications Conference, pp. 93-96, Antalya, Turkey 2009.

[3] O. F. Çıplak, S. Kevser, Gerçek zamanlı ses tanıma ile robot kolu kontrolü. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 31, 34-39, 2021. https://doi.org/10.31590/ejosat.969608

[4] J. N. Xiao, Y. Z Jia, E. D Fu., Z. Huang, Y. Li, & S. P. Shi, Audio authenticity: Duplicated audio segment detection in waveform audio file. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 19, 392-397, 2014. https://doi.org/10.1007/s12204-014-1515-5

[5] Z. Su, M. Li, G. Zhang, Q. Wu, & Y. Wang, Robust audio copy-move forgery detection on short forged slices using sliding window. Journal of Information Security and Applications, 75, 103507, 2023. https://doi.org/10.1016/j.jisa.2023.103507

[6] Z. Su, M. Li, G. Zhang, Q. Wu, M. Li, W. Zhang & X. Yao, Robust Audio Copy-Move Forgery Detection Using Constant Q Spectral Sketches and GA-SVM. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2022. https://doi.org/10.1109/TDSC.2022.3215280

[7] F. Wang, C. Li, L. Tian, An algorithm of detecting audio copy-move forgery based on DCT and SVD. In: 2017 IEEE 17th International Conference on Communication Technology (ICCT). IEEE, pp. 1652–1657, Chengdu, China, 2017.

[8] Q. Yan, R. Yang, J.Huang, Copy-move detection of audio recording with pitch similarity. In: 2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), IEEE, pp. 1782–1786, Brisbane, Australia, 2015.

[9] Z. Xie, W. Lu, X. Liu, Y. Xue, Y. Yeung, Copy-move detection of digital audio based on multifeature decision. Journal of Information Security and Applications, 43, 37-46, 2018. https://doi.org/10.1016/j.jisa.2018.10.003

[10] M. Imran, Z. Ali, S.T. Bakhsh, S. Akram, Blind detection of copy-move forgery in digital audio forensics. IEEE Access 5, 12843–12855, 2017. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2717842

[11] N.T. Anh, H.T.T. Hang, G. Chen, One approach in the time domain in detecting copy-move of speech recordings with the similar magnitude. International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS), 6(4), 9–11, 2019. https://dx.doi.org/10.31873/IJEAS/6.4.2019.05

[12] K. Mannepalli, P. Krishna, K. Krishna, Copy and move detection in audio recordings using dynamic time warping algorithm. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), 9(2), 2244–2249, 2019. http://doi.org/10.35940/ijitee.B6678.129219

[13] B. Ustubioglu, B. Kucukugurlu, G. Ulutas, Robust copy-move detection in digital audio forensics based on pitch and modifed discrete cosine transform. Multimedia Tools and Applications, 81, 27149–27185, 2022. https://doi.org/10.1007/s11042-022-13035-3

[14] X. Huang, Zi Liu, W. Lu, H. Liu, S. Xiang, Fast and effective copy-move detection of digital audio based on auto segment. In: Digital forensics and forensic investigations: breakthroughs in research and practice. IGI Global, pp. 127–142, 2020.

[15] Q. Yan, R. Yang, J. Huang, Robust copy–move detection of speech recording using similarities of pitch and formant. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 14(9), 2331–2341, 2019. https://doi.org/10.1109/TIFS.2019.2895965

[16] A. Ustubioglu, B. Ustubioglu, G. Ulutas, Mel spectrogram-based audio forgery detection using CNN. Signal, Image and Video Processing, 17, 2211 - 2219, 2022. https://doi.org/10.1007/s11760-022-02436-4

[17] B. Ustubioglu, G. Tahaoglu, G. Ulutas, Detection of audio copy-move-forgery with novel feature matching on Mel spectrogram. Expert Systems with Applications 213, 118963, 2023. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118963

[18] B. Ustubioglu, G. Tahaoglu, G. Ulutas, A. Ustubioglu & M. Kilic, Audio forgery detection and localization with super-resolution spectrogram and keypoint-based clustering approach. The Journal of Supercomputing, 80, 486-518, 2023. https://doi.org/10.1007/s11227-023-05504-9

[19] A. Stephen, H. Hu, A spectral/temporal method for robust fundamental frequency tracking, The Journal of the Acoustical Society of America, 123:6, pp:4559-4571, 2008. https://doi.org/10.1121/1.2916590

[20] Z. Wang, A.C, Bovik Sheikh, H.R., Simoncelli, E.P. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. IEEE Transactions on Image Processing. 13:4, 600–612, 2004. https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861

[21] TIMIT Acoustic-Phonetic Continuous Speech Corpus, https://catalog.ldc.upenn.edu/LDC93s1

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 359-369

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Mevcut betonarme yapı üzerine çelik ve betonarme ek kat tasarımı ve deprem performanslarının karşılaştırılması

Comparison of earthquake performances between steel and reinforced concrete additional floor design on existing reinforced concrete structure

Tuğba Dilek[1], Tuna Ülger[2,*]

[1,2] *Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye*

Öz

Ülkemizde yaşanan depremlerin özellikle mevcut yapılar üzerindeki yıkıcı etkileri, bu yapıların deprem performansının en doğru şekilde değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Yapının güçlendirilmesi veya yıkılması kararı yapısal performans değerlendirme çalışmalarını odak noktası haline getirmiştir. Bununla birlikte yapının kullanım amacında meydana gelecek farklılıklar ve ek yapılar yine mevcut yapısal performans değerlendirme analizlerini gerektirmektedir. Yapılan araştırma kapsamında öğrenci yurdu olarak tasarlanmış daha sonrasında konaklama evi olarak kullanılmaya devam etmekte olan mevcut 4 katlı betonarme bir yapıya ek 1 kat yapılması planlanmaktadır. Bu çalışmada ek kat mimari açıdan en fazla oda barındıracak şekilde tasarlanmış ve taşıyıcı sistemi çelik ve betonarme olmak üzere iki farklı şekilde oluşturulmuştur. TBDY (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği) 2018'e göre mevcut ve ek katlı yapısal modellerin performans analizleri yapılarak, mevcut yapının deprem performansındaki değişim çelik ve betonarme ek katlı durumlar için karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Yapısal modellere ait yapısal periyotlar, kat ötelemeleri, itme eğrileri, plastik mafsal oluşumları ve olası hasar mertebeleri kıyaslanarak mevcut yapı için performans ve uygunluk değerlendirmesi yapılmıştır. Yapının taşıma gücü dikkate alındığında her iki ek kat için güçlendirilmesi gereken eleman sayıları nispeten aynı olmaktadır. Diğer yandan, yapıda çelik ek kat imalatının plastik mafsal oluşumlarını %15.22 'ye kadar, kat ötelemelerini ise %37.8'e kadar azalttığı elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Performans analizi, Güçlendirme, Mevcut yapı, İlave kat, Çelik, Betonarme

Abstract

The destructive effects of earthquakes in our country, especially on existing structures, have focused on the evaluation and strengthening of the earthquake performance of the existing structures. The decision of either strengthening or demolition of the existing structures requires performance evaluation tests. Additionally, the use of change of the buildings can requires performance tests. In this study, an additional story was planned to be constructed on a four story building, which was originally designed as a student dormitory then revised to be used as a hotel. The additional story was designed to be accommodate the maximum rooms counts, and two different structural systems was considered using steel and concrete. The performance of the existing building with and without additional story was investigated under earthquake loads according to the TBDY (Turkey building earthquake code) 2018. Structural periods, story drifts, performance curves, plastic hinge formations and possible damage levels for the two different models were compared with each other. The results showed that both additional stories were produced similar number of deficient structural members on the base structure in terms of the structural load capacities. On the other hand, the amount of plastic hinges and story drifts reduced up to 15.22% and 37.8% for additional steel story, respectively.

Keywords: Performance analysis, Reinforcement, Existing structure, Additional floor, Steel, Reinforced Concrete

1 Giriş

Dünyadaki en yoğun deprem kuşaklarından biri olan Alp-Himalaya deprem kuşağında yer alan ülkemiz, jeodinamik konumu ve jeolojik oluşumu dolayısıyla yıkıcı etkileri olan enerji boşalmalarına maruz kalmaktadır. Deprem riski düzeyinin bu denli fazla olduğu ülkemizde, 1990-2023 yılları arasında yerel magnitüdleri 7 ve üzeri olan 5, 6 ve üzeri 17 adet şiddetli deprem gerçekleşmiş ve bu depremler sonucunda ciddi oranda can ve mal kaybı yaşanmıştır. Bölgedeki deprem riski gerçeği ve oluşacak olan depremlerin zamanı ve şiddetinin istatiksel tahminlere bağlı olması, ülkemizde depreme dayanıklı yapı tasarımı, mevcut yapıların sismik performansı ve güçlendirilmesi alanlarındaki çalışmaların önemini vurgulamaktadır [1-3]. Yaşanan depremlerin genelde o dönemin ilgili yönetmelik ve standartlarında yenilenme gereksinimi ortaya çıkarmasıyla, ülkemizde 1940 yılından bu yana birçok deprem yönetmeliği yürürlüğe girmiştir. Güncel olanı 18 Mart 2018 tarihli Resmî

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: tunaulger@beun.edu.tr. (T. Ülger)
Geliş / Recieved: 23.07.2023 Kabul / Accepted: 18.12.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngmuh.1331711

Gazete 'de yayınlanmış ve 1 Ocak 2019 tarihinde yürürlüğe girmiş olan TBDY 2018 [4], mevcut yapıların performans düzeylerinin ve güçlendirmeye ihtiyaçlarının belirlenmesi ile yaşanacak kayıpların önüne geçilmesi konusunda yol gösterici özelliktedir. 2018 Deprem Yönetmeliği eski yönetmeliklere göre oldukça geliştirilmiştir ve diğer yönetmelikler ile birçok yönden paralellik göstermektedir. Dünyanın birçok ülkesinde depreme dayanıklı yapı tasarımı, yapıların sismik performansının tayini ve güçlendirilmesi konuları için hazırlanmış yönetmelik ve standartlar bulunmaktadır. Applied Technology Council tarafından yayımlanan ATC 40 [5], Federal Emergency Management Agency tarafından yayımlanan FEMA 273(1997) [6], FEMA 274(1997) [7], FEMA 356(2000) [8], FEMA 440(2005) [9], American Society of Civil Engineers tarafından yayımlanan ASCE 41-06 (2007) [10] ve European Committee for Standardization; CEN tarafından yayımlanan Eurocode 8 [11] bu alandaki başlıca standartlardır. TBDY 2018' de de şekildeğişimine göre tasarım esasları ve yapıların deprem performansının belirlenmesi ve güçlendirilmesi detaylı şekilde yukarıda bahsi geçen yönetmeliklere de paralel olarak ele alınmıştır.

Mühendisliğin başlıca gayesi sismik etkilere dayanıklı yapıların tasarımında güvenilir, uygulanabilir ve ekonomik tasarım yaklaşımlarını benimsemektir. Bu alanda Dayanıma Göre Tasarım ve Şekil Değişimine Göre Tasarım olmak üzere iki farklı tasarım yaklaşımı uygulanmaktadır. Dinamik etkiler altında yapı sistemlerinin elastik ötesi davranış sergilemesi, kuvvete dayalı hesap yöntemlerinin yetersizliği, daha ekonomik ve gerçeğe yakın çözüm arayışı, doğrusal elastik yöntemlerden ziyade doğrusal olmayan tasarım yaklaşımlarını ön plana çıkarmıştır. Bu tasarım yaklaşımları şekil değiştirmeye (performansa) dayalı tasarım, mevcut yapıların deprem performansının belirlenmesi ve güçlendirilmesi konularını kapsamaktadır. Performansa dayalı tasarımda yapıların hasar düzeylerinin ve süneklik isteminin tayini için İtme Analizleri ve Zaman Tanım Alanında Dinamik Analiz yöntemleri uygulanmaktadır [12-15]. İtme Analizi yöntemlerinin Zaman Tanım Alanında Dinamik Analizlere göre daha pratik ve uygulanabilir olması bu çözüm yöntemini bazı durumlarda daha tercih edilir kılabilmektedir. Mevcut yapıların sismik performansı ve güçlendirilmesi konusunda literatür incelenmiş olup özellikle ülkemizde, deprem yönetmeliğinin 2018 yılında revize edilmesiyle bu konudaki çalışmaların yoğunlaştığı görülmüştür. Mevcut yapıların performansı ve değerlendirilmesi, yeni yönetmelik uygulama ve esasları ile eski yönetmeliklerin ve diğer uluslararası yönetmeliklerin karşılaştırılması, yapıların sismik performans düzeylerinin tayininde kullanılan doğrusal olmayan analiz ve yöntemleri üzerine birçok çalışma yapılmıştır [16-27]. Bununla birlikte bu çalışmada ele alınmış olan mevcut yapı üzerine ilave kat tasarımı konusunda yapılmış araştırmaların ise sınırlı sayıda olduğu görülmüştür. Mevcut yapı üzerine ilave kat tasarımı konusu kapsamında Bekiroğlu ve ark. (2015) tarafından mevcut betonarme çok katlı bir okul binası üzerine istenilen amaçlar doğrultusunda çelik taşıyıcı sisteme sahip çok amaçlı salon tasarımı ve analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler neticesinde mevcut yapı için belirlenen ilave çelik sistemin başarılı sonuç verdiği elde edilmiştir [28].

Literatür araştırması sonucu mevcut yapıların performans analizi konusunda çelik yapılar ve hem çelik ve hem betonarmeden oluşan yapılar üzerine yapılan çalışmaların betonarme yapılara göre nispeten daha az olduğu tespit edilmiştir. Özellikle ülkemizde mevcut yapı stoğunu daha çok betonarme yapıların oluşturması, çelik ve karma yapılar üzerine yapılan çalışmaların daha az olmasının nedenlerinden biri olabileceği düşünülmektedir. Yapı çeliğinin kullanım avantajları, mevcut yapı stoğu, betonarme ve çelik malzemelerinin davranış farklılığı ve kat ilave edilen mevcut yapı performansı alanındaki literatür eksikliği, çalışmamızın konusunu bu yönde şekillendirmiştir [29,30]. Sismik performans değerlendirmeleri için doğrusal-elastik yöntemlerin yetersizliği ve oluşturulan modellerin doğrusal hesap yöntemlerinin uygulanabilirlik sınırlarını sağlamaması, doğrusal olmayan hesap yöntemlerini bu çalışma için gerekli hale getirmiştir. Çalışma kapsamında birbirinden farklı 3 modelin doğrusal olmayan itme analizleri ARSA (Artımsal Spektrum Analizi) metodu kullanılarak yapılmıştır. Nonlineer itme analizinden elde edilen sonuçlar, incelenen modellerin sismik performans düzeylerinin tayini ve değerlendirilmesi için kullanılmıştır.

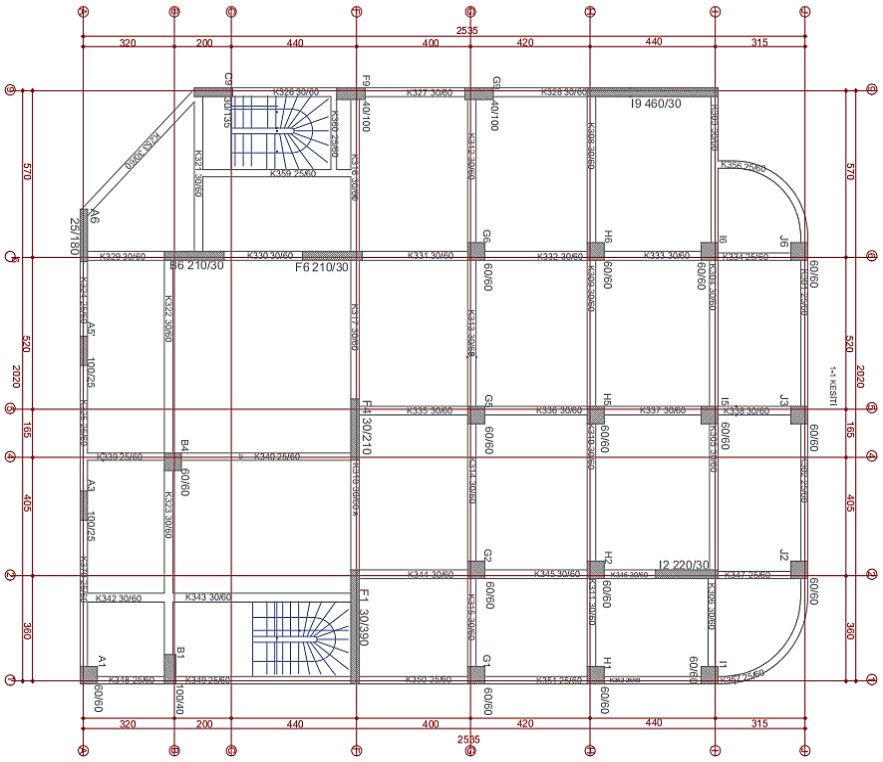
2 Materyal ve metot

Bu çalışmada Zonguldak Merkez bölgesinde bulunan, kullanım amacı ve konumu itibariyle şehir için önemli bir yere sahip Öğretmenevi binası ele alınmıştır. İnşa edildiği yıllardan itibaren birçok misafire konaklama imkânı sunmuş ve sayısız etkinliğe ev sahipliği yapmış olan bu bina için yapı işletmecisinin ilave kat talebi üzerine 2007 Deprem Yönetmeliği esaslarına göre inşa edilmiş olan yapının depreme karşı performansı irdelenmiştir.

2.1 Yapı ve model bilgisi

Yapı, öğrenci pansiyonu (A Blok), konferans salonu (B Blok), restoran-kafeterya (C Blok) ve çok amaçlı salon (D Blok) olmak üzere 4 bloktan oluşmaktadır. İlave katın uygulanabilirliği üzerine mimari gereksinimler düşünülmüş ve çalışmaların restoran-kafeterya (C Blok) bölümü için yapılması uygun görülmüştür.

Bu çalışma kapsamında 3 farklı model oluşturulmuştur. Mevcut betonarme yapı 1. modeli, mevcut yapı üzerine betonarme ilave kat 2. modeli, çelik ilave kat ise 3. modeli temsil etmektedir. Mevcut yapının plan ölçüleri 20.60 x 25.55 m'dir. Kat yüksekliği 2.80 m olan 2 bodrum kat, 4 m olan 1 zemin kat, 4 m olan 1 normal kat olmak üzere toplam 4 kattan oluşmaktadır. Toplam yapı yüksekliği 13.60 metredir. Mevcut yapıyı temsil eden 1. modele ait tip statik kat planı Şekil 1'de verilmiştir. Yapısal elemanların kesitleri ve donatı oranları da Şekil 1'de yer almaktadır. İlave katlı yapı tasarımlarını temsil eden Model 2 ve Model 3 için kullanılabilirlik durumu incelenerek mevcut yapıya uygun bir mimari kat planı hazırlanmıştır. Her iki modelde ilave edilen kat yüksekliği 4 metre olup toplam yapı yüksekliği 17.60 metreye yükselmiştir.



Malzeme	
Beton	C20
Donatı	S420
Kesit	
Kolon *(cm*cm)*	Donatı Oranı
60x60	0.0113
40x100	0.0102
25x100	0.0143
30x135	0.0113
Perde *(cm*cm)*	Donatı Oranı
25x180	0.0068
30x210	0.0068
30x220	0.0089
30x390	0.0070
30x460	0.0062
Kiriş *(cm*cm)*	
25x60	
30x60	
Döşeme *(cm)*	
15	

Şekil 1. Mevcut yapıya ait tip statik kat planı

Çelik ve betonarme ek katın taşıyıcı sistemi mimari ve statik gereksinimler gözetilerek tasarlanmıştır. Bununla birlikte ilave katların taşıyıcı sistemleri modellenirken düşeyde rijitlik süreksizliği, zımbalama etkisi, kısa kolon etkisi, boyuna donatı süreksizliği gibi oluşabilecek tasarım hatalarından kaçınılmıştır. Model 2 ve 3'e ait betonarme ve çelik ilave kat statik planları Şekil 2 ve Şekil 4'te sırasıyla verilmiştir.

Tablo 1. Mevcut yapıya ait deprem ve analiz parametreleri

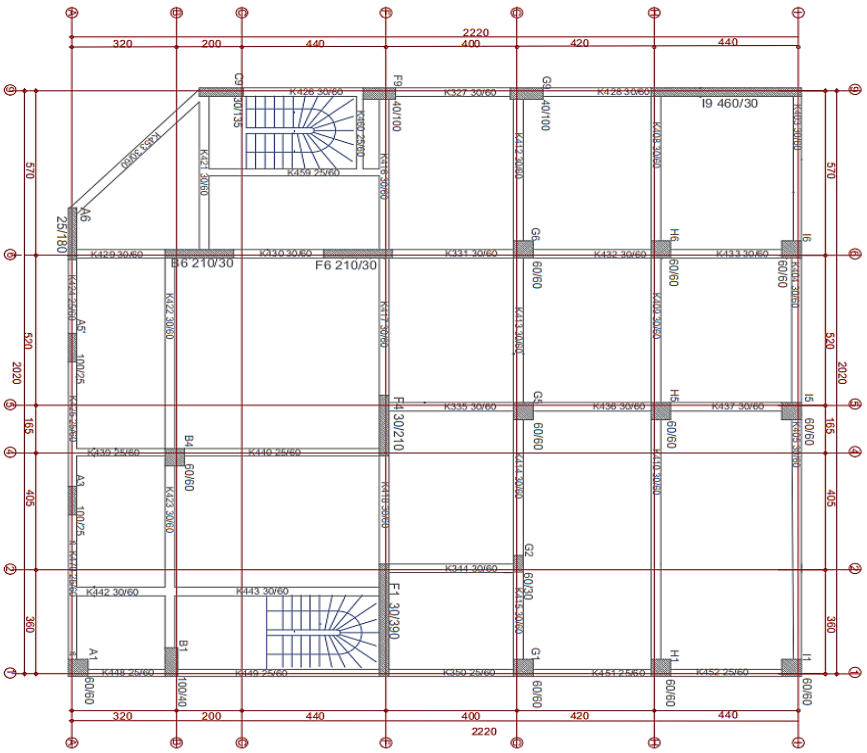
Yapı Koordinatları	E:41.454245 B:31.76111
Deprem Yer Hareketi Düzeyi	DD2
Zemin Sınıfı	ZD
Zemin Taşıma Gücü (qt)	20 tf/m^2
Yatak Katsayısı(ks)	2500 tf/m^3
Kısa Periyot Tasarım İvme Katsayısı (SDS)	0.731
Tasarım İvme Katsayısı (SD1)	0.363
Kısa Periyot Spektral İvme Katsayısı (SS)	0.175
Spektral İvme Katsayısı (S1)	0.061
En Büyük Yer İvmesi (PGA)	0.226 cm/sn^2
En Büyük Yer Hızı (PGV)	13.768 cm/sn
Spektrum Köşe Periyodu (TA)	0.099 sn
Spektrum Köşe Periyodu (TB)	0.496 sn

2.2 *Analiz yöntemi*

Modeller İdeCAD Statik V10 [31] programı ortamında sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Mevcut yapı, onaylı mimari, statik proje ve raporlardan elde edilen plan, malzeme, donatı ve zemin bilgileri doğrultusunda programda birebir oluşturulmuş ve analiz edilmiştir. Mevcut yapının bulunduğu bölge ve zemine ait parametreler Tablo 3'te verilmiştir.

Mevcut yapının dinamik analizlerinde kullanılan karakteristik veriler AFAD [32] ve geoteknik raporlardan elde edilmiş ve Tablo 1'de sunulmuştur. Yapıya ait yatay ve düşey elastik tasarım spektrumları Şekil 3' te verilmiştir. Şekildeki tasarım spektrumları 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan DD2 deprem yer hareketi düzeyi ve ZD sınıfı zemin tipi için elde edilmiştir. Mimari ve statik ilave kat planları oluşturulan Model 2 ve Model 3 birbirinin alternatifi niteliğindeki 2 farklı yapı modelidir. Modeller, farklı tip kat modellerinin eklenmesi sonucu yapının deprem performansındaki değişimi inceleyebilmek amacıyla, mevcut ve yeni yapılacak bölüm olarak ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Modellerin ilave kat bölümleri güncel yönetmelik ve standartlara uygun olacak şekilde analiz edilmiş ve boyutlandırılmıştır.

Çelik yapı eleman ve birleşimlerinin tasarımı ve boyutlandırılmasında TBDY 2018 ve TÇY 2018 [33] esasları dikkate alınmış ve YDKT (Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım) yaklaşımı uygulanmıştır. Kar ve rüzgâr yüklerinin hesabı TS EN 1991-1-3 [34] ve TS 498 [35] standartlarına göre yapılmıştır. Neticede birbiri ile kıyaslanacak ilave kat içeren yapılar mevcut standartlara göre asgari koşulları sağlayacak optimum tasarım yaklaşımına göre boyutlandırılmıştır.



Malzeme	
Beton	C25
Donatı	S420
Kesit	
Kolon *(cm*cm)*	Donatı Oranı
30x60	0.0103
60x60	0.0103
40x100	0.0100
25x100	0.0111
30x135	0.0106
Perde *(cm*cm)*	Donatı Oranı
25x180	0.0073
30x210	0.0069
30x390	0.0058
30x460	0.0055
Kiriş *(cm*cm)*	
25x60	
30x60	
Döşeme *(cm)*	
15	

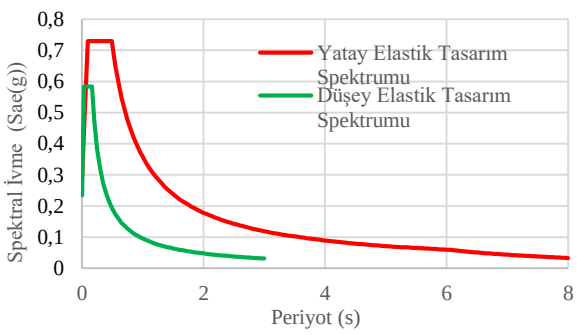
Şekil 2. Betonarme ilave kata ait statik kat planı

İlave kat inşası ile farklı taşıyıcı sistemlerin meydana getireceği düzlem içi ve düzlem dışı şekil değiştirmelerin hesaba katıldığı yarı rijit diyafram döşeme kabulü ile sonlu elemanlar analiz modeli oluşturulmuştur.

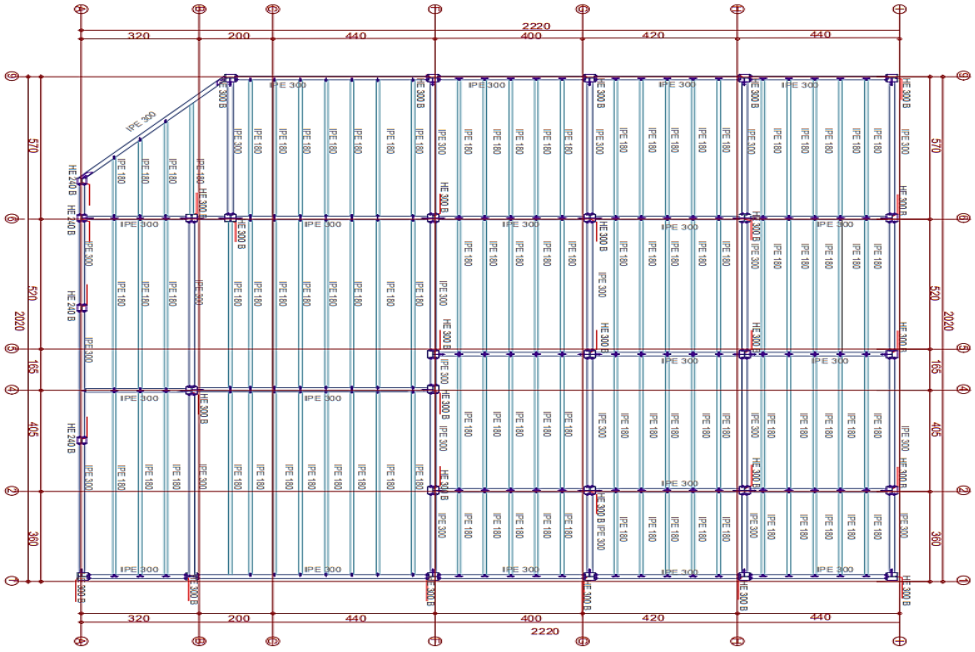
TBDY 2018'e göre her iki deprem doğrultusu (x, y) için modellerin taşıyıcı sistem tipi ve buna bağlı olarak Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı (R) ve Dayanım Fazlalığı Katsayısı (D) belirlenmiştir. Modellerin ilave kat bölümleri yeni yapı olarak tasarlandığından rijitlik, öteleme ve yük olarak mevcut yapı performansına etkileri incelenmiş ve performans değerlendirmesine dâhil edilmemiş, yalnızca ilave kat hariç olan mevcut bölümleri performans değerlendirmesine tabi tutulmuştur. Mevcut yapıdan elde edilen bilgilerin yapıya ait proje ve raporlarla sınırlı kalması ve yerinde malzeme dayanımı ve özelliklerinin deneye tabi tutulmaması sebebi ile performans analizleri yapının proje ve raporlara uygun olarak yapıldığı varsayımına dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Modellere ait analiz ve malzeme bilgileri Tablo 3'te verilmiştir. Analizlerde kullanılan malzeme modelleri ve etkin kesit rijitlikleri TBDY 2018' de belirtilen esaslara uygun olarak belirlenmiştir.

TBDY 2018 kapsamında yapıların sismik performans tespiti için doğrusal ve doğrusal olmayan hesap olmak üzere iki farklı yöntem kullanılabilmektedir. Fakat taşıyıcı sistem yapısı ve davranışına göre doğrusal hesap yöntemleri sınırlı yapı türleri için uygulanabilmektedir. Yapı TBDY 2018 Bölüm 15'te belirtilen doğrusal hesap yönteminin uygulanması kapsamındaki süneklik ve kesme kuvveti koşullarını sağlayamadığından bu çalışmada yapılacak analizler için doğrusal hesap yöntemlerinin uygun olmadığı belirlenmiş ve doğrusal olmayan hesap yöntemleri ile analiz modelleri oluşturulmuştur.

Mevcut yapıların değerlendirilmesinde kullanılacak doğrusal olmayan hesap yöntemleri, Tek Modlu İtme Yöntemleri, Çok Modlu İtme Yöntemleri ve Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Hesap Yöntemidir. Çözümleme hızı ve modelleme kolaylığı gibi pratik özellikler sunmasından dolayı bu çalışmada doğrusal olmayan itme hesap yöntemleri tercih edilmiştir. Modellerin TBDY 2018 Bölüm 5'te belirtilen tek modlu itme analizi için gerekli olan TBDY Bölüm 3, Tablo 3.5'e göre hesaplanan burulma düzensizliği katsayısının ηbi<1.4 ve doğrusal elastik davranış esas alınarak hesaplanan hâkim titreşim moduna ait taban kesme kuvveti etkin kütlesinin toplam yapı kütlesine oranının en az 0.70 olması koşullarını sağlayamaması üzerine çok modlu artımsal itme yöntemi ile analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Bölgeye ait tasarım spektrum eğrileri



Malzeme	
Yapı Çeliği	S235
Kesit	
Kolon *(mm)*	
HE300B	
HE240B	
Kiriş *(mm)*	
IPE180	
IPE300	
Kompozit Döşeme *(cm)*	
10	

Şekil 4. Çelik ilave kata ait statik kat planı

Modellerin deprem performans düzeylerinin tayininde Aydınoğlu (2003) [36] tarafından geliştirilen ve çok modlu itme analizi yöntemlerinden biri olan ARSA metodu kullanılmıştır. Bu yöntemde yönetmeliklerde belirtilen elastik davranış spektrumu esas alınmaktadır. ARSA analizleri öncesi mevcut düşey yükler altında modellerin statik analizleri yapılarak itme analizlerinin başlangıç koşulları oluşturulmaktadır. Her bir itme adımında hesap edilen doğrusal olmayan spektral yer değiştirmelere bağlı modal yer değiştirme artımları belirlenerek her mod için iç kuvvet ve yer değiştirme değerleri elde edilir.

Her bir mod TBDY 2018 Bölüm Ek 4B.2.4'de belirtilmiş olan "Tam Karesel Birleştirme Kuralı" ile birleştirilmekte ve doğrusal olmayan modal yer değiştirmeler için ise "Eşit Yer Değiştirme Kuralı" kullanılmaktadır [36, 37].

Mevcut yapıların değerlendirilmesi aşamasında deprem performansını etkileyen hususlardan biri olan çatlamış kesite ait etkin kesit rijitliklerinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalar çatlamış kesit rijitlik hesaplarının yapıya etkiyecek deprem kuvvetlerini dolayısıyla yapı periyodu ve göreli kat ötelemelerini ve bununla birlikte yapılan performans analizleri neticesinde elde edilen hedef deplasman ve buna karşılık gelen taban kesme kuvveti değerlerini büyük ölçüde etkilediğini göstermektedir [38, 39].

TBDY 2018'de etkin kesit rijitlik değerleri, şekil değiştirmeye ve dayanıma göre tasarım aşamalarında kullanılmak üzere iki farklı hesap sunmaktadır. Mevcut yapıların deprem performansının değerlendirilmesi aşamasında kullanılacak etkin kesit rijitlik çarpanları TBDY 2018 Bölüm 4.5.8'de belirtilen esaslara göre uygulanacaktır. İtme analizlerinde mevcut yapıların sismik performans hesaplarında alınacak etkin kesit rijitlik çarpanları için yönetmelikteki Tablo 4.2'de belirtilen değerler kullanılmıştır. Kullanılan değerler Tablo 2'de verilmiştir. Doğrusal olmayan analizlerde yapısal sistemlerin incelenmesinde, iki ana davranış modeli kullanılmaktadır. Bu modeller yayılı ve yığılı plastik davranış modeli olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bu çalışma, taşıyıcı sistem içerisinde bulunan çubuk sonlu elemanlar (kolon, kiriş) için yığılı plastik davranış modelini, perde elemanları için ise yayılı plastik davranış modelini uygulamaktadır. Kabuk sonlu elemanlar olarak modellenen perde elemanlarında kullanılan yayılı plastik davranış modelinde tüm eleman uzunluğu boyunca ya da sonlu uzunluktaki uç bölgelerinde doğrusal olmayan şekil değiştirmeler sürekli bir biçimde dikkate alınmaktadır. Bu hipotez kapsamında, kabuk sonlu elemanlar, kesit hücresi (lif) olarak modellenmekte ve kesit hücrelerindeki Tablo 3'te tanımlı gerilme ve şekil değiştirme ilişkileri kullanılarak elde edilmektedir [4].

Tablo 2. Etkin kesit rijitlik çarpanları (TBDY 2018)

Betonarme Yapı Elemanı	Etkin Kesit Rijitliği Çarpanı	
Düzlem İçi	Eksenel	Kayma
Perde	0.50	0.50
Bodrum Perdesi	0.80	0.50
Döşeme	0.25	0.25
Düzlem Dışı	Eğilme	Kesme
Perde	0.25	1.00
Bodrum Perdesi	0.50	1.00
Döşeme	0.25	1.00
Çubuk Eleman	Eğilme	Kesme
Bağ Kirişi	0.15	1.00
Çerçeve kirişi	0.35	1.00
Çerçeve kolonu	0.70	1.00
Perde (eşdeğer çubuk)	0.50	0.50

Tablo 3. Analiz ve malzeme bilgileri

Analiz Bilgileri	Model 1	Model 2	Model 3
Taşıyıcı Sistem Tipi	Betonarme	Betonarme	Betonarme, Çelik
Kat Sayısı	4 kat	5 kat	5 kat
Yapı Yüksekliği	13.60 m	17.60 m	17.60 m
Bina Önem Katsayısı (I)	1		
Bina Kullanım Sınıfı (BKS)	3		
Deprem Tasarım Sınıfı (DTS)	2		
Bina Yükseklik Sınıfı (BYS)	6	5	5
Davranış Katsayısı (R)	7	7	8
Dayanım Fazlalığı Katsayısı (D)	2	2	3
Diyafram Tipi	Yarı Rijit Diyafram		
Tasarım Yaklaşımı	Şekil değiştirmeye Göre Değerlendirme ve Tasarım		
Analiz Yöntemi	Artımsal Spektrum Analizi (ARSA)		
Yapı Bilgi Düzeyi	Sınırlı		
Malzeme Bilgileri	**Model 1**	**Model 2**	**Model 3**
Beton Sınıfı	C20	C20, C25	C20
Donatı Çeliği Sınıfı	S420		
Yapı Çeliği Sınıfı	-	-	S235

Yığılı plastik davranış modelinde ise, doğrusal olmayan şekil değişimler, ilgili kesit yüksekliğinin yarısı olan 'h' değeri kadar bir alanda meydana geldiği ve 'L_p' olarak adlandırılan plastik mafsal boyu içerisinde oluştuğu kabul edilir. Plastik mafsallar, bu alanın orta bölgesi olan (L_p/2) noktasında modellenmektedir. Plastik mafsalların modellenmesi aşamasında kesitlerin moment-eğrilik analizi kullanılır. Moment-eğrilik analizi sonucunda, yapısal elemanlardaki betonarme kesitlerin eğilme ve eksenel kuvvet etkisi altındaki akma momenti (M_y) ve akma eğriliği (ϕ_y), göçme momenti (M_u) ve göçme öncesi eğriliği (ϕ_u) değerleri elde edilir [4].

$$\phi_p = \phi_u - \phi_y \quad (1)$$

$$\theta_p = \phi_p L_p \quad (2)$$

Plastik şekil değişimleri, yapısal elemanlarda akma noktasında başlamakta ve göçme noktasında maksimum değere ulaşmaktadır. Şekil 6'da gösterildiği gibi idealleştirilmiş moment-eğrilik ilişkisi üzerinden plastik mafsal momentleri (M_p) ve plastik dönme değerleri belirlenebilmektedir. Denklem 1'de plastik şekil değiştirme (ϕ_p) eğriliği, Denklem 2'de ise plastik dönme (θ_p) değeri için bir bağıntı sunulmuştur.

Tablo 3. Birim şekil değiştirme ve plastik dönme sınır değerleri (TBDY 2018)

	Birim şekil değiştirme sınırı		Plastik dönme sınırı
	ε_c (Beton)	ε_s (Donatı Çeliği)	θ_p
GÖ	$\varepsilon_c^{(GÖ)}$ (Denk.4)	$0.4\varepsilon_{su}$	θ_p (Denk.5)
KH	$0.75\varepsilon_c^{(GÖ)}$	$0.75\varepsilon_s^{(GÖ)}$	$0.75\theta_p^{(GÖ)}$
SH	0.0025	0.0075	0

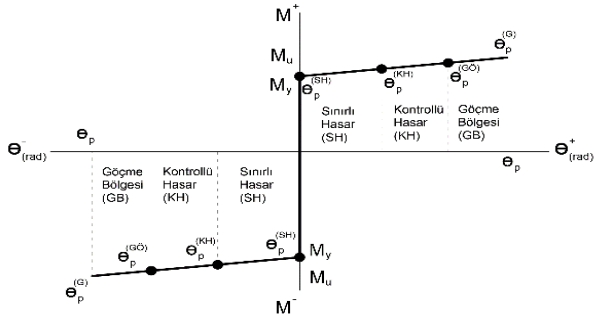
Analiz sonucunda, kesitte meydana gelen akma eğriliği ve göçme eğriliği değerleri, maksimum plastik şekil değiştirme eğrisine ulaşmak için temel veriler sağlamaktadır. Bu değerler, elde edilen plastik şekil değiştirme eğrisi ve plastik mafsal boyutuyla birlikte, plastik mafsalda oluşacak maksimum plastik dönme değerini belirlemek için kullanılmaktadır. Tablo 3'te TBDY 2018'e göre yapısal elemanlardaki birim şekildeğiştirme ve plastik dönme sınır değerleri verilmiştir.

$$\varepsilon_s^{(GÖ)} = 0.4\varepsilon_{su} \quad (3)$$

$$\varepsilon_c^{(GÖ)} = 0.0035 + 0.04\sqrt{\omega_{we}} \leq 0.018 \quad (4)$$

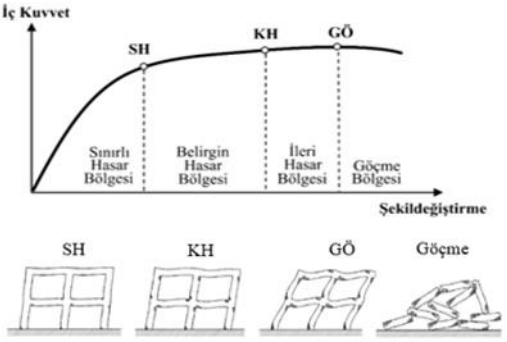
$$\theta_p^{(GÖ)} = \frac{2}{3}\left[(\phi_u - \phi_y)L_p\left(1 - 0.5\frac{L_p}{L_s}\right) + 4.5\phi_u d_b\right] \quad (5)$$

Göçme öncesi sınır değerleri Denklem 3, 4, 5'te belirtilmiştir. Denklem 3'te belirtilen ε_{su} çekme dayanımına karşılık gelen birim uzamayı ifade etmektedir. Denklem 4'te verilen ω_{we}, etkin sargı donatısının mekanik donatı oranıdır ve TBDY 2018 Bölüm 5.8'de detayları ve bağıntıları verilmiştir. Denklem 4'te tanımlanan simgelere ek olarak L_s, kesme açıklığını, d_b ise düğüm noktasına kenetlenen donatı çeliğinin ortalama çapını ifade etmektedir. Plastik mafsallara ait bu değerler elde edildikten sonra, Şekil 5'te verilen tipik plastik mafsal eğrisi oluşturulmakta ve ilgili eleman için hasar düzeyi ve kategorisi tayin edilmektedir.



Şekil 5. Plastik mafsal eğrisi (TBDY 2018)

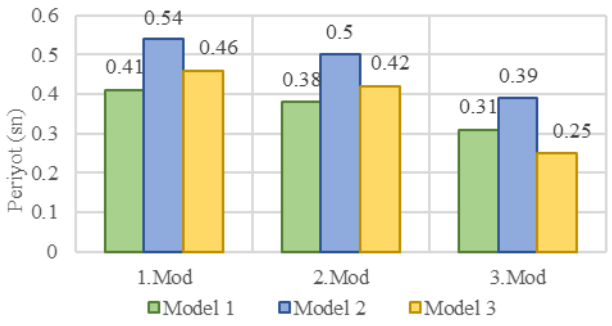
Kesitlerin hasar bölgeleri analiz sonucundan elde edilen iç kuvvet ve şekil değiştirmeler ile TBDY 2018 esaslarına göre verilen kesit hasar sınırlarının karşılaştırılması neticesinde belirlenmiştir. Modellerin performans düzeylerinin tayini ve karşılaştırılması aşamasında en kritik hasar mertebelerine ulaşılan yük durumları referans alınmıştır. Yönetmelikte sünek elemanlar için kesit düzeyinde Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH) ve Göçme Öncesi Hasar (GÖ) durumları ve bunların sınır değerleri tanımlanmıştır. Yapı elemanlarının hasarı SH' ya ulaşmayan elemanlar Sınırlı Hasar Bölgesi'nde, SH ile KH arasında kalan elemanlar Belirgin Hasar Bölgesi'nde, KH ile GÖ arasında kalan elemanlar İleri Hasar Bölgesi'nde, GÖ'yü aşan elemanlar ise Göçme Bölgesi'nde yer alırlar [4]. Yapısal elemanların hasar bölgelerinin tespit edilmesiyle modellere ait yapı performans düzeyleri belirlenmiştir. TBDY 2018'e göre kesit hasar sınır ve bölgeleri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Görsel kesit hasar sınırları (TBDY 2018)

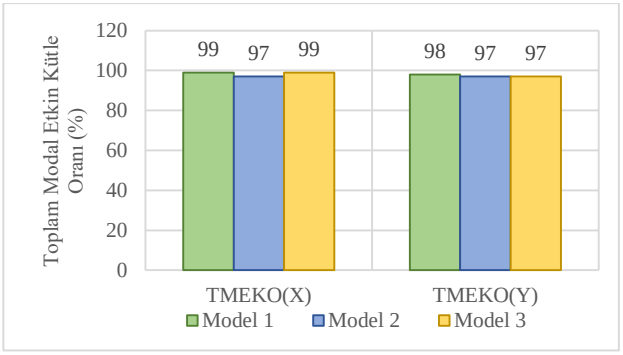
3 Bulgular ve tartışma

Modellere ait yapılan normal statik ve dinamik analizler neticesinde ilk 3 moda ait periyot değerleri Şekil 7'de gösterilmiştir. Elde edilen değerler incelendiğinde ilk 3 mod için Model 2'nin en yüksek periyot değerine ulaştığı görülmüştür. Bunun yanında modellerin X ve Y doğrultuları için ayrı ayrı Toplam Modal Etkin Kütle Oranları (TMEKO) Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8'de her bir mod için hesaplanan taban kesme kuvveti modal etkin kütlelerinin toplamının bina toplam kütlesinin %97'sinin üzerinde olduğu görülmektedir. Sonuç olarak deprem yükü altında farklı modellerde oluşması beklenen plastik mafsalların toplam etkin kütle katılımından etkilenmediği söylenebilir.



Şekil 7. İlk 3 moda ait periyot değerleri

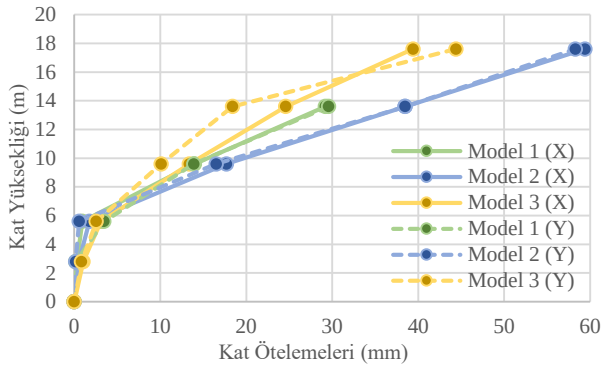
Analiz aşamasında, ilgili deprem doğrultusundaki deprem yükü ve bu doğrultuya dik deprem yükünün %30 katkısı dikkate alınarak her iki doğrultuda toplam 8 adet doğrusal olmayan yük kombinasyonu oluşturulmuştur (±X±0.3Y ve ±Y±0.3X). Analizler neticesinde X ve Y doğrultuları için en elverişsiz hasar düzeyini veren kombinasyonlar dikkate alınmıştır. Her bir modele ait hedef performans noktalarına karşılık gelen kat öteleme değerleri Şekil 9'da, göreli kat ötelemeleri ise Şekil 10'da verilmiştir. Hem kat ve hem de göreli kat ötelemelerinde, X doğrultusunda modellerin maksimum deplasmanlara ulaştığı yük kombinasyonu X+0.3Y, Y doğrultusunda ise –Y+0.3X olarak tespit edilmiştir.



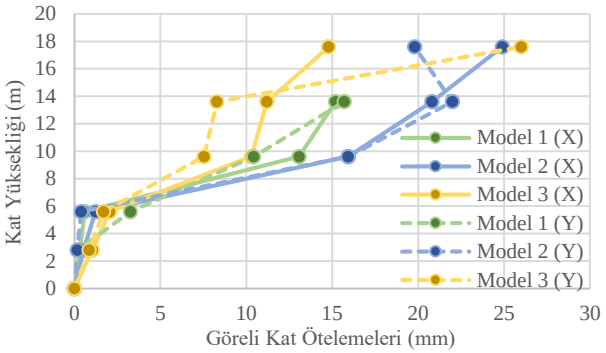
Şekil 8. Modellere ait toplam modal etkin kütle oranları (TMEKO)

Şekil 9 ve Şekil 10'da verilen grafikler incelendiğinde rijit bodrum perdeleriyle çevrelenmiş olan bodrum katlardaki kat ötelemelerinin normal katlara nispeten daha az olduğu görülmüştür. Bunun yanında mevcut yapı yüksekliğindeki kat ve göreli kat ötelemeleri referans alındığında her iki doğrultuda da en fazla kat ve göreli öteleme değerleri Model 2'de, en az kat ve göreli öteleme değerleri ise Model 3'te gözlemlenmiştir. Esas yapı yüksekliği (13.60 m) referans alındığında mevcut yapıda çelik malzemesinin kullanılması kat ötelemelerini X yönünde %16.6, Y yönünde %37.8 kadar azalttığı hesap edilmiştir.

Beklenenin aksine Model 3 ile birlikte 2, 3 ve 4. katlarda kat ve göreli kat ötelemeleri Model 1'e kıyasla giderek azalmaktadır. Model 2 için ise bu davranışın tam tersi görülmektedir. Sonuç olarak çelik taşıyıcı sistemin ara katlarda ötelemeleri sınırlayıcı olduğu ve beklenin aksine ötelemeler anlamında nispi olumlu bir katkısının olduğu söylenebilir. Farklı bir yaklaşımla çelik ilave kat yapımı betonarme ilave kata göre katlar arası yük dağılımını ve yapısal dinamik davranışı farklı etkilediği açıktır. Dinamik analiz sonuçlarının yorumlanması için özellikle, kat yüksekliğinin, toplam kütlenin, rijitliğin ve yapısal sönüm oranının modeller arası farklılaşması gibi dinamik analiz parametrelerinin daha detaylı incelenmesi gereklidir. Farklı parametrelere bağlı dinamik analizler bu çalışma kapsamı dışında ele alınmalıdır. Elde edilen sonuçla Model 3'–te oluşturulan çelik ek katın mevcut yapıda kat ötelemeleri ve plastik mafsal sayıları dikkate alındığında kesit zorlanmalarını sınırladığı ortaya çıkmıştır.



Şekil 9. Modellere ait maksimum kat ötelemeleri



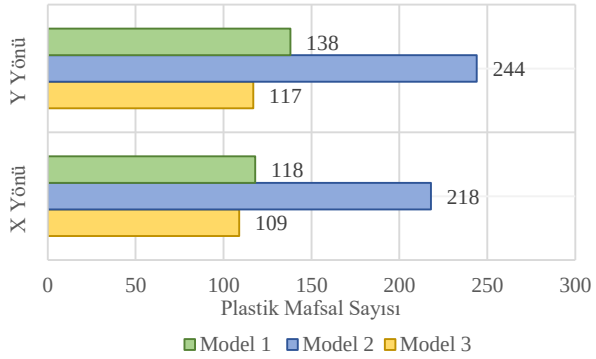
Şekil 10. Modellere ait maksimum göreli kat ötelemeleri

Yapısal elemanlarda tanımlı plastik mafsal oluşumları, 8 farklı yük kombinasyonu altında her bir itme adımında ayrı ayrı incelenmiştir. Baskın yönlerde oluşan maksimum plastik mafsal sayıları Şekil 11'de verilmiştir

Bu bulgular neticesinde maksimum plastik mafsal oluşumu, kat ve göreli kat ötelemeleri sonuçlarını veren yük kombinasyonlarının aynı kombinasyonlar olduğu görülmüştür. En fazla plastik mafsal oluşumu Model 2'de gözlenirken, en az plastik mafsal oluşumu Model 3' te gözlemlenmiştir. Beklendiği üzere, kat ve göreli kat ötelemelerinin artması ile plastik mafsal sayılarının da arttığını göstermiştir. Mevcut yapıda çelik malzemenin kullanılması plastik mafsal sayılarını X yönünde %15.22, Y yönünde %7.63 kadar azalttığı elde edilmiştir.

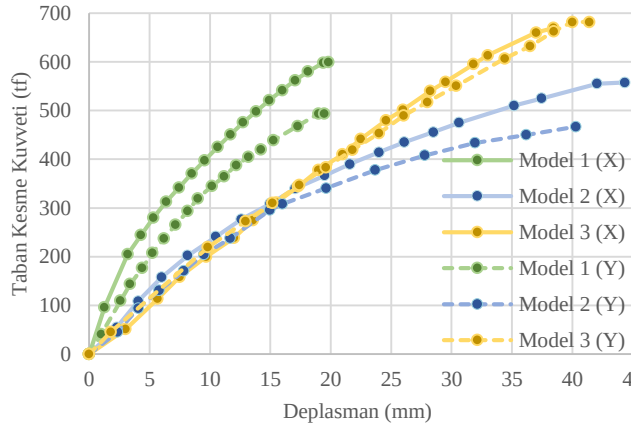
Her bir model ve farklı yön yük kombinasyonları için kapasite, talep ve doğrusal olmayan itme eğrileri elde edilmiş ve performans noktaları karşılaştırılmıştır. Maksimum deplasmanı veren performans noktalarının, kat deplasmanlarının ve plastik mafsal sayılarının en fazla olduğu yük kombinasyonları her iki doğrultuda baskın yük kombinasyonu olarak (X+0.3Y, -Y+0.3X) tespit edilmiştir. Performans noktalarında sonlandırılmış biçimde oluşturulan itme eğrileri Şekil 12'de verilmiştir. Baskın yön kombinasyonları için oluşturulan itme eğrilerinin performans noktaları karşılaştırıldığında her iki doğrultu için tepe deplasmana karşılık gelen maksimum taban kesme kuvveti talebine Model 3'te, minimum taban kesme kuvvet talebine ise Model 2'de rastlanılmıştır. Performans noktalarındaki maksimum tepe yer değiştirmelerinin ve taban kesme kuvveti taleplerinin ise X ve Y yönleri için farklılık gösterdiği Şekil 12'de görülmektedir. Taban kesme kuvveti talepleri X ve Y yönleri için Model 1'de %21.41 ve Model 2'de %19.40 oranında belirgin farklılık gösterirken, Model 3'te bu farkın neredeyse ortadan kalktığı gözlemlenmektedir.

Şekil 9, 10, 11 ve 12'de verilen grafikler karşılaştırıldığında modellerin kat ötelemelerinin ve plastik mafsal sayılarının artmasıyla, performans noktalarındaki taban kesme kuvveti büyüklüklerinin azaldığı görülmektedir. Nitekim yapının sünek davranışı sonucu yer değiştirmeler artmış ve yapı daha fazla taban kesme kuvvetine talep gösterememiştir.

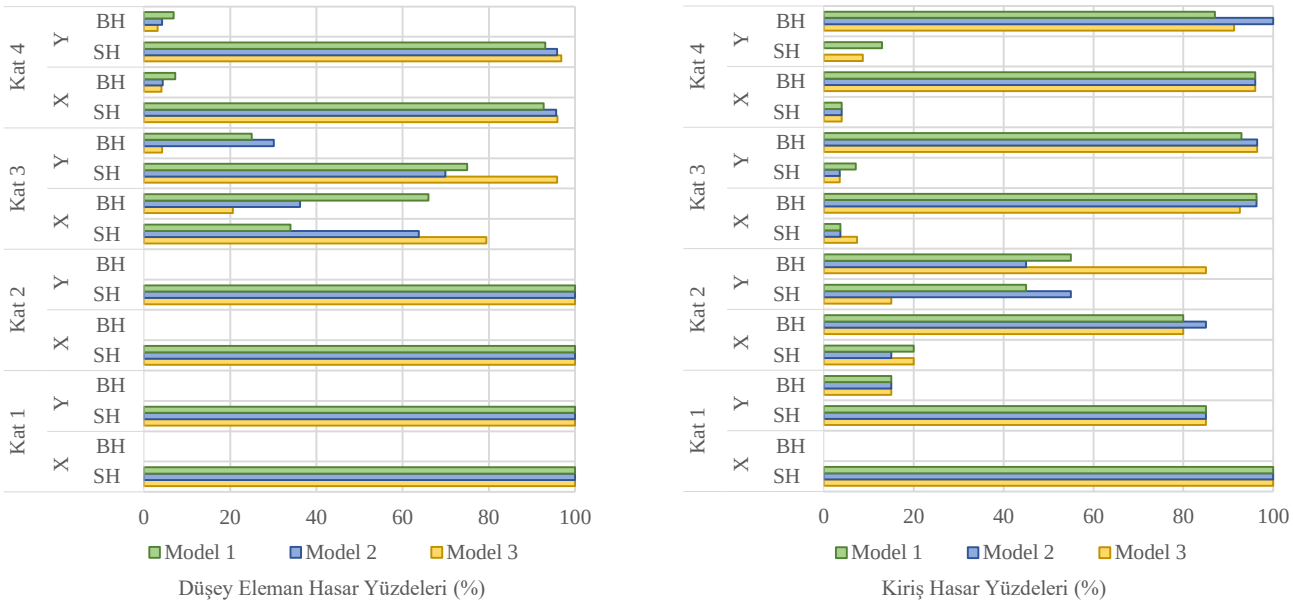


Şekil 11. Modellere ait plastik mafsal sayısı

TBDY 2018 Bölüm 15.8'de mevcut binaların deprem performansının belirlenmesi detaylı olarak ele alınmıştır. İlgili bölümdeki esaslar dikkate alındığında, yapı performans düzeyinin tayininde kiriş elemanlarının hasar durumlarının ve hasar durumuna göre düşey yapı elemanlarının kesme kuvvetine katkılarının belirleyici nitelikte olduğu görülmektedir. Yapılan analizler sonrasında en elverişsiz sonuçların elde edildiği baskın yönlere ait kiriş hasar yüzdeleri her model ve kat için ayrı ayrı sonuçlandırılarak grafikleri oluşturulmuştur. Düşey elemanların (kolon-perde) hasar yüzdeleri ise Şekil 13.a'da, yatay elemanların (kirişler) hasar yüzdeleri ise Şekil 13.b'de verilmiştir.



Şekil 12. Modellere ait kuvvet-deplasman eğrileri



(a) (b)

Şekil 13.a Düşey eleman b. Kiriş eleman hasar yüzdeleri (X: x-ekseni, Y: y-ekseni, SH: Sınırlı Hasar, BH: Belirgin Hasar)

Hasar durumları için en elverişsiz sonuçların elde edildiği yük kombinasyonları X doğrultusunda X+0.3Y, Y doğrultusunda ise –Y+0.3X'tir. Bu kombinasyonlarının maksimum kat ile göreli kat ötelemeleri ve plastik mafsal sayılarını veren yük kombinasyonlarının aynı olduğu görülmektedir. Bununla birlikte üst katlara çıktıkça yapısal elemanlardaki hasar düzeylerinde artış gözlenmiştir. Bu anlamda mevcut yapının ilk iki katının rijit bodrum perdeleri ile çevrili olması ve kat yüksekliğinin üst katlarda bodrum katlara nispeten artmış olması ilgili katta oluşacak öteleme, plastik mafsal oluşumu ve hasar düzeylerini sınırlanmıştır. Bu durum üst katlardaki plastik dönmeleri dolayısıyla hasar düzeyini artırmıştır.

TBDY 2018 Bölüm 15.8'de belirtilen performans değerlendirmesi tanımına göre, modellerin sınırlı hasar performans düzeyini sağlayabilmesi için, herhangi bir katta kirişlerin %20'sinden fazlası belirgin hasar bölgesine geçmemeli ve diğer taşıyıcı elemanların tümü sınırlı hasar bölgesinde olmalıdır. Model 1'de herhangi bir katta belirgin hasar bölgesine geçen maksimum kiriş yüzdesi %96.3, Model 2'de %100 ve Model 3'te ise %96.4 olarak tespit edilmiştir. Kiriş belirgin hasar yüzdelerinin %20 sınırını aşmasından dolayı modellerin hiçbiri sınırlı hasar performans düzeyini sağlamamıştır. Bununla birlikte oluşturulan modellerdeki yapısal elemanların yalnızca sınırlı ve belirgin hasar bölgesinde davranış gösterdiği tespit edilmiş olup ileri hasar ve göçme bölgesine geçen herhangi bir yapı elemanı bulunmamaktadır.

Dolayısıyla ele alınan yapısal modellerin ilgili bölümde belirtilen kontrollü hasar düzeyi sınırlarını gevrek davranış gösteren yapı elemanlarının güçlendirilmesi koşulu ile sağladıkları görülmüştür. İlave katlı modellerde aynı kiriş elemanının gevrek davranış gösterdiği ve bu kirişin sağ ucunda süneklik koşullarının sağlanmadığı görülmüştür. Kirişin düşey hareketli ve zati yüklerin en fazla olduğu katta bulunduğu ve birleşim noktasına yakın bölgede tali bir kirişin bu gevrek kirişe saplandığı tespit edilmiştir.

Buradan, tekil yük yoğunlaşması neticesinde bu kirişin performans noktasındaki kesme kuvveti değerini artırmış olduğu ve yönetmelikte belirtilen süneklik koşullarını sağlayamadığı düşünülebilir. Sonuç olarak ilave kat uygulaması öncesinde bu kirişin zorlanan kısmının yönetmeliğe uygun olarak güçlendirilmesi gerekmektedir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada mevcut betonarme bir yapının deprem etkileri altında performansı incelenmiş ve yapı işletmecisinin ilave kat talebi üzerine mevcut yapı için çelik ve betonarme olmak üzere 2 farklı ek kat tasarımı yapılmıştır. Oluşturulan 3 model için doğrusal olmayan artımsal itme analizi yapılarak deprem performansları karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Artımsal itme analizleri öncesi modellerin mevcut yükler altında yapılan statik ve modal analizleri sonucunda elde edilen grafikler incelendiğinde betonarme ek katlı modelin yapı kütlesinin diğer modellere göre daha fazla olduğu diğer taraftan çelik yapı sisteminin betonarme sisteme göre mevcut yapıya hafiflik özelliği ile katkı sağladığı görülebilmektedir. İlk 3 moda ait periyot değerleri ise beklenildiği gibi yapı yüksekliğinin artması ile artış göstermiştir. Bununla birlikte 3 model içinde en yüksek periyot değerlerine betonarme ek katlı model ulaşmıştır.

Kritik yük kombinasyonları için elde edilen kat ötelemeleri karşılaştırıldığında bodrum katlarda oluşan deplasman değerlerinin normal katlara nispeten çok daha az olduğu görülmektedir. Mevcut yapının bodrum katlarının rijit perdelerle çevrili olması ve bu katlarda oluşacak kat deplasmanlarını sınırlamıştır. Bununla birlikte betonarme ek katlı modelin diğer modellere göre maksimum kat deplasman değerlerine ulaştığı gözlenmiştir.

Baskın yük kombinasyonları için elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinde her bir itme adımı sonucunda plastik mafsalların oluşmasıyla eğrinin eğiminin yani deplasmana karşılık gelen taban kesme kuvvetlerinin göreli olarak azaldığı belirlenmiştir. Her bir itme adımında plastik mafsal sayılarının artması, sistemin deplasmanlara karşı koyma direncinin azalmasına neden olmuştur. Performans noktalarında elde edilen plastik mafsal oluşumları ile taban kesme kuvvetleri sonuçları değerlendirildiğinde en fazla plastik oluşumunun betonarme ilave katlı modelde en azının ise çelik ilave katlı modelde olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte performans noktasına en fazla taban kesme kuvveti ile çelik ilave katlı modelin, en az ise betonarme ilave katlı modelin ulaştığı görülmüştür. Modellerin performans noktalarındaki plastik mafsal sayıları ile tepe deplasmana karşılık gelen taban kesme kuvveti taleplerinin arasında ters bir ilişki olduğu görülmektedir. Betonarme ve çelik ilave katlı modellerin performans noktasındaki tepe deplasman değerlerinin, mevcut yapı modeline kıyasla artış gösterdiği görülmektedir. Sonuçta yapı yüksekliğinin artması ile modellerin performans noktalarındaki deplasman değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir.

Yapılan artımsal itme analizleri neticesinde TBDY Bölüm 15.8'de verilen esaslara göre tüm modellerin gevrek hasar gören yapı elemanlarının güçlendirilmesi koşulu ile Kontrollü Hasar Performans Düzeyi'nde olduğu görülmüştür. Eleman bazında kesit birim şekil değiştirme ve plastik dönme sonuçları irdelendiğinde bodrum katlarda kesme kuvveti taşıyan düşey elemanların tamamının sınırlı hasar bölgesinde kaldığı kiriş elemanlarının hasar seviyelerinin ise üst katlara çıktıkça arttığı gözlemlenmiştir. Modellerde İleri Hasar ve Göçme Bölgesi'ne geçen herhangi bir yapı elemanı bulunmamıştır. En fazla Belirgin Hasar yüzdesine ise betonarme ek katlı modelde rastlanılmıştır.

2007 Deprem Yönetmeliği esaslarına göre tasarlanmış ve inşa edilmiş olan 4 katlı (ilave kat ile birlikte 5 katlı) mevcut yapıda taşıyıcı sistem düzeni olarak her yönde deprem kuvvetini karşılayacak perdelerin bulunması, düşey taşıyıcı elemanları her yönden kirişlerle birbirini bağlayan çerçeve mekanizmasının oluşturulması, yapının kütle ve rijitlik merkezinin yakın olması, yapıda önemli düzensizliklerinin bulunmaması, yapısal elemanları zorlayacak kapalı çıkma vb. durumlarının olmaması, yük aktarımı ve deprem performansı açısından iyi sonuçlar elde edilmesine katkı sağlamıştır. Bu sonuç, projesine uygun ve deprem yönetmeliğine bağlı olarak inşa edilmiş yapılarda olası deprem hasar oluşumlarını uygulamalarda yapılmış hatalarda aranması gerektiği sonucunu ortaya çıkarmaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %14

Kaynaklar

[1] E. Atabey, Türkiye'nin Depremselliği (Sismisitesi), "Deprem". MTA, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye, sayfa 27-32, 2000.

[2] H. Can, B. Özmen, Türkiye'nin Deprem Gerçeği Paneli. Gazi Üniversitesi Deprem Araştırma Ve Uygulama Merkezi, Ankara, Türkiye, 2010.

[3] AFAD, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Aletsel Dönem Deprem Kataloğu, https://deprem.afad.gov.tr/event-instrumental, Erişildi 17.03.2023.

[4] TBDY 2018, Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı için Esaslar, T.C. Resmi Gazete, Sayı: 30364, Ankara, 18 Mart 2018.

[5] ATC-40, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Building, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.

[6] FEMA-273, NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. , 1997.

[7] FEMA-274, NEHRP Commentary On The Guıdelınes For The Seısmıc Rehabılıtatıon Of Buıldıngs, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. ,1997.

[8] FEMA 356, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, ASCE for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. , 2000.

[9] FEMA 440, Improvements of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C, 2005.

[10] ASCE 41-06, Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia,2006.

[11] Eurocode 8, Design of Structures for Earthquake Resistance Design of structures for earthquake resistance, European Committee for Standardization; Brussels, 2003.

[12] A. K. Chopra, Structural Dynamics in Building Evaluation Guidelines,Dynamic of Structures and Earthquake Engineering. 4th ed,USA:Pearson Education , pp. 880-881, 2013.

[13] H. Sucuoğlu, 2007 deprem yönetmeliği performans esaslı hesap yöntemlerinin karşılıklı değerlendirilmesi. Türkiye Mühendislik Haberleri, 4 (5), 24-36, 2006.

[14] A. Kadid, A. Boumrkik, Pushover Analysis of Reinforced Concrete Frame Structures. Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing), Technical Note, 9 (1), 75-83, 2008.

[15] A. K. Chopra, R. K. Goel, Modal Pushover Analysis Procedure to Estimate Seismic Demands for Buildings: Theory and Preliminary Evaluation. College of Engineering University of California Berkeley, Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER, California, Report CMS-9812531, January, 2001.

[16] H. Bilgin, Seismic performance evaluation of an existing school building in Turkey. Challenge Journal Of Structural Mechanıcs, 1 (4), 161–167, 2015. https://doi.org/10.20528/cjsmec.2015.07.020

[17] H. O. Kaya, E. Alakavuk, Mevcut bir kamu binasının deprem güvenliğinin incelenmesi. Türk Deprem Araştırma Dergisi, 4 (1), 61-72, 2022. https://doi.org/10.46464/tdad.995988

[18] A Turkay, K. Guler, Bir okul binasının tasarımı ve deprem performansının değerlendirilmesi. International Journal of Innovative Engineering Applications, 1 (2), 27-37, 2017.
[19] T. Kap, E. Özgan, M. M. Uzunoğlu, Betonarme bir okul binasının 2018 deprem yönetmeliğine göre incelenmesi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7 (3), 1140-1150, 2019. https://doi.org/10.29130/dubited.506373
[20] M.F. Altan, S. Cansız, O. Kaya, Ç. Turna, Türkiye bina deprem yönetmeliğine göre mevcut betonarme binanın performansının ve zemin etkileşiminin değerlendirilmesi. BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi, 7(2), 1004-1014, 2020. https://doi.org/10.35193/bseufbd.727437
[21] Ö. Çavdar, M. Ceylan, Mevcut çelik bir spor salonunun performans analizi. Uluslararası Katılımlı 7. Çelik Yapılar Sempozyumu, Türkiye, 2017.
[22] R. Jamal, S. B. Yüksel, Betonarme karma taşıyıcı sistemlerin TBDY 2018 ve ASCE 41- 17'ye göre doğrusal olmayan hesap yöntemleri ile performans analizi ve elde edilen sonuçların karşılaştırması. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 10 (2), 567-581, 2022. https://doi.org/10.29130/dubited.927086
[23] İ. Dalyan, B. Şahin, Mevcut betonarme bir binanın 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerine göre deprem yükleri altındaki taşıyıcı sistem perfomansının değerlendirilmesi. Türk Deprem Araştırma Dergisi, 1 (2), 134-147, 2019. https://doi.org/10.46464/tdad.631998
[24] Ö. Çavdar, Seismic performance of a high-rise building by using linear and nonlinear methods. Natural Hazards, 112 (2), 1359–1378, 2022. https://doi.org/10.1007/s11069-022-05231-z
[25] Y. Alashker, S. Nazar, M. A. Ismaiel, Effects of building configuration on seismic performance of rc buildings by pushover analysis. Open Journal of Civil Engineering, 5 (02), 203-213, 2015. http://dx.doi.org/10.4236/ojce.2015.52020
[26] X. K. Zou, C. M. Chan, Optimal seismic performance-based design of reinforced concrete buildings using nonlinear pushover analysis. Engineering Structures, 27 (8), 1289–1302, 2005. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.04.001
[27] M. N. Aydınoğlu, G. Önem, Artımsal spektrum analizi (ARSA) ile köprülerin nonlineer performanslarının değerlendirilmesi. Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, sayfa 153-162, İstanbul, Türkiye, 2007.
[28] S. Bekiroğlu, B. Sevim, A. Şahin, Y. Ayvaz, Betonarme yapı üzerine çelik taşıyıcı sisteme sahip çok amaçlı salon tasarımı. 5.Çelik Yapılar Sempozyumu, sayfa 297-305, İstanbul, Türkiye, 2013.
[29] M. İnel, H. B. Özmen, H. Bilgin, Türkiye'de yaşanan deprem hasarları ve yapı stoğunun değerlendirilmesi. Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, sayfa 249-260, İstanbul, Türkiye, 2007.
[30] H. Aksel, Ö. Eren, Discussion on the advantages of steel structures in the context of sustainable construction. International Journal of Contemporary Architecture " The New ARCH" , 2 (3), 46-53, 2015. http://doi.org/10.14621/tna.20150405
[31] İdeCAD, Bilgisayar Programı, V10.94, ideYAPI, Bursa, Türkiye, 1988.
[32] AFAD, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Türkiye Deprem Tehlike Haritası İnteraktif Web Uygulaması, https://tdth.afad.gov.tr/, Erişildi 17.03.2023.
[33] TÇY, Çelik Yapıların Tasarım Hesap ve Yapımına Dair Esaslar, T.C. Resmi Gazete, Sayı: 30333, 15 Şubat, Ankara, 2018.
[34] TS EN 1991-1-3,Yapılar Üzerindeki Etkiler- Bölüm 1-3: Genel Etkiler-Kar Yükleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara,2007.
[35] TS 498,Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1997.
[36] M. N. Aydınoğlu, Yapıların deprem performanslarının değerlendirilmesi için artımsal spektrum analizi (ARSA) yöntemi. 5. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, sayfa 141-142, İstanbul, Türkiye,2003.
[37] A. Korkmaz, M. Düzgün, Doğrusal olmayan yapısal analiz yöntemlerinin değerlendirilmesi. İTÜ Dergisi Seri D:Mühendislik, 6 (3), 11-23, 2007.
[38] E. B. Çağatay, Yeni betonarme yapıların tasarımında ve mevcut betonarme yapıların değerlendirilmesinde kullanılan etkin kesit rijitliklerinin irdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye, 2021.
[39] Ö. F. Taş, E. Sayın, M. E. Öncü, Yeni betonarme binalar için etkin kesit rijitlikleri ve statik itme analizleri. Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi, 34 (2), 505-516, 2022. https://doi.org/10.35234/fumbd.1074221

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 370-375

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliğinde menevişleme ve kriyojenik işlemin mikroyapı ve tribolojik özelliklere etkisi

Effect of tempering and cryogenic treatment on microstructure and tribological properties in X40CrMoV5-1 hot work tool steel

Fulya Kahrıman[1,*]

[1] *Kocaeli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 41001, Kocaeli, Türkiye*

Öz

Bu çalışmada kalıp malzemesi olarak kullanılan bir X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliğinde öncelikli olarak farklı ısıl işlemlerin mikroyapı ve sertlik üzerindeki etkisi incelenmiştir. Isıl işlem prosesleri, östenitleme, kriyojenik işlem ve üç farklı sıcaklıkta iki aşamalı menevişleme olarak uygulanmıştır. Isıl işlemler sonrasında numunelerin mikroyapıları ışık mikroskobu ile incelenmiş ve RockwellC sertlikleri ölçülmüştür. Daha sonra meneviş sıcaklığı ve kriyojenik işlem durumuna göre seçilen belirli numunelere gaz nitrasyon yöntemi ile nitrürleme yüzey işlemi uygulanarak tribolojik özellikler araştırılmıştır. Nitrürlenmiş numunelerde kriyojenik işlemin tribolojik özelliklere etkisi kuru sürtünme aşınma testi uygulanarak spesifik aşınma oranı ve mikroskobik incelemeler ile araştırılmıştır. Sonuçlar, nitrürlenmiş numunelerden derin kriyojenik işlemin uygulandığı numunede tribolojik özelliklerin spesifik aşınma oranı ve aşınma mekanizması açısından daha iyi özellikler sergilediğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Sıcak iş takım çeliği, Kriyojenik işlem, Nitrasyon, Triboloji

Abstract

In this study, the effect of different heat treatments on the microstructure and hardness of an X40CrMoV5-1 hot work tool steel used as a mold material was investigated. Heat treatment processes were applied as austenitization, cryogenic treatment and two-stage tempering at three different temperatures. After heat treatments, the microstructures of the samples were examined with a light microscope and RockwellC hardness was measured. Then, tribological properties were investigated by applying nitriding surface treatment with gas nitriding method to certain samples selected according to tempering temperature and cryogenic treatment condition. The effect of cryogenic treatment on the tribological properties of nitrided samples was investigated with the specific wear rate and microscopic examinations as a result of the dry friction wear test. The results showed that the tribological properties of the nitrided samples in terms of specific wear rate and wear mechanism were better in the deep cryogenic treatment applied sample.

Keywords: Hot work tool steel, Cryogenic treatment, Nitriding, Tribology

1 Giriş

Sıcak iş takım çelikleri, basınçlı döküm, dövme ve enjeksiyon kalıplama uygulamaları için kalıp malzemesi olarak kullanılmaktadırlar [1, 2]. En yaygın kullanılan kalitelerinden birisi, tipik olarak Cr, Mo ve V içeriğinden dolayı menevişleme sırasında ikincil sertleşmeye uygun olan X40CrMoV5-1 takım çeliğidir [1, 2].

Bununla birlikte, kalıplar sıcak şekillendirme prosesleri sırasında sıcak metal ile doğrudan etkileşime girdiğinde yüksek mekanik gerilmelere, termal yorulmaya ve aşınmaya maruz kalmaktadır. Bu etkiler kalıpların sık sık bakımını veya değiştirilmesini gerektirdiğinden sınırlı kalıp ömrüne neden olmaktadır. Bu nedenle servis sıcaklıklarında sıcak iş takım çelikleri mekanik özelliklerin iyi bir kombinasyonuna sahip olmalıdır [3].

Takım çeliği bileşenlerinin metalurjik, mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmek için çeşitli termal, mekanik ve termo-mekanik yöntemler bulunmaktadır. Dolayısıyla sıcak iş takım çeliklerinin özelliklerini iyileştirmek için uygulanabilecek yöntemlerden birisi de ısıl işlemlerdir [4]. Sıcak iş takım çeliklerinin ısıl işlemi, kütlesel özelliklerinin önemli ölçüde bağlı olduğu mikroyapısal bileşenlerin miktarını, boyutunu ve dağılımını değiştirmeye yardımcı olur. Isıl işlem sıcaklığı, tutma süresi ve soğutma hızı vb. faktörler mikroyapısal mekanizmaları etkileyen önemli proses parametreleridir.

Takım çeliklerinde sertleştirmeyi sağlamak için uygulanan östenitleme ve su verme işleminden sonra mikroyapıda martenzit ve bir miktar kalıntı östenit elde edilmektedir ve bu sırada oluşan iç gerilmelerden dolayı malzeme kırılgan hale gelmektedir. Bu nedenle iç gerilmeleri ortadan kaldırmak ve aynı zamanda sertlik ve tokluğun kombinasyonunu sağlamak için su verme işlemi sonrasında menevişleme ısıl işlemi uygulanmaktadır [5]. X40CrMoV5-1 takım çeliğinde beklenen mekanik özelliklere göre farklı sıcaklıklarda menevişleme ısıl işlemi gerçekleştirilebilir [4]. Menevişleme sırasında, X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliğinin kimyasal bileşiminde bulunan Cr ve Mo elementlerinin martenzitik matris içinde M_2C ve M_7C_3 formunda kararlı ikincil karbürleri

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: fulya.kahriman@kocaeli.edu.tr (F. Kahrıman)
Geliş / Recieved: 26.07.2023 Kabul / Accepted: 20.12.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngmuh.1333357

oluşturmaları dislokasyon hareketini engelleyerek çeliğin sertliğinde artışa neden olur ve yüksek sıcaklık mekanik özelliklerini iyileştirir [6]. Menevişleme aşamasında bu ikincil karbürlerin oluşumu, takım çeliklerinin kimyasal bileşimi, alaşım elementlerinin difüzyon özellikleri ve öngörülen ısıl işlemle güçlü bir şekilde ilişkilidir. Örneğin, Cr elementinin varlığı genellikle dönüşümü engeller, bu nedenle menevişleme daha yüksek bir sıcaklıkta uygulanmalıdır [7-9]. Bu çalışmada X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliğinin bileşimine bağlı olarak üç farklı menevişleme sıcaklığının etkisi incelenmiştir.

Geleneksel yöntem olarak uygulanan östenitleme, su verme ve menevişleme ısıl işlemleri sonrasında yapıda mevcut olan kalıntı östenitin, malzemenin sertliğini, mukavemetini, aşınma ve çentik darbe direncini düşürmesi gibi olumsuz etkileri bulunmaktadır. Kalıntı östenitin giderilmesi amacıyla her ne kadar yüksek sıcaklıkta menevişleme işlemi yapılsa da bu işlem kriyojenik işlem kadar etkili değildir. Kriyojenik işlem süreci, geleneksel olarak sertleştirilmiş çeliğin sıfırın altında seçilen bir sıcaklığa kontrollü olarak soğutulmasını ve ardından belirli bir süre bekletildikten sonra sonraki menevişleme işlemi için numunelerin ortam sıcaklığına kontrollü bir şekilde ısıtılmasını içerir [10].

Kriyojenik işlem sırasında kalıntı östenitin martenzite dönüşümünde martenzit sertliğinin elde edilmesinin yanı sıra hacimsel artış nedeniyle martenzit kafesinde deformasyon meydana gelir. Deformasyona bağlı olarak yapıda dislokasyonlar oluşur. Bu dislokasyonlar, kriyojenik işlem sonrasında uygulanan menevişleme işleminde oluşacak ince ikincil karbür çökeltileri için çekirdeklenme yöreleri görevi görürler [11-14].

Sıcak iş takım çeliklerinin aşınma direncinin geliştirilmesinde ısıl işlemler sonucu oluşan martenzit, ikincil karbürler vb. mikroyapısal etkinin yanında yüzey sertliğinin iyileştirmesi de önemlidir [7]. Nitrasyon takım çeliklerine uygulanan en önemli termo-kimyasal yüzey sertleştirme işlemlerinden biridir. Nitrasyon ile sıcak iş takım çeliği yüzeyinde en dışta nitrürlerden oluşan bir tabaka ve bu tabakanın altından altlık malzemeye doğru difüzyon bölgesi oluşur. Difüzyon bölgesinde altlık malzemeye doğru azot miktarı ve sertlik giderek azalır. Demir nitrürlerin dışında M_xN_y olarak formüle edilen alaşım elementlerinin nitrürleri de difüzyon bölgesinde çökelebilir (M: Al, Cr, V, Mo, vb. gibi nitrür oluşturan elementleri temsil eder) [15]. X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliğinde alaşım elementlerinin CrN gibi çok sert ve termal olarak kararlı nitrürler oluşturması ile aşınma, erozyon ve termal yorulma özellikleri daha da artırılabilir [16, 17].

2 Materyal ve metot

Tablo 1'de çalışmada kullanılan ve endüstriyel bir kalıptan alınan sıcak iş takım çeliğinin optik emisyon spektrometre analiz sonucu verilmiştir. Değerler beş ölçümün ortalama sonucunu göstermektedir.

Sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiş kalıptan altı adet numune alınarak, her bir numune için Tablo 2'de verilen ısıl işlem sıralaması uygulanmıştır. Numunelere uygulanan ısıl işlemler için proses parametreleri Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 1. Kalıp malzemesinin optik emisyon spektrometre analiz sonucu (ağırlık %)

DIN	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
X40CrMoV5-1	0,39	1,00	0,40	5,20	1,40	0,90

Tablo 2. Numunelere uygulanan ısıl işlem sıralaması

Numune	Östenitleme	Sıcak banyoda soğutma	Kriyojenik İşlem	Menevişleme-1	Menevişleme-2	Nitrasyon
1. Numune	+	+		+	+ (500ºC)	
2. Numune	+	+	+	+	+ (500ºC)	
3. Numune	+	+		+	+ (550ºC)	
4. Numune	+	+	+	+	+ (550ºC)	
5. Numune	+	+		+	+ (610ºC)	+
6. Numune	+	+	+	+	+ (610ºC)	+

Tablo 3. Numunelere uygulanan ısıl işlem parametreleri

Isıl işlem	Sıcaklık (ºC)	Süre (dk.)
Ön ısıtma-1	450	40
Ön ısıtma-2	700	40
Ön ısıtma-3	850	40
Östenitleme	1030	35
Su verme (sıcak banyo)	492	20
Havada pervane soğutma	25	30
Kriyojenik işlem	-196	120
Menevişleme-1	500, 550, 610	120
Menevişleme-2	500, 550, 610	120
Nitrasyon	500-550	720

Numunelerin tümüne östenitleme aşamasında bekletme süresini azaltmak ve ısıl gerilmelerin oluşmasını en aza indirmek için üç kademeli ön ısıtma işlemi uygulanmıştır. Östenitleme işlemi 1030 ºC'de 35 dk. yapıldıktan sonra, numuneler önce 492 ºC'de sıcak banyoda 20 dk. bekletilmiş ve ardından pervaneler önüne alınarak hava ortamında soğutulmuştur. Soğutma işleminden sonra 2., 4. ve 6. numunelere -196 ºC'de 120 dk. tutma ve hava ortamında oda sıcaklığında bekletme ile kriyojenik işlem uygulanmıştır. Ardından numuneler 500, 550 ve 610 ºC'de 2 saat olmak üzere iki kez menevişleme işlemine tabi tutulmuştur. Son olarak 5. ve 6. numunelerin yüzeyleri 550 ºC'de 720 dk. gaz nitrasyon yöntemi ile nitrürlenmiştir. Daha sonra, numunelerin yüzeyleri metalografik olarak hazırlanarak nital çözeltisi ile kimyasal dağlama işlemine tabi tutulmuş ve mikroyapılar ışık mikroskobu (IM) ile incelenmiştir.

Numuneler nitrasyon işlemi öncesinde sertlik testine tabi tutulmuştur. Metalografik olarak hazırlanmış numunelerin sertlikleri, RockwellC (HRc) ölçüm yöntemi kullanılarak ve beş ölçüm sonucunun ortalaması alınarak belirlenmiştir.

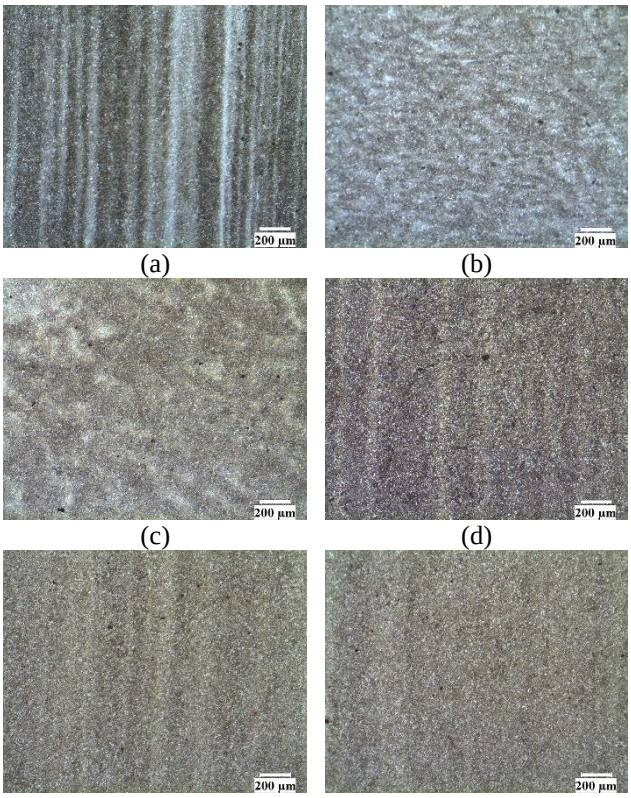
Nitrasyon işlemi menevişleme sıcaklığından en az 50 ºC daha düşük sıcaklıkta uygulanması gerektiğinden 5. ve 6. Numunelere 500-550 ºC'de 720 dk. gaz nitrürleme yöntemi ile nitrasyon yüzey işlemi uygulanmıştır.

Nitrürlenen numunelere kuru sürtünme koşullarında ball-on disk tribometre cihazı kullanılarak aşınma testi uygulanmıştır. Testlerde karşıt yüzey olarak sertleştirilmiş 1.3505 çelik bilye kullanılmış olup, 10 N yük 500 m kayma mesafesi ve 100 rpm hız test parametreleri kullanılmıştır. Tribolojik testler sonrasında mesafeye bağlı olarak spesifik aşınma oranları hesaplanmıştır. Nitrürlenmiş numunelerde

derin kriyojenik işlemin tribolojik özellikler üzerindeki etkisini görmek ve aşınma mekanizmasını incelemek için numunelerin yüzeyleri IM ve tarama elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

Menevişleme ve kriyojenik ısıl işlemlerden sonra metalografik olarak hazırlanmış numunelerin IM görüntüleri Şekil 1'de verilmiştir. Kalıp malzemesi olarak kullanılan X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliğinin standart mikroyapısı ferritik matriks içerisinde homojen dağılmış küçük küresel karbürler ve yer yer primer karbürlerden oluşmaktadır. Primer karbür ağı ana matris içerisinde heterojen bölgeler oluşturarak mikro segregasyona neden olmakta ve malzemenin mekanik özelliklerinde bölgesel farklılıklar göstermesine sebebiyet vermektedir.



Şekil 1. Numunelerin IM görüntüleri; (a) 1. numune, (b) 2. numune, (c) 3. numune, (d) 4. numune, (e) 5. numune, (f) 6. numune

Şekil 1a'da 500 ºC'de menevişlenmiş 1. numunenin mikroyapısı martenzitik yapıya sahiptir ve yapıda belirgin şekilde bantsı mikro segregasyon görülmektedir. IM'de yüksek büyütmedeki mikroyapı incelemelerinde özellikle açık renk segregasyon bantı bölgelerinde primer karbürler görülmüştür. Şekil 1b'de kriyojenik işlemin uygulandığı 2. numunenin mikroyapısında mikro segregasyonun azaldığı görülmektedir ve mikroyapının martenzitten oluştuğu bulunmuştur. Şekil 1c'de 3. numunenin IM görüntüsü verilmiştir. Bu numuneye 550 ºC'de uygulanan menevişleme işlemi ile X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliğinin yapısında var olan bantsı mikro segregasyon yapısı kısmen giderilmiş olmasına rağmen halen homojen olmayan bir yapı söz konusudur. Şekil 1d'de kriyojenik işlem uygulandıktan sonra 550 ºC'de menevişlenen 4. numunenin IM görüntüsünde yapıdaki mikro segregasyonun diğer numunelerdekine oranla daha azaldığı ve yapının daha homojen olduğu görülmüştür. Mikroyapı temperlenmiş martenzitten oluşmaktadır. Şekil 1e'de verilen ve 610 ºC'de menevişlenen 5. numunenin mikroyapısında yüksek menevişleme sıcaklığına bağlı olarak mikro segregasyon yapısının önemli ölçüde giderildiği görülmüştür. Şekil 1f'de kriyojenik işlem uygulanan ve 610 ºC'de menevişlenen 6. numunenin mikroyapısı diğer numunelere kıyasla segregasyon açısından en homojen durumdadır.

Farklı ısıl işlem prosedürleri uygulanan sıcak iş takım çeliği numunelerinin sertlik değerleri Tablo 4'de verilmiştir. X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliği üreticilerinin malzeme bilgisini içeren ürün kataloğu standartları ile karşılaştırıldığında, ısıl işlem sonucu elde edilen sertlik değerlerinin 500 ºC civarında bir pik sertliğe ulaştıktan sonra artan menevişleme sıcaklığı ile azaldığı görülmüştür. Sertlik sonuçlarından kriyojenik işlemin uygulandığı numunelerde menevişleme sonucu meydana gelen sertlik düşüşünün bir miktar daha az olduğu görülmektedir. Tüm prosedürler içinde en yüksek sertlik değerine, kriyojenik işlem yapılmış ve sonrasında 500ºC'de menevişlenmiş yapıda ulaşılmıştır.

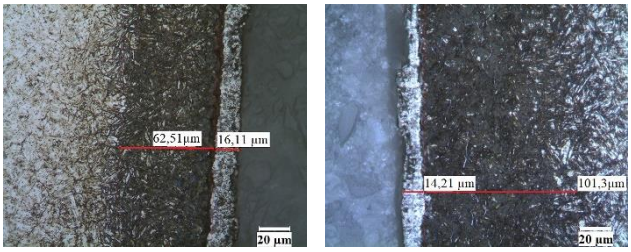
Tablo 4. Deneysel çalışmada kullanılan numunelerin uygulanan ısıl işlemlere bağlı olarak elde edilen sertlik değerleri

	HRC					
	500 ºC		550 ºC		610 ºC	
	1. Menevişleme	2. Menevişleme	1. Menevişleme	2. Menevişleme	1. Menevişleme	2. Menevişleme
1. Numune	55	50				
2. Numune	55	52				
3. Numune			55	43		
4. Numune			55	46		
5. Numune					47	41
6. Numune					49	43

Şekil 2'de nitrasyon işlemi uygulanan numunelerin IM görüntüleri verilmiştir. Nitrasyon işlemi sonrası yüzeyden merkeze doğru beyaz tabaka, difüzyon bölgesi, geçiş bölgesi ve altlık malzeme şeklinde yapı sıralaması meydana gelmektedir. Nitrasyon işleminde en dış tabaka olarak oluşan beyaz tabakada iki farklı kristal kafes yapısına sahip olan ε-$Fe_{2\text{-}3}N$ (hegzagonal sıkı paket, hsp) ve γ'-Fe_4N (yüzey merkezli, ymk) demir nitrür fazlarının oluşması gerilim alanlarının oluşmasına ve herhangi bir yüklenme durumunda mikro çatlakların oluşumuna ve ilerlemesine neden olabilmektedir [18]. Şekil 2'de en üstte oluşan beyaz tabakanın ve geçiş bölgesinin derinlik ölçümleri verilmiştir. Derin kriyojenik işlemin uygulandığı 6. numunede beyaz tabaka kalınlığının daha ince olduğu bulunmuştur.

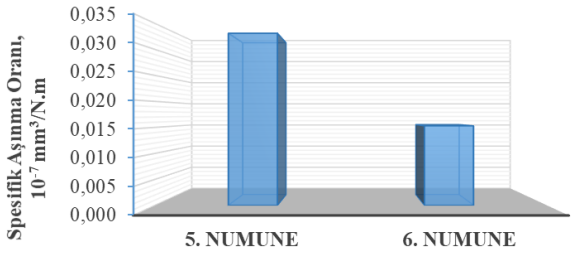
Tribolojik testler sonrasında hesaplanan spesifik aşınma oranı Şekil 3'de verilmiştir. Kriyoyojenik işlem uygulanmayan 5. numunede spesifik aşınma oranı daha fazla

iken kriyojenik işlemin uygulandığı 6. numunede spesifik aşınma oranının daha az olduğu bulunmuştur.



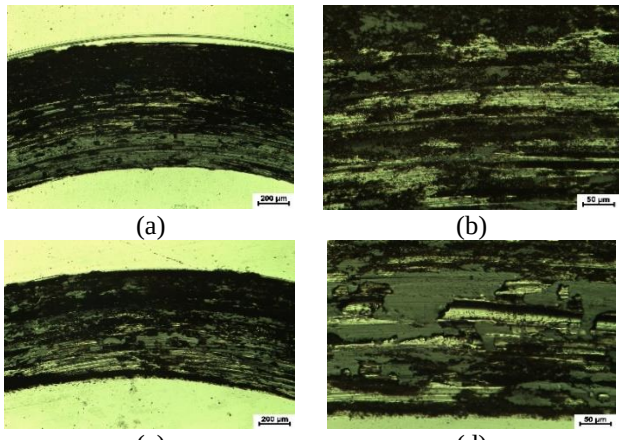
(a) (b)

Şekil 2. Nitrasyon uygulanan numunelerin IM görüntüleri; (a) 5. numune, (b) 6. numune



Şekil 3. Spesifik aşınma oranı diyagramı

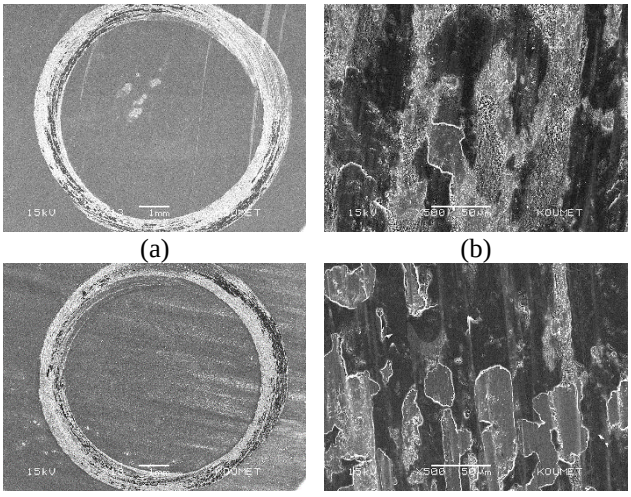
Kuru sürtünme aşınma testine tabi tutulan numunelerin Şekil 4'de IM ve Şekil 5'de SEM görüntüleri verilmiştir. IM görüntülerinden 5. numunede baskın olarak adhezif aşınma mekanizmasının ve 6. numunede ise abrasif aşınma mekanizmasının baskın olarak meydana geldiği söylenebilmektedir. IM ve SEM görüntülerinden, yüzeyde oluşan aşınma izinin 5. numunede daha geniş olduğu görülmüştür. Ayrıca Şekil 4 ve 5'de b ve d görüntülerine bakıldığında, aşınma testi sırasında kayma mesafesinin artması ile birlikte adhezif aşınma sonucu oluşan kopan partiküllerin yüzeye kaynaklanarak adhezif tabakalar oluşturduğu ve bu tabakaların da zamanla yük etkisi ile kırıldığı görülmüştür. 5. numunede adhezif aşınma sonucu kopan partiküllerin arayüzeyde daha fazla oranda biriktiği ve oksitlendiği görülmektedir.



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 4. Aşınmış yüzeylerin IM görüntüleri, (a) ve (b) 5. numune, (c) ve (d) 6. numune



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 5. Aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri, (a) ve (b) 5. numune, (c) ve (d) 6. numune

4 Sonuçlar

Menevişleme sırasında, östenitleme ile yapıda çözünmüş karbür oluşturucu elementlerin çökelmesi ile ince martenzitik matriks içinde ikincil karbürler oluşarak sertliği arttırırlar. 450-500 °C sıcaklık aralığında X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliği ikincil sertleşme ile en yüksek sertlik değerine ulaşmaktadır. Deneysel çalışmada görüldüğü gibi menevişleme sıcaklığının bu aralığın üstüne çıkması ile mevcut ikincil karbürlerin birleşerek büyümesi nedeniyle sertlikte düşüş görülmüştür. Ayrıca menevişleme sıcaklığının artması ile birlikte, örneğin 550-600 °C sıcaklık aralığında kararsız bir faz olan martenzit fazı ayrışmaya başlamaktadır. Menevişleme sıcaklığının 600 °C üzerine çıkması ile ferritik matriks içinde karbür yapısı oluşmaktadır. Ayrıca, kriyojenik işlem uygulanmamış numunelerin mikroyapılarında belirgin mikro segragasyon bantları ve heterojen yapı görülmüştür.

Deneysel çalışmada kullanılan numunelerinin sertlik sonuçları incelendiğinde, menevişleme işlemi sırasında östenitleme ile elde edilmiş olan martenzitik yapıdaki karbonun difüze olması ve ferritik yapının ayrışması söz konusudur. Menevişleme sıcaklığının artması ile bu olayların meydana gelmesi hızlandığından sertlikte düşüş görülmüştür. Ayrıca, kriyojenik işlem uygulanan numunelerde kalıntı östenitin hemen hemen hepsinin martenzite dönüştürülmesi nedeniyle bu numunelerde sertlik değerlerinin sadece menevişleme ısıl işlemi uygulanan numunelere kıyasla bir miktar daha yüksek olduğu görülmüştür.

Yüzeyi nitrürlenen sıcak iş takım çeliği numunelerinin aşınma testi sonuçları, kriyojenik işlemin uygulanması ile spesifik aşınma oranının azaldığını ve aşınma mekanizmasının adhezif aşınmadan abrazif aşınmaya dönüştüğünü göstermiştir.

Sert ve gevrek olmasından dolayı beyaz tabaka kalınlığının ince olması, deneysel çalışmada kriyojenik işlemin uygulandığı numunede görüldüğü gibi tribolojik özellikler açısından avantaj sağlamaktadır. Bu durum ayrıca kriyojenik işlem uygulanmış olan 6. numunede neden abrazif

aşınmanın ve kriyojenik işlem uygulanmamış olan 5. numunede neden adhezif aşınmanın etkin mekanizma olduğunu da açıklamaktadır. Çünkü karşıt yüzey olan çelik bilya ile direkt olarak temasta bulunan gevrek beyaz tabakada yük etkisi ile kırılmalar meydana gelir. Kırılarak kopan partiküller, aşınma testinin ilerleyen mesafelerinde ara yüzeye kayma yönünde kaynaklanarak adhezif tabakaları oluştururlar ve zamanla arayüzeyde sıcaklığın da artmasının etkisi ile bu bölgeler oksitlenirler. Ayrıca aşınma yüzeylerinin IM görüntülerinden görüldüğü üzere, kriyojenik işlemin uygulandığı 6. numunede difüzyon bölgesi daha geniş bir derinliğe sahiptir. Bu bölgede nitrasyon işlemi sırasında γ'-Fe_4N tipi demir nitrürlere ek olarak, sıcak iş takım çeliği bileşiminde var olan nitrür oluşturucu elementlerin nitrürleri de çökelebilirler. Bu durum malzemenin tribolojik özelliklerine önemli bir katkı sağlamaktadır.

Kriyojenik işlem, yapıda kalıntı östenit kalmasını ve menevişleme esnasında bu kalıntı östenitin dönüşümünü engelleyecek yüksek oranlı martenzitik bir dönüşümü garantiye alarak potansiyel sertliği reel hale getirmektedir. Öte yandan yarattığı hacimsel genleşme sayesinde karbür-matris ara yüzeyindeki delaminasyonu engelleyerek karbürün aşınma esnasında matrise tutunmasını kolaylaştırır. Böylece sertlik ile birlikte toklukta da artış sağlanmış olmaktadır.

Sıcak iş takım çeliklerine uygulanan ısıl işlem prosedürü nitrasyon tabakasının mekanik özellikleri açısından en az nitrasyon işlemi kadar büyük önem taşımaktadır. Çünkü nitrasyon işlemleri birçok uygulamada beklentileri karşılamakta ancak dövme, hafif metal ekstrüzyonu ve enjeksiyon döküm uygulamalarında meydana gelen mekanik yüklenmeler, nitrasyon nedeniyle esneme kabiliyeti ve kırılma tokluğu azalan takım çeliğinde makro kırılma hasarına neden olabilmektedir. Dolayısıyla nitrürleme sonrası elde edilen sert yüzeyin yeterli aşınma direnci ile birlikte gereken tokluğa ve esnekliğe sahip olması son derece arzulanan bir durumdur. Deneysel çalışma kriyojenik işlemin, nitrasyon sonucu oluşan beyaz tabaka derinliğinin azaltılmasında ve difüzyon tabakası derinliğinin arttırılmasında rol oynarak tribolojik özellikleri olumlu olarak etkilediğini göstermiştir. Dolayısıyla sıcak iş takım çeliklerinin ısıl işleminde ilgili alaşım kompozisyonu için uygun ısıl işlemlerin uygulanması ve nitrürleme sonrası mekanik özelliklerin geliştirilmesi kalıp ömründe artışa neden olabilecektir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

[1] N. B. Dhokey, S. S. Maske and P. Ghosh, Effect of tempering and cryogenic treatment on wear and mechanical properties of hot work tool steel (H13). Materials Today: Proceedings, 43(5), 3006-3013, 2021. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.361.

[2] E. B. Fonseca, J. D. Escobar, A. H. G. Gabriel, G. G. Ribamar, T. Boll and É. S. N. Lopes. Tempering of an additively manufactured microsegregated hot-work tool steel: A high-temperature synchrotron X-ray diffraction study. Additive Manufacturing, 55, 102812, 2022. https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102812.

[3] F. Liu, C. Kang, R. Qian, Z. Jiang, X. Geng and H. Li. Effect of tempering temperature on microstructure and properties of a new type of nitrogen-containing hot-work die steel 3Cr7Mo2NiSiVN. Steel Research International, 93, 2200013, 2022. https://doi.org/10.1002/srin.202200013.

[4] R. Thakurai, H. Patle, B. R. Sunil and R. Dumpala. Effect of cryogenic treatment duration on the microhardness and tribological behavior of 40CrMoV5 tool steel. Materials Today: Proceedings, 38(5), 2140-2144, 2021. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.126.

[5] U. Al-Qawabeha. Effect of heat treatment on the mechanical properties, microhardness, and impact energy of H13 alloy steel. International Journal of Scientific and Engineering Research, 8(2), 100-104, 2017.

[6] H. Ding, T. Liu, J. Wei, L. Chen, F. Cao, B. Zhang, R. Luo and X. Cheng. Microstructure and tempering softening mechanism of modified H13 steel with the addition of tungsten, molybdenum, and lowering of chromium. Materials and Design, 224, 2022. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111317.

[7] S. Farahany, M. Ziaie and N. A. Nordin. Effect of triple tempering temperature on microstructure, mechanical and wear properties of K340 cold work tool steel. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022. https://doi.org/10.1007/s11665-022-07791-4.

[8] Z. Cheng, L. Pu, W. Shizhong, Y. Long, W. Xiaodong, M. Feng, J. Dongliang, C. Chong, P. Kunming, L. Cheng and L. Jingkui. Effect of tempering temperature on impact wear behavior of 30Cr3Mo2WNi hot-working die steel. Frontiers in Materials, 6, 2019. https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00149.

[9] M. Tayanç ve G. Zeytin. Yüksek hız çeliklerinin iç yapı ve ısıl işlem özellikleri. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, c.2, 1, 103-122, 2000.

[10] D. Das, K. K. Ray and A. K. Dutta. Influence of temperature of sub-zero treatments on the wear behaviour of die steel. Wear, 267, 9–10, 1361-1370, 2009. https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.11.029.

[11] K. Arslan ve A. Şelte. Takım çeliklerinde sıfıraltı işlem mekanizması. Metalurji Dergisi, 167, 37-40, 2013.

[12] M. Villa, K. Pantleon and M. A. J. Somers. Evolution of compressive strains in retained austenite during sub-zero celsius martensite formation and tempering. Acta Materialia, 65, 383-392, 2014. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.11.007.

[13] A. Antony, N. M. Schmerl, A. Sokolova, R. Mahjoub, D. Fabijanic and N. E. Stanford. Quantification of the dislocation density, size, and volume fraction of precipitates in deep cryogenically treated martensitic steels. Metals, 10(11), 1561, 2020. https://doi.org/10.3390/met10111561.

[14] P. Jurči, I. Dlouhý , P. Priknerová and Z. Mrštný. Effect of sub-zero treatment temperatures on hardness, flexural strength, and fracture toughness of Vanadis 6 ledeburitic die steel. Metals, 8(12), 1047, 2018. https://doi.org/10.3390/met8121047.

[15] M. Kaba, M. Altay, E. Akyıldız, F. Muhaffel, S. Ozkurt, E. Atar, M. Baydogan and H. Çimenoğlu. Surface degradation of nitrided hot work tool steels under repeated impact-sliding contacts: Effect of compound layer. Wear, 498–499, 204300, 2022. https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204300.

[16] V. Joshi, A. Srivastava, R. Shivpuri and E. Rolinski, Investigating tribochemical behavior of nitrided die casting die surfaces. Proceedings of the 6th International Tooling Conference, pp. 961-977, Karlstad, Sweden, 2002.

[17] P. Ried, J. J. Moore, J. Lin, S. Carrera, S. Myers, A. Kunrath and B. Mishra, Design methodology for optimized die coatings used in aluminum pressure die casting. CastExpo’05, pp. 40-55, St. Louis, Missouri, ABD, 2005.

[18] Y. Yamada, E. Hirohito and K. Takahashi. Influence of crystal structure of nitride compound layer on torsion fatigue strength of alloy steel. Metals, 9(12), 1352, 2019. https://doi.org/10.3390/met9121352.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 376-384

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Derleme makalesi / Review article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Atık lastik tozuna uygulanan yüzey işlemleri ve atık lastik tozunun polimer/orijinal kauçuk bileşimlerinde kullanımının incelenmesi

Surface treatments applied to waste tire powder and review of the use of waste tire powder in polymer/original rubber compounds

İlker Erzincanlı[1,*], Fazliye Karabörk[2]

[1] *Aksaray Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 68100, Aksaray, Türkiye*
[2] *Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray, Türkiye*

Öz

Atık taşıt lastikleri malzemesi ve miktarı bakımından son derece değerli bir atık formudur. Atık lastiklerin geri kazanımında henüz sürdürülebilir ve verimli bir teknoloji geliştirilemediği için bu atığın değerlendirilmesi konusunda araştırmacılar çeşitli uygulamalara yönelmişlerdir. Bunlar arasında atık lastik tozlarının çeşitli malzeme bileşimlerine katılarak değerlendirilmesi önemli bir yer tutmaktadır. Bu uygulamalarda atık kauçuk tozunun katıldığı malzeme ile uyumunun kauçuğun yapısı gereği yeterince sağlanamadığı, bunun sonucunda malzeme özelliklerinin olumsuz etkilendiği görülmüştür. Kauçuk tozuna uygulanacak çeşitli yüzey işlemlerinin (yüzey modifikasyonu ve yüzey devulkanizasyonu) kauçuk tozu/matris uyumunu arttırdığına yönelik araştırmalar yoğun olarak sürdürülmektedir. Bu çalışmada, kauçuk tozuna uygulanan yüzey işlemleri detaylı olarak ele alınmış ve konuyla ilgili yapılan literatür çalışmaları incelenmiştir. Yapılan araştırmalar, kauçuk tozuna uygulanan yüzey işlemlerinin, tozun içine katıldığı malzeme ile uyumunu arttırdığını ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Atık taşıt lastiği, Yüzey modifikasyonu, Devulkanizasyon

Abstract

Waste tires are an extremely valuable form of waste in terms of material and amount. Since a sustainable and efficient technology has not yet been developed in the recycling of waste tires, researchers have turned to various applications for the evaluation of this waste. Among these, the evaluation of waste tire powders by adding them to various material compositions has an important place. In these applications, it was observed that the compatibility of the waste rubber powder with the material to which it was added could not be sufficiently achieved due to the nature of the rubber, and as a result, the material properties were adversely affected. Research is continuing intensively to show that various surface treatments (surface modification and surface devulcanization) to be applied to rubber powder increase rubber powder/matrix compatibility. In this study, surface treatments applied to rubber powder were discussed in detail and literature studies on the subject were examined. Studies show that the surface treatments applied to rubber powder increase the compatibility of the powder with the material it is incorporated into.

Keywords: Waste tire rubber, Surface modification, Devulcanization

1 Giriş

Artan taşıt kullanımı nedeniyle kullanım miktarı her geçen yıl artan taşıt lastikleri kullanım ömrünü tamamladıktan sonra "Ömrünü Tamamlamış Lastik (ÖTL)" olarak adlandırılan atık ürün haline gelir. Küresel olarak her yıl yaklaşık bir milyar ÖTL oluşmaktadır [1]. Taşıt lastikleri kullanım yerleri ve amacına göre belirlenen reçetelere/bileşimlere göre üretilir. Bu reçeteler, temel bileşen kauçuk olmakla birlikte, dolgu olarak karbon siyahı, vulkanizasyon için kükürt, aktivatörler ve hızlandırıcılar gibi değişik görevleri olan bileşenlerden oluşur. Lastik, performansının arttırılması ve kullanım süresinin uzatılması için bileşimi ve üretim prosesleri bakımından sürekli geliştirilen çok teknolojik bir üründür. Ancak tüm lastikler kullanım ömürlerinin sonunda atık haline gelirler ve bu aşamada atık lastiklerin değerlendirilmesi ve geri kazanım çalışmaları devreye girer [2, 3]. Atık lastikler hem miktarı hem malzemesi bakımından oldukça değerli bir atık formudur.

Atık lastikler için henüz sürdürülebilir, ekonomik ve verimli bir geri dönüşüm yöntemi olmadığı için, bir kısmı günümüzde çeşitli yöntemlerle değerlendirilirken bir kısmı kontrolsüz olarak doğaya bırakılmakta ve olumsuz çevresel etkilere (böceklerin çoğalması, yangınlar vb.) neden olmaktadır. Atık lastiklerin değerlendirilmesinde kullanılan; doğrudan değerlendirme, piroliz, enerji kaynağı olarak kullanma gibi yöntemler olmasına rağmen bu proseslerin hiçbiri malzeme olarak bir geri kazanım sağlamadığı için çok verimli prosesler değildir. Bu büyük atık lastik potansiyelinin mutlaka yeniden kalıplanabilir, yani yeniden vulkanize edilebilir kauçuk malzeme olarak geri kazanımının sağlanması gerekmektedir. Bu ise vulkanizasyonla kauçuk yapısında oluşan çapraz bağların (S-S, C-S) koparılması yani devulkanizasyon prosesi ile mümkündür [4]. Devulkanizasyon konusunda hem

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ilkererzincanli@aksaray.edu.tr (İ. Erzincanlı)
Geliş / Recieved: 13.06.2023 Kabul / Accepted: 08.10.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngmuh.1314087

akademik hem ticari çalışmalar yapılmaktadır ancak, ekonomik ve sürdürülebilir bir devulkanizasyon prosesi günümüz teknolojisi ile henüz geliştirilememiştir ve yakın bir gelecekte bir çözüm beklenmemektedir.

Atık lastiklerin malzeme olarak geri dönüşümünün zorluğu araştırmacıları farklı çalışmalara yöneltmiştir. Bu çalışmalar arasında atık lastik tozunun çeşitli işlemlerden geçirilerek veya geçirilmeden orijinal kauçuk reçetelerine katılması ve kompozit malzemelerde takviye fazı olarak kullanılması yer almaktadır [5-7]. Atık lastik tozunun orijinal kauçuk reçetesine doğrudan katılması reolojik ve mekanik özellikleri düşürmektedir. Bu nedenle toza çeşitli yüzey işlemleri uygulamanın, kauçuk matrisle tozun uyumunu arttırdığına yönelik çalışmalar bulunmaktadır [7-9]. Uygulanan yüzey işlemleri; yüzey devulkanizasyonu ve yüzey modifikasyonu başlıklarında toplanabilir. Yüzey devulkanizasyonu, mekanik, kimyasal veya termal yöntemler kullanılarak kauçuk tozunun yüzeyindeki çapraz bağların koparılması ile kauçuk matrisle uyumunu arttırmayı amaçlamaktadır. Yüzey modifikasyonu ise kimyasal veya fiziksel olarak yapılabilir ve amacı kauçuk tozunun katıldığı farklı matris malzemeleriyle iyi bir ara yüzey oluşturmayı sağlamaktır. Yüzey işlemleri sayesinde günümüz teknolojileri ile tam olarak geri dönüşümü mümkün olmayan atık lastiklerin toz formunda orijinal kauçuk reçetesinde ve kompozit malzemelerde kullanım miktarının arttırılması amaçlanmaktadır.

Bu çalışmada atık lastiklerden elde edilen kauçuk tozlarına uygulanan yüzey işlemleri ele alınmıştır. Bu işlemlerin atık kauçuk tozunu orijinal kauçuk reçetesinde veya kompozit malzemelerde kullanmanın matris özelliklerine olan etkileri ortaya konulmuştur.

2 Taşıt lastikleri

2.1 Taşıt lastiğinin malzemesi

Tek parçadan yapılmış siyah kauçuk görünümündeki taşıt lastikleri birden fazla malzemenin yüksek teknoloji ve maliyeti yüksek olan üretim işlemleri uygulanarak birleştirilmesi ile meydana gelmektedir. Lastik bileşiminde kauçuk yanında bulunan katkılar arasında öncelikle vulkanizasyon kimyasalları (kükürt gibi) gelir. Karbon siyahı gibi diğer katkı malzemeleri lastik maliyetinin düşürülmesi ve dayanımının artırılması amacıyla katılır [10]. Lastik bileşiminde bulunan malzemeler genel olarak aynı olmalarına rağmen kamyon ve otomobil lastiklerinde Tablo 1'de görüleceği gibi miktar bakımından farklılıklar gösterirler.

Tablo 1. Kamyon ve otomobil lastiklerinin malzeme kompozisyonlarının karşılaştırılması [11]

Malzeme	Otomobil Lastiği (% ağırlıkça)	Kamyon Lastiği (% ağırlıkça)
Kauçuk	48	45
Karbon Siyahı	21.4	22
Metal	15.6	23
Kort	5.5	3
Çinko Oksit	1	2
Diğer Katkılar	8.5	5

2.2 Atık lastiklerin değerlendirilme yöntemleri

Avrupa Lastik ve Kauçuk Üreticileri Derneği (ETRMA) verilerine göre, dünyadaki yıllık lastik üretimi 1.6 milyar adettir [12]. Taşıt sayısının artmasıyla her yıl üretilen lastik sayısı artmakta buna paralel olarak atık lastik miktarı da artış göstermektedir. Dünyadaki atık lastiklerin yalnızca yüzde 50 'si geri dönüştürülürken (termal ve elektrik enerjisi için yakma, piroliz vb.), kalan yarısı ise düzenli depolama alanlarında depolanmakta veya çevreye kontrolsüz bir şekilde bırakılmaktadır [13].

Kullanılmış lastiklerin bertaraf edilmesi küresel bir sorundur. Atık lastiklerin geri dönüşümü için en ideal yaklaşım malzeme olarak geri dönüştürebilmek ve yeniden kalıplayarak kullanmaktır. Ancak vulkanizasyonla oluşan çapraz bağlar buna engel olmakta ve kauçuğu geri dönüştürülmesi çok zor olan bir malzeme haline getirmektedir. Ayrıca ileri teknoloji ürünü olan taşıt lastikleri sadece kauçuktan oluşmamakta, lastik bileşimi kullanım amacına uygun olarak ve uzun süre kullanımını sağlayacak şekilde geliştirilmektedir. Lastik bileşimine yapılan tüm bu katkılar atık lastiklerin geri dönüştürülmesini daha fazla zorlaştırmaktadır. Günümüzde atık lastikler genel olarak aşağıda sıralanan yöntemlerle geri dönüştürülmekte ve değerlendirilmektedir:

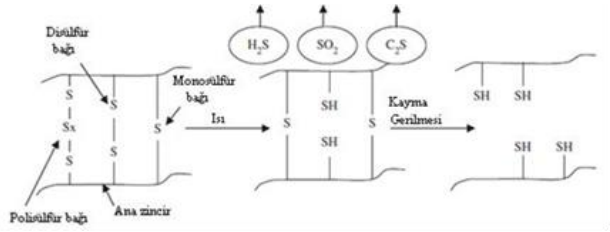
Doğrudan değerlendirme ve parçalayıp lastik tozu olarak kullanma: Atık lastiklerin doğrudan değerlendirmesi, atık lastiklerin bütün olarak gemilerin iskeleye yanaşması için darbe sönümleyici olarak, çocuk oyun parklarında ekipman olarak, deniz ve toprak dolgusu olarak kullanılması şeklinde veya atık lastiklerin mekanik olarak parçalanması yöntemiyle küçük parçacıklar haline getirilerek, spor pistleri veya çocuk oyun alanları gibi alanlarda zeminin kaplaması amacıyla ya da beton ve asfalta katılarak kullanılmasını kapsar [14].

Enerji kaynağı olarak kullanma: Taşıt lastiği yaklaşık %90 gibi bir oranda organik malzeme içerdiği için ısıl değeri yaklaşık 32.6 MJ/kg 'dır. (kömürde bu değer: 18.6 – 27.9 MJ/kg) [14]. Isıl değerinin yüksek olması nedeniyle enerji santralleri, çimento fabrikaları gibi tesislerde yakıt olarak kullanılmaktadır.

Piroliz: Oksijen bulunmayan ortamda organik maddelerin 500 – 800 ºC arasında ısıtılarak katı, sıvı ve gaz ürünlere ayrıştırılması işlemine piroliz denilmektedir. Piroliz sonucu pirolitik yağ, pirolitik karbon siyahı, çelik tel ve piroliz gazlar elde edilen ürünlerdir.

Reklamasyon (devulkanizasyon, depolimerizasyon (rejenerasyon)): Şimdiye kadar sayılan yöntemler atık lastiklerin ürün olarak değerlendirilmesini kapsar. Malzeme elde edilmesini sağlayan geri dönüşüm bu sayılan yöntemlerin içinde değildir. Yüksek atık miktarı ve bu tür yöntemlerin neden olduğu ek problemler göz önüne alındığında malzeme geri dönüşümü, yani atık lastiğin kalıplanabilmesi mümkün olan kauçuk malzemeye dönüşümü gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Atık kauçuk reklamasyonu için iki uygulama vardır. Kauçukta vulkanizasyonla oluşan çapraz bağları koparmayı amaçlayan devulkanizasyon ve diğer yöntemde çapraz bağlar yanında polimer zincirlerinin de koparıldığı depolimerizasyondur. Atık kauçukların geri dönüşümünde ideal uygulama

devulkanizasyondur. Kauçuk devulkanize edilebildiği yani polimer zincirlerine zarar vermeden kükürt çapraz bağları koparıldığı zaman yeniden kalıplanabilir hale gelecektir. Çapraz bağların koparılma mekanizması Şekil 1'de gösterilmiştir. Devulkanizasyon için geliştirilen ve hala üzerinde çalışılan yöntemler arasında, kimyasal, makine kimyasal, ultrasonik, biyolojik ve termal devulkanizasyon metotları sayılabilir.



Şekil 1. Çapraz bağların kırılması [15]

2.3 Atık taşıt lastiklerinin parçalanması

Kauçuk malzemelerin geri dönüşümünde ilk adım genel olarak parçalamadır. Malzemenin uygulanacak değerlendirme yöntemi ve geri dönüşüm prosesine bağlı olarak (doğrudan değerlendirme, yüzey işlemleri, devulkanizasyon vb.) atık lastik tozu boyutunun uygun olması gerekir [16]. Partikül boyutu ve boyut dağılımı, saflık, yüzey morfolojisi gibi faktörler kauçuk tozunun kalitesini etkiler [17].

Atık lastiklerin parçalama işlemi, kullanılan ekipmana (bıçaklı parçalayıcı, öğütücü, ekstrüder) ve hangi koşulda parçalandığına (oda sıcaklığı ya da kriyojenik parçalama) bağlı olarak değişir. Parçalama işleminde esas prensip atık lastiklerin mekanik olarak parçalanmasıdır. Kriyojenik parçalamada lastik parçaları önce -80 °C 'nin altında soğutulur ardından mekanik olarak parçalanır. Kriyojenik parçalama ile elde edilmiş kauçuk tozunun yüzeyi daha düzgün ve daha küçük yüzey alanına sahiptir. Düşük sıcaklıkta öğütülen tozlar kauçuk bileşimine ilave edildiğinde polimere ile fiziksel bağı zayıf bir şekilde gerçekleşirken, oda sıcaklığında öğütülen tozlar yüzeyinin daha pürüzlü olmasından kaynaklı boşluklar sayesinde polimere daha kuvvetli şekilde bağlanır. Oda sıcaklığında öğütme sonucu kauçuk bileşiminde yeniden kullanma ve devulkanizasyon açısından daha iyi fiziksel özelliklere ulaşılır [18].

3 Atık lastik tozuna uygulanan yüzey işlemleri

Toz haline getirilen atık lastikler çoğunlukla orijinal kauçuğa yarı aktif dolgu maddesi olarak veya diğer polimer (termoset veya termoplastik) bileşimlerine güçlendirici olarak katılır. Kauçuğun karmaşık üç boyutlu moleküler ağ yapısı, polimer matrisler ile etkileşimini sınırlar ve uyumluluğu azaltır [9]. Takviye faz olarak eklenen atık lastik tozu ile sürekli polimer fazı arasındaki bu uyumsuzluk, verimli stres transferini engeller ve malzemenin mekanik özelliklerini düşürür [19]. Orijinal polimer ve atık lastik tozu arasındaki uyumu arttırmak, arayüzey özelliklerini geliştirmek, katılan atık lastik tozunun orijinal polimer özelliklerini olumsuz etkilemesini engellemek için toz yüzeyinin modifiye edilmesi gerektiği yapılan çalışmalarda ifade edilmiştir [5, 20]. Katılma oranı atığın ve matris malzemesinin özelliklerine göre değişir ve sınırlı oranlarda uygulanır. Yapılan çalışmalarda matris malzemesiyle atık kauçuk tozunun uyumunun arttırılması sayesinde daha fazla atık tozun orijinal malzeme içine katılabileceği ifade edilmiştir [21]. Kauçuk tozunun yüzey aktivasyonunu sağlamak için uygulanan modifikasyon işlemlerin iki amacı vardır [17];

- Kauçuk tozlarının kauçuk ya da polimerlere katılması durumunda, iyi bir ara yüzey bağı elde etmek için tozun yüzey enerjisini azaltmak ve ıslanabilirliğin artırılması.
- Kauçuk tozunun orijinal kauçuğa katılması durumunda, işlemin etkinliğini arttırmak, diğer anlamda yüzey devulkanizasyonu sağlamak.

Matrisle etkileşimi ve uyumu arttırmak amacıyla atık lastik tozuna yapılacak yüzey hazırlama ve iyileştirme işlemleri atık lastik tozunun kullanım alanlarını genişletecek ve aynı zamanda atık lastiklerin geri dönüşümünde sürdürülebilir uygulama alanları açacaktır.

3.1 Yüzey modifikasyonu

Atık lastik tozlarının yüzey modifikasyonu amacıyla kimyasal ve fiziksel yöntemler kullanılabilir [4, 5, 17].

3.1.1 Kimyasal yüzey modifikasyonu

Farklı uygulamalar için atık lastik tozunun yüzeyini aktive etmek amacıyla kullanılan çeşitli kimyasal modifikasyon işlemleri vardır. Bu işlemler; karbonil, hidroksil veya peroksil grupları gibi oksidasyondan türetilen polar gruplar veya kimyasal aşındırma, hatta kısmi devulkanizasyon yoluyla toz yüzeyini modifiye etmeyi ve katıldığı malzeme ile uyumunu arttırmayı amaçlar [5]. Modifikasyon süreçleri, atık lastik tozunun çeşitli endüstrilerde uygulanabilirliğini önemli ölçüde artırır ve bu sayede doğrudan çevreye bırakılan atık lastik miktarının azalmasına katkı sağlar. Atık lastik tozuna uygulanan kimyasal yüzey işlemleri arasında; asitle yüzey modifikasyonu, oksidasyon ve hidroksilasyon yöntemleri sayılabilir [6].

Asitle yüzey modifikasyonu, gözenekli (poröz/pürüzlü) bir toz yüzeyi oluşturarak, kauçuk tozu ve katıldığı polimer matris arasında mekanik tutunmayı arttırdığı için en başarılı yüzey modifikasyon yöntemlerinden birisi olarak bildirilmiştir [9]. Bu amaçla en çok kullanılan kimyasallar arasında; sülfirik asit (H_2SO_4), nitrik asit (HNO_3), hidrojen peroksit (H_2O_2), perklorik asit ($HClO_4$), trikloroizosiyanürik asit (TCI) sayılabilir. Colom vd. [22] atık lastik tozlarının (400-600 µm) yüzey modifikasyonunu sülfürik asit, silan bağlama ajanları ve trikloroizosiyanürik asit kullanarak yapmışlardır. Yüzeyi modifiye edilen atık lastik tozlarını ağırlıkça %5, 10, 20 ve 40 oranlarında yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) matrise katarak 150 °C 'de iki silindirli milde 3 dk karıştırarak mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kullanılan kimyasalların arasında mekanik adezyonun artışında en iyi sonucu, yüzeyi pürüzünün artmasını sağlayarak ara yüzey adezyonunu artıran H_2SO_4 'ün verdiğini tespit etmişlerdir. H_2SO_4 ile modifiye edilen tozun ağırlıkça %20 oranında katıldığı kompozit malzemede çekme mukavemeti modifiye edilmeyen toz katılan

kompozit malzemeye göre %24 oranında bir artış elde edilirken, bu artış HNO_3 ile modifiye edilen tozun %40 oranında katıldığı kompozit malzemedeki artıştan çok daha fazladır. Konuyla ilgili başka bir çalışma Morera vd. [9] tarafından yapılmıştır. Araştırmacılar kriyojenik parçalama ile elde edilen atık lastik tozunun (100-150 µm) yüzeyini farklı asitlerle (H_2SO_4, HNO_3) modifiye etmişler ve stiren-bütadien kauçuğa (SBR) katmışlardır. H_2SO_4 ile modifikasyon işleminin kauçuk toz yüzeyinde mikro boşluklar ve poröz bir yapı oluşturduğu mikroyapı analizleri ile ortaya konulmuştur. En iyi sonuç bu tozun katıldığı kauçuk malzemede elde edilmiş ve 10 phr (parts per hundred rubber, yüz kısım kauçuk) modifiye toz eklenen kauçuk malzemede, çekme mukavemeti ve kopma uzamasında sırasıyla %115 ve %761 oranlarında artmıştır.

Çeşitli kimyasallar kullanarak atık kauçuk tozu yüzeyinde fonksiyonel gruplar (hidroksil, karbonil vb.) oluşturmayı ve içine katılacağı malzeme ile tozun uyumunu arttırmayı amaçlayan diğer bir kimyasal yüzey modifikasyon metodu oksidasyondur. Oksidasyonla oluşan fonksiyonel gruplar, kauçuk tozunun yüzeyindeki polariteyi arttırır ve sonuç olarak, reaksiyon ortamında bulunan diğer uygun fonksiyon gruplar (çapraz bağ oluşturabilen kalıntı amino grupları, inorganik tuzlar vb.) ile olabilecek kimyasal reaksiyonlarla, tozun matrisi güçlendirme performansını artırabilir [23]. Yehia vd. [24] yaptıkları çalışmada atık kauçuk tozunu (125-500 µm) farklı oksitleyici ajanlar (HNO_3 ve H_2O_2) kullanarak kimyasal yüzey modifikasyonuna tabi tutmuşlardır. Kimyasal olarak modifiye edilen ve edilmeyen kauçuk tozları doğal kauçuk (NR) matrise çeşitli oranlarda (10, 20, 30, 40, 50 phr) katılmıştır. Yüzeyi modifiye edilen kauçuk tozu katılan kompozitlerde çekme mukavemetinin arttığı buna toz yüzeyindeki kimyasal oksidasyonun ve bu sayede oluşan reaksiyonlar nedeniyle yeni fonksiyonel grupların oluşmasının yol açtığı ifade edilmiştir. Atık kauçuk tozunun yüzeyinin oksidasyonu ile ilgili bir diğer çalışma Sonnier vd. [25] tarafından iki aşamalı bir oksidasyon uygulanarak yapılmıştır. Çalışmada, önce potasyum permanganat ($KMnO_4$) ile kimyasal bir oksidasyon ardından γ-ışını uygulanmıştır. Oksidasyon sonrasında kauçuk tozu ağırlıkça %0-70 arasında değişen oranlarda termoplastik matrise (düşük yoğunluklu polietilen; LDPE, yüksek yoğunluklu polietilen; HDPE) katılmıştır. Sonuçlar, oksidasyona dayalı yüzey işlemlerinin, tozun polietilen matrise katılmasının matrisin mekanik performanslarını önemli ölçüde iyileştirmek için yeterince etkili olmadığını göstermiştir. Araştırmacılar, tozun polar olmayan bir polimer matrise katılmasının, arayüzeyde serbest radikal destekli çapraz bağlanma reaksiyonlarının gerçekleşebileceği bileşimlere (kontrollü dinamik vulkanizasyon) katılması kadar etkili olamayacağı sonucuna varmışlardır. Bu araştırma tüm yüzey modifikasyon işlemlerinin, tozun her türlü matrisle uyumunu desteklemeyeceğini ortaya koyması bakımından önemlidir. Atık lastik tozuna katılacağı matris malzemesinin türüne göre farklı yüzey işlemleri uygulanmalıdır.

Atık kauçuk tozlarına kimyasal yüzey modifikasyonu sadece polimer malzemelerle uyumu arttırmak amacıyla değil aynı zamanda asfalt, çimento vb. bileşimlere katılmadan önce de uygulanır. Atık kauçuk tozunun çimentoda agrega olarak kullanılmasına yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Atık kauçuk tozlarının yüzeyinde yaşlanma etkisiyle oksijen içeren fonksiyonel gruplar ortaya çıkabilir. Özellikle en yaygın fonksiyonel grup karboksil grubudur. Asit karboksil grubu, çimentodaki alkali içeriği ile reaksiyona girerek yapısını kirletebilir. Atık kauçuk tozuna NaOH çözeltisi ile yüzey işlemi uygulanırsa, asit fonksiyonel grup üzerindeki hidrojen iyonu, Na+ ile yer değiştirebilir ve böylece çimento hidratasyonunu iyileştirebilir. Kimyasal yüzey modifikasyonu türlerinden bir diğeri olan ve hidroksilasyon olarak adlandırılan bu yöntemde NaOH ile yüzey modifikasyonu ayrıca tozun hidrofobikliğini de etkiler. NaOH ile modifikasyondan sonra toz yüzeyinde temas açısının önemli ölçüde azaldığı bulunmuştur, bu durum agrega hidrofilikliğinin arttığını gösterir ve NaOH çözeltisi ile yüzey işleminin potansiyel olarak kauçuk agrega ile çimento hamuru arasındaki bağlanmayı arttırdığı anlamına gelir [25].

3.1.2 Fiziksel yüzey modifikasyonu

Atık kauçuk tozunun kütlesel özelliklerini etkilemeden sadece yüzey özelliklerini değiştirmek (polariteyi değiştirmek veya hidrofobik yüzeyi hidrofilik hale getirmek gibi) için uygulanan fiziksel yüzey modifikasyonu işlemlerinden birisi aşılamadır. Aşılamanın birden çok uygulaması vardır. Aşılama kauçuk tozlarına tek başına uygulanabildiği gibi iki aşamada da uygulanabilir. İlk aşama, kauçuk toz yüzeyinin çeşitli kimyasallarla (maleik anhidrit, akrilamid, allilamin, nitrozo difenilamin vb.) aşılanması, ikinci aşama ise epoksidasyon, hidroksilasyon gibi işlemlerle yüzeyin modifikasyonu ya da X-ışınlarına veya ultraviyole (UV) ışığına maruz bırakılması (foto aşılama) şeklindedir [5, 17]. Shanmugharaj vd. [26] foto aşılama konusunda yaptıkları çalışmada çözelti olarak allylamine kullanmışlar, atık kauçuğu bu çözeltide üç saat bekletmişler, kurulama işlemlerinin ardından 15, 30 ve 45 dakika UV ışığa maruz bırakmışlardır. Uygulama sonrasında yapılan yüzey analizlerinde, toz yüzeyinde pürüzlülüğün arttığı, tozun hidrofilikliğinin arttığı, bu duruma yapılan yüzey işlemiyle toz yüzeyindeki modifikasyonun neden olduğu ifade edilmiştir.

Toz yüzeyinin daha polar ve hidrofilik hale gelmesi ve böylece kauçuk tozunun polar bağlayıcılar veya polimerler ile uyumluluğunun artması amacıyla uygulanan diğer bir yöntem plazma ile yüzey modifikasyonudur. Kauçuk tozları, düşük sıcaklıktaki bir plazma alanında aktive edilebilir. Elektrik boşalmasının meydana geldiği ortama ve reaktif gazların varlığına bağlı olarak, kauçuk tozunun yüzeyinin kimyasal bileşimi değişir. Boşaltma ortamı soy gazlar, hava, oksijen veya nitrojendir [17]. Cheng vd. [27] GTR tozunu modifiye etmek için düşük sıcaklıklı plazma ünitesi (vakum sistemi, vakum ölçüm sistemi, güç kaynağı ve kontrol sisteminden oluşan) kullanmışlardır. Numune ince ve düz bir tabaka üzerine uygulanarak reaksiyon odasına yerleştirilmiş ve plazma uygulanmıştır. Plazma deşarjı sırasında suyu uzaklaştırmak için $CuSO_4$ ve çalışma gazı olarak kuru hava kullanılmıştır. Boşaltma gücü seviyeleri 60 ve 100 W, süresi ise 150 s olarak ayarlanmıştır. Yapılan test ve analizlerde toz

yüzeyinde modifikasyon sonrasında polar grupların ve hidrofilikliğin arttığı ifade edilmiştir.

3.2 Yüzey devulkanizasyonu

Yüzey devulkanizasyonu, devulkanizasyon işlemini öğütülmüş lastik tozunun yüzeyiyle sınırlandırmaktır. Böylece toz, yeni bir polimer matrise katılması durumunda çapraz bağlanabilir hale getirilmiş olur. Kauçuk tozlarının yüzey devulkanizasyonu, mekanik olarak, boşluğu düşük olan (0.1 mm 'den daha küçük) iki silindir arasından yüksek kayma kuvvetleri etkisinde geçirilmesi ile sağlanır. Bu mekanik işlem, karıştırıcı ya da ekstrüder ile gerçekleştirilebilir. Ayrıca mekanik etkinin yanında kimyasal ajanlar eklenerek mekanik ve kimyasal etkinin birleştirildiği makine-kimyasal yüzey devulkanizasyonu uygulanabilir [17]. Yapılan çalışmalarda, çift vidalı ekstrüzyonun kauçuk tozunun devulkanizasyonu için oldukça verimli bir yöntem olduğu ifade edilmektedir ancak çalışmalar genellikle 180-280°C gibi yüksek sıcaklıklarda yapıldığı için enerji kullanımı fazladır ve kauçuk ana zincir bağlarının (C-C) kopmasına neden olabilmektedir [28-30].

Liu vd. kimyasal ajan olarak 2,20-dibenzotiazoledisulfide (DM) kullanarak ve çift vidalı ekstrüzyonda 100°C 'lik bir ekstrüzyon sıcaklığı uygulayarak kauçuk tozunun yüzeyine makine-kimyasal devulkanizasyon işlemi yapmışlardır. Daha sonra modifiye edilmiş kauçuk tozu doğal kauçuğa katılmıştır. Yapılan analizler, ektrüderdeki termal ve mekanik etkilerin, kauçuk tozunun yüzey oksidasyonu üzerinde olumlu etkilere sahip olduğunu ve kimyasal ajanın eklenmesinin oksidasyonu daha da arttırdığını göstermiştir. Ayrıca işlem sonrasında kauçuk tozunun yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Yüzeyi devulkanize edilen atık kauçuk tozunun 40 phr oranında katıldığı doğal kauçuk numuneler üzerinde yapılan testler, devulkanizasyonun hem arayüzey özelliklerini hem de mekanik özellikleri geliştirdiğini ortaya koymuştur [20]. Jiang vd. atık lastik tozunun yüzey devulkanizasyonunu açık iki silindirli milde tetraetilenpentamin (TEPA) katarak gerçekleştirmişler ve termoplastik bir polimer olan HDPE katarak ürettikleri termoplastik kauçuk kompozitin özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan analizlerle atık lastik tozu ve HDPE arasında çapraz bağların oluştuğu görülmüş ve malzemenin mekanik özelliklerinin çapraz bağlanma derecesine son derece bağlı olduğu ifade edilmiştir [31].

4 Atık lastik tozunun farklı malzeme bileşimlerine katılarak değerlendirilmesi

Mekanik olarak parçalanıp granül veya toz haline getirilen atık lastikler; orijinal lastik reçetesinden, termoplastik ve termoset polimerlere, betona, asfalta kadar pek çok farklı malzemeye katılarak değerlendirilmektedir [6, 23]. Atık lastik tozlarının katıldığı kompozitlerde mekanik ve fiziksel özellikleri (darbe mukavemetini iyileştirme, çatlak yayılmasını engelleme, ses sönümleme ve ısı emme gibi) iyileştirmede etkilidir [6]. Tablo 2'de atık lastik tozlarına uygulanan yüzey işlemleri, katıldığı malzemeler ve elde edilen özellikler geniş bir literatür taraması ile detaylı olarak verilmiştir.

4.1 Atık kauçuk tozunun plastiklere katılması

Atık lastik tozu termosetlere ve termoplastiklere çoğu zaman takviye fazı olarak ve ham kauçuğa yarı aktif dolgu maddesi olarak dahil edilir [9]. Atık lastik tozu ile içine katıldığı matris malzemesi arasındaki uyumu arttırmak için önceki bölümlerde açıklanan yüzey modifikasyonu ve yüzey devulkanizasyonu işlemlerinin yanı sıra ayrıca reaktif uyumlulaştırma ve dinamik vulkanizasyon uygulanmaktadır. Atık lastik tozu/polimer karışımlarının dinamik vulkanizasyonu, yüzey devulkanizasyonu yapılan atık lastik tozu ile plastik matris arasında, eritilerek harmanlanmaları sırasında az miktarda kükürt veya peroksit eklenerek başlatılan bir çapraz bağlama işlemidir. Bu çapraz bağlama işlemi sırasında atık lastik tozu, plastik matrise kimyasal bağlarla bağlanır ve böylece arayüz yapışmasını geliştirir [31]. Atık lastik tozunun kısmi devulkanizasyonu veya yüzey devulkanizasyonu, termoplastik vulkanizatların (TPV) hazırlanmasında dinamik vulkanizasyonla birlikte kullanılabilir [31]. Sonnier vd. bu konu ile ilgili çalışmalarında, dikümil peroksit (DCP) içeriğinin atık lastik tozu/PE karışımlarının özellikleri üzerindeki etkisini incelemişler ve kopma anındaki uzamanın ve darbe enerjisinin ağırlıkça %0,5–1 DCP eklenmesiyle önemli ölçüde arttığını bulmuşlardır. Bunun nedenini, GTR ve PE arasında güçlü arayüzey yapışması yaratan ortak çapraz bağlanma ile açıklamışlardır [32]. Awang vd. atık lastik tozu/PP karışımlarının uyumluluğunu iyileştirmek için DCP ve N,N'-m-fenilen-bismaleimid (HVA-2) kullanmışlar ve ara yüzeyde kimyasal bağların oluşması nedeniyle, kompozitin çekme özelliklerinin, şişme direncinin ve termal stabilitesinin her iki kimyasalın eklenmesiyle büyük ölçüde iyileştiğini göstermişlerdir [33].

Reaktif uyumlulaştırma, karışmayan polimer bileşimlerinde, matris/takviye uyumunu geliştirmek için en uygun yöntemlerden biridir. Fenolik bileşikler, maleik anhidrit, karboksiller, p-fenilendiamin (PDA), 4,4'-diamindifenilmetan gibi kimyasallar uyumlulaştırma ajanları olarak kullanılabilir. Uyumlulaştırma özellikle termoplastik elastomer kompozitlerde (TPE) kauçuk tozu ile termoplastik matrisin uyumunu arttırmak amacıyla uygulanmaktadır [34].

4.2 Atık kauçuk tozunun kauçuk bileşimine katılması

Toz kauçuğun lastik bileşimine veya diğer kauçuk ürünlere, yüzey modifikasyonu uygulanarak veya uygulanmadan ilave edilmesi bilinen bir uygulamadır. Orijinal kauçuk bileşimine kauçuk tozu katılması, kauçuk matrisin yapısına ve kauçuk tozunun özelliklerine bağlı olarak, bileşimin kürlenme davranışı (scorch süresi, optimum kürlenme süresi, kürlenme hızı gibi reolojik özellikler) ve mekanik özelliklerini etkiler [17]. Kükürtle vulkanize edilen atık kauçuk tozlarının orijinal kauçuk matrise katılması durumunda, kauçuğun scorch süresinin kısaldığı bulunmuştur. Bunun nedenleri arasında; hızlandırıcıların kauçuk tozundan orijinal kauçuk matrise göç etmesi, hızlandırıcıların karbon siyahının yüzeyindeki adsorpsiyonu, kauçuk tozunun eklenmesiyle matrisin artan viskozitesi nedeniyle mekanik karıştırma sırasında sıcaklığın artması ve hızlandırıcıların matris kauçuğu ile birlikte çapraz bağlar oluşturabilme kolaylığı sayılabilir [17].

Tablo 2. Atık lastik tozlarına uygulanan yüzey işlemleri, katıldığı malzemeler ve malzeme özelliklerine etkileri konusunda yapılan çalışmalar

Uygulanan yüzey işlemi ve kimyasallar	Atık lastik tozu boyutu	Matris	Özelliklerde Gözlenen Değişim	Literatür
Kimyasal Yüzey Modifikasyonu: • Asitle Yüzey Modifikasyonu (H2SO4, HNO3 ve HClO4)	400-600 µm	HDPE	Mekanik özelliklerde en yüksek performans H2SO4 ile modifikasyonda gözlenmiş ve %20 modifiye toz ilavesi ile çekme mukavemetinde, modifiye edilmemiş toz ilavesine göre, %24 oranında artış elde edilmiştir.	[22]
Kimyasal Yüzey Modifikasyonu: • Makine Kimyasal (H2SO4,)	100-150 µm	SBR	Mekanik özelliklerde en yüksek performans H2SO4 ile modifikasyonda gözlenmiş ve 10 phr modifiye toz ilavesi ile modifiye edilmeyene göre çekme mukavemeti ve kopma uzamasında sırasıyla %115 ve %761 oranlarında artmıştır.	[9]
Kimyasal Yüzey Modifikasyonu: • Oksidasyon (HNO3, H2O2)	125-500 µm	NR	50 phr oranında atık lastik tozu katılan NR 'nin çekme dayanımı, HNO3 ve H2O2 ile yüzey modifikasyonu yapılması durumunda, sırasıyla %40 ve %43.6 oranlarında artmıştır. 20 phr modifiye atık lastik katılması durumunda bu artış %50 'nin üzerine çıkmıştır.	[23]
Kimyasal Yüzey Modifikasyonu: • Oksidasyon (KMnO4) ve Gamma Işınlama	400-1200 µm	LDPE HDPE	Polimer matrise farklı oranlarda katılan atık lastik tozuna uygulanan yüzey modifikasyonu mekanik özelliklerde bir iyileşme sağlamamıştır.	[24]
Kimyasal Yüzey Modifikasyonu: • Oksidasyon ve Gama Işınlama	400-500 µm	HDPE	50 phr oranında atık lastik tozu katılan HDPE 'nin çekme dayanımında, yapılan yüzey modifikasyonu işlemlerinin ardından, modifiye edilmeyene göre önemli bir değişiklik olmamış ancak kopma uzaması ve toklukta önemli oranda artış gözlenmiştir.	[32]
Fiziksel Yüzey Modifikasyonu: • Foto aşılama (ultraviyole/UV ışığına maruz bırakma, Allylamine)	2-200 µm	PP	Atık lastik tozu katılan PP 'nin yapılan yüzey modifikasyonu işlemlerinin ardından modifiye edilmeyene göre çekme dayanımında %4 ile %8 arasında ve kopma uzamasında %6 ile %33 arasında artış gözlenmiştir.	[39]
Kimyasal Yüzey Modifikasyonu: • Asitle Yüzey Modifikasyonu (H2SO4)	3-5 mm	PP	PP matrisine ağırlıkça %50 oranında modifiye edilmiş atık lastik tozu eklenmesi, kompozitin basma dayanımını 40 MPa 'dan 21 MPa 'a düşürürken, aynı oranda modifiye edilmemiş toz eklenmesi basma dayanımını 13 MPa 'a düşürmüştür.	[40]
Fiziksel Yüzey Modifikasyonu: • Plazma (3 kHz ve 100 kHz)	250 µm	NBR	20 phr oranında yüzey modifikasyonu yapılan atık lastik tozu katılan NBR kauçuğun çekme mukavemeti %42, yırtılma mukavemeti %21 oranlarında artmıştır.	[41]
Fiziksel Yüzey Modifikasyonu: • Gama Işınlama	75-800 µm	PP	PP matrise ağırlıkça %10-80 arasındaki oranlarda modifiye edilmiş atık lastik tozu eklenmesi, kompozitin çekme dayanımında %8 ve kopma uzamasında modifiye edilmeyen toz katılan kompozite göre 2.5 kat artışa neden olmuştur.	[26]
Fiziksel Yüzey Modifikasyonu: • Mikrodalga (700W)	390 µm	NBR/ NR	5 dk süreyle mikrodalga yüzey modifikasyonu işlemine maruz kalan atık lastik tozu katılan (50 phr) kauçuk bileşiminin, modifiye edilmeyen toz katılan bileşime göre elastisite modülü %19, çekme dayanımı %11 oranında artmıştır.	[42]
Fiziksel Yüzey Modifikasyonu: • Mikrodalga (700 W)	390 µm	NR	10 dk süreyle mikrodalga yüzey modifikasyonu işlemine maruz kalan atık lastik tozu katılan (50 phr) kauçuk bileşiminin, modifiye olmayan toz katılana göre; çekme mukavemeti taşıt lastiğinde %3 kamyon lastiğinde %17, kopma uzaması taşıt lastiğinde %4.7 kamyon lastiğinde %15.4 artmıştır.	[43]
Makine Kimyasal Yüzey Modifikasyonu • Çift vidalı ekstrüder ve 2.20-dibenzotiazol disülfit	80 mesh	NR	40 phr oranında NR 'ye yüzey modifikasyonu yapılarak katılan atık lastik tozu işlem görmeyene göre çekme mukavemetinin 12.87 MPa 'dan 16.87 MPa 'ya, kopma uzamasının ise %341 'den %447 'ye artmasına neden olmuştur	[20]
Makine Kimyasal Yüzey Modifikasyonu • Çift vidalı ekstrüder ve tetraetilenpentamin (TEPA)	-	HDPE	Modifiye edilen atık lastik tozu katılan (60 phr) polimer kompozitin modifiye edilmeyene göre çekme ve yırtılma mukavemeti ve kopma uzaması değerlerinde önemli oranda artış gözlenmiştir.	[31]
Fiziksel Yüzey Modifikasyonu: • Gama Işınlama (25, 50, 75 ve 100 kGy)	80 mesh	SBR	Farklı ışınlama sürelerine göre modifiye edilmeyene göre çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinde artış gözlenmiştir.	[44]

Orijinal kauçuk bileşimine kauçuk tozu katılması bileşimin kürlenme davranışı yanında mekanik özelliklerini de etkiler. Bu etki kauçuk atığın yaşı, kauçuk tozunun bileşimi, parçalanma yöntemi, tozun saflığı, tane boyutu ve tane boyut dağılımı, kauçuk tozunun konsantrasyonu ve tozun katılacağı bileşimin türü gibi faktörlere bağlıdır [35]. Yapılan çalışmalarda, herhangi bir işlem görmemiş kauçuk tozunun kauçuğa dolgu olarak katılması durumunda, mekanik özelliklerdeki ortalama kaybın, ağırlıkça her yüzde birlik ilavede %1 olduğu ifade edilmiştir [35, 36]. Bu nedenle bileşime katılacak kauçuk tozu oranı taşıt lastiği üretiminde %5, diğer kauçuk ürünlerde %10 ile sınırlandırılmıştır [35, 36]. Toz kauçuk ilave edilen bileşim lastik iç kaplamasında veya radyal gövde katında olmak

üzere çeşitli kısımlarında kullanılabilir. Diğer uygulamalar hortumlar, bantlar, sürtünmeye maruz kalan malzemeler, çamurluklar, kapı tamponları sayılabilir.

Atık kauçuk tozunun tane boyutu katıldığı kauçuk bileşiminin özellikleri üzerinde oldukça etkilidir ve bu konuda çok sayıda çalışma yapılmıştır. Naskar vd. [37] yaptıkları çalışmada 100 µm ile 650 µm arasındaki tane boyutuna sahip, işlenmemiş toz haline getirilmiş atık lastik doğal kauçuğa (NR) katıp tane boyutu azalmasıyla lastik tozundaki polimer oranının azaldığını fakat dolgu (karbon siyahı, silika vs.) ve metal (Cu, Fe, Ni, Mn, Cr) miktarının artmış olduğunu gözlemlemişlerdir. En uygun tane boyutunun 160 µm ile 205 µm aralığı olduğunu bildirmişlerdir. Aynı çalışmada, termogravimetrik analiz (TGA) sonucunda tane boyutu daha büyük olan tozların katıldığı karışımda ayrışmanın daha fazla olduğu görülmüştür. Tane boyutu gibi kauçuk kompozitin özelliklerini etkileyen diğer bir faktör toza uygulanan yüzey işlemleridir. Li vd. [38] yaptıkları çalışmada 10, 30, 50 phr toz oranlarında üç farklı bileşim hazırlayarak şöyle bir çalışma yapmışlardır. I. bileşimde herhangi bir işlem yapmadan atık lastik tozu dolgu olarak NR içine katılmış, II. bileşimde devulkanize atık lastik tozu NR içine dolgu olarak katılmış, III. bileşimde ise atık lastik tozunu devulkanize ederek NR oranını azaltarak onun yerine kullanmışlardır. Çalışma sonuçlarında mekanik özelliklerin III. > II. > I. sıralaması ile değiştiğini görülmüştür. Ayrıca tarama elektron mikroskobu (SEM) ile yapılan içyapı incelemesinde matrisle en iyi uyumun III. bileşimde sağlandığı görülmüştür. Yaptıkları diğer çalışmada, kamyon sırt lastiğinden elde edilen maksimum tane boyutu 0.42 mm olan kauçuk tozunun, yüzeyi sıvı polimer katılarak aktive edilerek ve edilmeden, değişik oranlarda NR ve SBR 'ye ilave edilerek mekanik özelliklerin değişimi araştırılmıştır. Sonuçta, çekme dayanımının her iki kauçuk bileşiminde de düştüğü ancak yüzeyi aktive edilen kauçuk tozunun katıldığı bileşimde bu düşüşün daha az olduğu ifade edilmiştir. Burada, vulkanizasyon reaksiyonuyla, yüzeyi işlem görmüş kauçuk tozunun matrise bağlanmasında, tane ve matris arasındaki ara yüzeyde daha yüksek bir kararlılık görüldüğü sonucuna varılmıştır. İşlenmemiş kauçuk tozunun etkisinin ise inert bir dolgunun etkisiyle mukayese edilebileceği bildirilmiştir [35].

5 Sonuçlar

Atık lastik tozuna uygulanan yüzey işlemleri ve atık lastik tozunun orijinal kauçuk içine ve diğer polimerlere katılması konusunun literatür araştırmalarına dayanarak ele alındığı bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Atık kauçuk tozlarına, kauçuk veya diğer malzeme bileşimlerine katılmadan önce, yüzey işlemleri uygulanması tozun katıldığı matrisle uyumunu arttırmaktadır.
- Uygulanacak yüzey işleminin seçimi, atık kauçuk tozunun hangi malzeme bileşimine katılacağı ile yakından ilgilidir.
- Yüzey işlemleri sayesinde; atık kauçuk tozunun katıldığı malzeme bileşimlerinin özelliklerinde düşme oranının azalması ve aynı zamanda daha fazla atık kauçuk tozu katma imkânı elde edilebilmektedir.
- Atık lastiklerin geri dönüşümünde sürdürülebilir ve verimli bir yöntem henüz geliştirilemediği için, atık lastiklerin parçalanarak toz formunda orijinal kauçuk bileşimlerinde veya diğer polimer ve kompozit malzemelerde, malzemelerin performansını düşürmeden kullanılmasını sağlayacak çalışmalar, bu değerli atığın geri kazanımı için çok önemlidir ve geliştirilerek sürdürülmelidir.

Ayrıca konuyla ilgili ulusal literatürde çalışma olmadığı görülmüştür. Doğal kauçuk veya petrol üreticisi bir ülke olmadığımız için kendi kauçuk kaynaklarımıza sahip değiliz. Bu nedenle atık lastiklerin geri kazanımı konusunda ulusal ölçekte yapılacak her çalışma akademik olduğu kadar ülke ekonomisine de katkı sağlayacaktır. Bu araştırma ile konuya dikkat çekilmesi ve ilgili çalışmaların teşvik edilmesi amaçlanmıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

[1] K. Formela, Sustainable development of waste tires recycling Technologies - recent advances, challenges and future trends. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 4, 209-222, 2021. https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.06.004.

[2] E. Markl and M. Lackner, Devulcanization technologies for recycling of tire-derived rubber: a review, Materials, 13, 1246, 2020. http://dx.doi.org/10.3390/ma13051246

[3] V. Lapkovskis, V. Mironovs, A. Kasperovich, V. Myadelets and D. Goljandin, Crumb rubber as a secondary raw material from waste rubber: a short review of end-of-life mechanical processing methods. Recycling, 5, 32, 2020. https://doi.org/10.3390/recycling5040032

[4] B. Adhikari, D. De and S. Maiti, Reclamation and recycling of waste rubber. Progress in Polymer Science, 25, 909–948, 2000. https://doi.org/10.1016/S0079-6700(00)00020-4

[5] J. Karger-Kocsis, L. Mészáros and T. Bárány, Ground tyre rubber (GTR) in thermoplastics, thermosets, and rubbers. Journal of Materials Science, 48, 1-38, 2013. https://doi.org/10.1007/s10853-012-6564-2

[6] M. M. Phiri, M. J. Phiri, K. Formela and S. P. Hlangothi S. P., 2021. Chemical surface etching methods for ground tire rubber as sustainable approach for environmentally-friendly composites development - a review. Composites Part B, 204, 108429, 2021. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108429

[7] G. Lazorenko, A. Kasprzhitskii and V. Mischinenko, 2021. Rubberized geopolymer composites: Effect of filler surface treatment. Journal of Environmental Chemical Engineering, 9, 10560, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105601

[8] K. Klajn, T. Gozdek, D. M. Bielinski, M. Sicinski, M. Zarzecka-Napierała and Z. Pedzich, SBR vulcanizates

filled with modified ground tire rubber. Materials, 14, 3991, 2021. https://doi.org/10.3390/ma14143991

[9] J. Araujo-Morera, R. Verdugo-Manzanares, S. González, R. Verdejo, M. A. Lopez-Manchado and M. H. Santana, On the use of mechano-chemically modified ground tire rubber (GTR) as recycled and sustainable filler in styrene-butadiene rubber (SBR) composites. Journal of Composites Science, 5, 68, 2021. https://doi.org/10.3390/jcs5030068

[10] H. Savran, Elastomer Teknolojisi–I. Acar Matbaacılık, İstanbul, 2001.

[11] D. Dobrota, G. Dobrota and T. Dobrescu, Improvement of waste tyre recycling technology based on a new tyre markings. Journal of Cleaner Production, 2020, 121141. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121141

[12] ETRMA, The European tyre industry fast and figures 2020 edition, https://www.etrma.org/wp-content/uploads/2019/12/Figures-leaflet-updated-front-2019-larger-NEW-LABEL.pdf (Erişim tarihi: 08.01.2021).

[13] B. S. Thomas and R. C. Gupta, A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54, 1323–1333, 2016. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.092

[14] K. A. J. Dijkhuis, Recycling of vulcanized EPDM–rubber. Ph.D. Thesis, University of Twente, Enschede, Netherlands, 2008.

[15] P. Sutanto, Development of a Continuous Process for EPDM Devulcanization in an Extruder, Doctoral Thesis, Rıjksuniversiteit Groningen, Jakarta, Indonesie, 2006

[16] R. Marin, Evaluation of waste tire devulcanization technologies. CalRecovery Inc., California, 2004.

[17] S. K. De, A. I. Isayev and K. Khait, Rubber Recycling, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2005. https://doi.org/10.1201/9780203499337

[18] F. Karabörk ve A. Akdemir, Atık taşıt lastiklerinin parçalanması ve lastik tozunun karakterizasyonu. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 29, 1, 29-40, 2013.

[19] A. Hejna, A. Olszewski, L. Zedler, P. Kosmela and K. Formela, The impact of ground tire rubber oxidation with H_2O_2 and $KMnO_4$ on the structure and performance of flexible polyurethane/ground tire rubber composite foams. Materials, 14, 499, 2021. https://doi.org/10.3390/ma14030499

[20] H. Liu, X. Wang and D. Jia, Recycling of waste rubber powder by mechano-chemical modification. Journal of Cleaner Production, 1-10, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118716

[21] A. Fazli and D. Rodrigue, Recycling waste tires into ground tire rubber (GTR)/rubber compounds: a review. Journal of Composite Science, 1-43, 2020. https://doi.org/10.3390/jcs4030103

[22] X. Colom, F. Carrillo and J. Cañavate, Composites reinforced with reused tyres: Surface oxidant treatment to improve the interfacial compatibility. Composites: Part A, 38, 44–50, 2007. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.01.022

[23] A. A. Yehia, M. A. Mull, M. N. Ismail, Y. A. Hefny and E. M. Abdel-Bary, Effect of chemically modified waste rubber powder as a filler in natural rubber vulcanizates. Journal of Applied Polymer Science, 93, 30-36, 2004. https://doi.org/10.1002/app.20349

[24] R. Sonnier, E. Leroy, L. Clerc, A. Bergeret and J. M. Lopez-Cuesta, Polyethylene/ground tyre rubber blends: influence of particle morphology and oxidation on mechanical properties. Polymer Testing 26, 274–281, 2007. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2006.10.011

[25] S. Guo, Q. Dai, R. Si, X. Sun and C. Lu, Evaluation of properties and performance of rubber-modified concrete for recycling of waste scrap tire. Journal of Cleaner Production, 148, 681-689, 2017.

[26] A. M. Shanmugharaj, J. K. Kim and S. H. Ryu, Modification of rubber powder with peroxide and properties of polypropylene/rubber. Composites Journal of Applied Polymer Science, 104, 2237–2243, 2007. https://doi.org/10.1002/app.25521

[27] X. W. Cheng, D. Long, S. Huang, Z. Y. Li and X. Y. Guo, Time effectiveness of the low-temperature plasma surface modification of ground tire rubber powder. Journal of Adhesion Science and Technology, 29(13), 1330–1340, 2015. https://doi.org/10.1080/01694243.2015.1026958

[28] Z. Andong, L. Xiaolin, Z. Guangyu and Z. Liqun, Preparation of liquid desulfurized rubber by co-rotating twin screw extruder. Synthetic Rubber Industry, 39(1), 2016. https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1255.2016.01.018

[29] R. R. Tur, S. Pan, W. Shifeng, Thermal analysis on the interactions among asphalt modified with SBS and different degraded tire rubber. Construction and Building Materials, 182, 134-143, 2018. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.104

[30] A. A. Berlin, T. V. Dudareva and I. A. Krasotkina, Tire-rubber-waste recycling and active powder of discretely devulcanized rubber. Polymer Science, Series D, 11 (3), 323-329, 2018. https://doi.org/10.1134/S1995421218030024

[31] C. Jiang, Y. Zhanga, L. Mab, L. Zhouc and H. He, Tailoring the properties of ground tire rubber/high-density polyethylene blends by combining surface devulcanization and in-situ grafting technology. Materials Chemistry and Physics, 161-170, 2018. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.08.040

[32] R. Sonnier, E. Leroy, L. Clerc, A. Bergeret, J. M. Lopez-Cuesta, A. S. Bretelle and P. Ienny, Compatibilizing thermoplastic/ground tyre rubber powder blends: efficiency and limits. Polymer Testing, 27, 901–907, 2008. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2008.07.003

[33] M. Awang and H. Ismail, Preparation and characterization of polypropylene/waste tyre dust blends with addition of DCP and HVA-2 (PP/WTDP-

HVA2). Polymer Testing, 27(3), 321–329, 2008. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2007.12.001

[34] A. Tolstov, O. Grigoryeva, A. Fainleib, I Danilenko, A. Spanoudaki, P. Pissis and J. Grenet, Reactive compatibilization of polyethylene/ground tire rubber inhomogeneous blends via interactions of pre-functionalized polymers in interface. Macromolecular Symposia, 254, 226–232, 2007. https://doi.org/10.1002/masy.200750834

[35] A. I. Isayev, Recycling of Rubbers. Science and Technology of Rubber, Elsevier Inc., Third Edition, 663–701, Waltham, 2005.

[36] L. E. Julian, Recycling of ground tyre rubber and polyolefin wastes by producing thermoplastic elastomers. Ph.D. Thesis, Kaiserslautern Technical University, Germany, 2005.

[37] A. K. Naskar, S. K. De and A. K. Bhowmick, Characterization of ground rubber tyre and its effect on natural rubber compound. Rubber Chemistry and Technology, 73(5), 902–911, 2000. https://doi.org/10.5254/1.3547628

[38] S. Li, J. Lamminmaki and K. Hanhi, Effect of ground rubber powder and devulcanizates on the properties of natural rubber compounds. Journal of Applied Polymer Science, 97, 208–217, 2005. https://doi.org/10.1002/app.21748

[39] S. H. Lee, X. D. Zhang, D. Xu, D. Chung, G. J. Oh and J. K. Kim, Dynamic reaction involving surface modified waste ground rubber tire powder/polypropylene. Polymer Engineering and Science, 168-176, 2009. https://doi.org/10.1002/pen.21236

[40] K. F. Abo Elenien, A. Abdel-Wahab, R. ElGamsy and M. H. Abdellatif, Assessment of the properties of PP composite with addition of recycled tire rubber. Ain Shams Engineering Journal, 9, 3271-3276, 2018. https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.05.001

[41] X. Zhang, X. Zhu, M. Liang and C. Lu, Improvement of the properties of ground tire rubber (GTR)-filled nitrile rubber vulcanizates through plasma surface modification of GTR powder. Wiley Periodicals Inc. Journal of Applied Polymer Science, 114, 1118-1125, 2009. https://doi.org/10.1002/app.30626

[42] J. Cañavate, X. Colom, M. R. Saeb M, M. Przybysz, L. Zedler and K. Formela, Influence of microwave treatment conditions of GTR on physico-mechanical and structural properties of NBR/NR/GTR composites. Afinidad: revista de química teórica y aplicada, 76, 587, 171-179, 2019.

[43] X. Colom, M. Marın-Genesca, R. Mujal, K. Formela K., and J. Canavate, Structural and physico-mechanical properties of natural rubber/GTR composites devulcanized by microwaves: Influence of GTR source and irradiation time. Journal of Composite Materials, 52(22), 3099–3108, 2018. https://doi.org/10.1177/0021998318761554

[44] T. Yasin, S. Khan, M. Shafiq and R. Gill, Radiation crosslinking of styrene–butadiene rubber containing waste tire rubber and polyfunctional monomers. Radiation Physics and Chemistry, 106, 343-347, 2015. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2014.08.017

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 385-392

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Derleme makalesi / Review article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Türkiye'de yetişen ticari değere sahip kekik türlerine ait uçucu yağ bileşenlerinin GC-MS yöntemiyle karakterizasyonu

Characterization of essential oil components of commercially valuable thyme species grown in Turkey by GC-MS method

Emine Nakilcioğlu [1], Harun Reşit Özdal [2,*]

[1] *Ege Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 35040, İzmir Türkiye*
[2] *Ege Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, 35660, İzmir, Türkiye*

Öz

Kekik dünyanın ılıman iklim bölgelerinde yetişen çok yıllık bir bitkidir. Antik çağlardan günümüze tıbbi amaçlarla kullanılmış olan bitkinin uçucu yağları onun hem antimikrobiyal hem de antioksidan özelliklerinden sorumludur. Uçucu bileşenlerin kompozisyonu türden türe farklılık göstermekte ve bu farklılıklar her tür için de spesifik tat ve koku oluşturmaktadır. Uçucu yağların karakterizasyonunda GC-MS yöntemi sıklıkla kullanılmakta olup kullanılan kolon tipine ve uzunluğuna, fırın sıcaklık programına, taşıyıcı gazın özelliklerine göre metodun modifikasyonu gerekmektedir. Uçucu yağ bileşenlerinin farklı buharlaşma noktalarına sahip olması beraberinde farklı fırın sıcaklık programları kullanımını gerekli hale getirmiştir. Yapılan bazı çalışmalarda polariteleri farklı kolonlarda aynı numunenin uçucu yağ bileşenleri incelenmiş ve tespit edilen bileşenlerin sayılarında değişiklik olduğu tespit edilmiştir. Uçucu yağ bileşenlerinin konsantrasyonu kekiğin hasat mevsimine, yetiştiği yörenin coğrafi ve iklimsel özelliklerine göre değişim göstermesine rağmen türler arasındaki dominant uçucu yağ bileşenlerinin benzer olduğu birçok çalışmada ortaya konmuştur.

Anahtar kelimeler: Kekik, Uçucu yağlar, GC-MS

Abstract

Thyme is a perennial herb that grows in temperate climatic regions of the world. The essential oils of the plant, which has been used for medicinal purposes since ancient times, are responsible for both its antimicrobial and antioxidant properties. The composition of volatile components differs from species to species, and these differences create specific taste and odor for each species. The GC-MS method is frequently used in the characterization of essential oils, and the method needs to be modified according to the column type and length used, the furnace temperature program, and the characteristics of the carrier gas. The fact that the essential oil components have different evaporation points has necessitated the use of different furnace temperature programs. In some studies, the essential oil components of the same sample were examined in columns with different polarities and it was determined that there was a change in the number of the detected components. Although the concentration of essential oil components varies according to the harvest season of thyme, the geographical and climatic characteristics of the region where it grows, it has been revealed in many studies that the dominant essential oil components among the species are similar.

Keywords: Thyme, Essential oils, GC-MS

1 Giriş

Türkiye 42° kuzey 36° güney enlemleri arasında, bölgesel olarak akdeniz, karasal ve okyanus ikliminin hâkim olduğu üç tarafı denizlerle kaplı bir ülkedir [1]. Bu iklim çeşitliliği beraberinde Türkiye'de doğal olarak yetişen 12.000'den fazla bitki taksonu getirmiştir. Bunlardan 3649'u endemiktir [2]. Floranın 1/3'ünü (3000 kadarını) tıbbi ve aromatik bitkiler oluşturur [3]. Bu tıbbi aromatik bitkiler arasında kekik ülkemizde 45 cins yayılımı ile 6., 550 tür ile 3. büyük familyadır [4].

Kekik, *Lamiaceae* familyasına dahil yeşilimsi gri aromatik yaprakları olan çok yıllık bir bitkidir. Güney Avrupa ve Akdeniz'e kıyısı olan ülkelerin doğal florasında bulunur; ancak şimdi dünyanın ılıman iklime sahip birçok bölgesine yayılmıştır [5]. Lezzet profilleri çeşitlerine göre farklılık gösteren bitkinin uçucu yağ bileşenleri ticari olarak sakız, şekerleme ve dondurma üretiminde aroma verici olarak kullanılırken, uçucu yağlarının temel bileşenlerinden biri olan timol; parfümeriden kozmetik sanayiye, ilaç sanayinden yem katkı maddeleri üretimine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir [6]. Kekiğin ve ihtiva ettiği uçucu yağ bileşenlerinden özellikle timol ve karvakrolün antioksidan, antienflamatuvar etkisi ile solunum sistemi ve nöral sistem üzerinde olumlu sağlık etkileri olduğu bilinmektedir [7].

Lamiaceae familyasının en önemli üyelerinden biri olan kekik ülkemizde ticarete konu olacak miktarda üretimi gerçekleşen *Thymus, Origanum, Satureja, Tymbra* ve *Coridothymus* olmak üzere 5 cins ile yayılım göstermektedir [8].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: harunresit.ozdal@tarimorman.gov.tr (H. R. Özdal)
Geliş / Recieved: 25.07.2023 Kabul / Accepted: 09.10.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1332531

2 Sağlık üzerine etkileri

Kekik yağı fesleğen, biberiye, lavanta, papatya, adaçayı, okaliptüs, tarçın ve karanfil yağlarıyla karşılaştırıldığında daha güçlü antioksidan aktiviteye sahip olduğu ve lipit oksidasyonunu inhibe etmekte çok daha etkili olduğu görülmüştür [9].

Kekik ekstraktları, antiseptik, antispazmodik, antitüssif antimikrobiyal, antifungal, antioksidatif ve antiviral özellikleri sayesinde astım ve bronşit gibi çeşitli solunum yolu hastalıklarının tedavisinde ve diğer patojenlerin sebep olduğu hastalıkların tedavisinde geleneksel tıpta kullanılmaktadır [10, 11].

Kekik uçucu yağının ana bileşeni olan timol, *Salmonella* ve *Staphylococcus* bakterilerine karşı etkilidir. Kekiğin antiseptik özelliği onu, kronik mantar enfeksiyonlarında bağışıklık sistemi için yararlı bir tonik yaparken, bronşit, boğmaca ve plörezi gibi göğüs enfeksiyonları için etkili bir ilaç haline getirmektedir [12].

3 Uçucu yağların gıda endüstrisinde kullanımı

Bitkiler ürettikleri fitokimyasallarla kendilerini bakterilerden, virüslerden ve mantarlardan korurlar. Üretilen bu fitokimyasallar gıdalara eklendiklerinde gıdaları mikrobiyal ve oksidatif bozulmadan korur [13]. Yapılan son çalışmaların yapay gıda katkı maddelerinin olası yan etkileri üzerine ışık tutması, doğal koruyucuların gıdalarda kullanımına olan ilgiyi artırmıştır [14].

Et ve et ürünlerinde lipit oksidasyonunu inhibe etmek için doğal antioksidanlarla yapılan çalışmalar son yıllarda giderek artmaktadır. Araştırmalar kekik ve biberiye bitkilerinin kayda değer bir antioksidan aktivite gösterdiğini ortaya çıkarmaktadır [15].

Uçucu yağlar ihtiva ettikleri zengin fenolik bileşenler sayesinde mikroorganizmaların sebep olduğu bozulmalara karşı etkilidirler. Çalışmalar kekik uçucu yağlarının mikroorganizmaların çoğalmasını kontrol altına almak için ve gıdalarda doğal olarak antimikrobiyal etki yaratmak için kullanılabileceğini göstermektedir [16]. Ayrıca yüksek yağ oranına sahip, oksidasyona duyarlı gıdaların paketlenmesinde gıdanın raf ömrünü uzatmak için aktif ambalajların üretiminde kekik yağının kullanıldığı araştırmalar vardır [17].

4 Uçucu yağların eldesi

Birçok çalışma, kekiğin biyoaktif bileşenler açısından zengin bir kaynak olduğunu göstermektedir. Kekik yağının fenolik bileşenleri arasında timol ve karvakrol bulunur. Timol kekiğe karakteristik kokusunu verir. Menşe yerine ve kekiğin türüne, hasat mevsimine, kurutma tekniğine, ekstraksiyon yöntemine bağlı olarak kekik uçucu yağının fenolik içeriği değişmektedir [18, 19].

Kekik %1 ile %2.5 oranlarında uçucu yağ içerir. Kekiğin kokusu ve aromasından da bu bileşenler sorumludur [20]. Genel anlamda kekik türlerinin uçucu yağ bileşenlerinde baskın olan bileşenin timol ve karvakrol olduğu görülmektedir. Ayrıca kekik uçucu yağları linalool, α-terpineol, camphor, caryophyllene ve γ-terpinene gibi birçok monoterpen fenol ihtiva etmektedir [21]. Ayrıca kekiğin methanolik ekstraktında quercetin-7-O-glucoside gibi flavonollar, carnosic, rosmarinic, p-coumaric, caffeic, cinnamic, ferulic, caffeoylquinic ve quinic asit gibi fenolik asitler, flavononlar (naringenin) ve flavonlar tespit edilmiştir [22]. Uçucu yağlar, kekik yapraklarından geleneksel olarak buhar distilasyonu, hidrolizasyon ve maserasyon yöntemleri kullanılarak elde edilir. Bu ekstraksiyon yöntemleri uzun ekstraksiyon süresi, ekstraksiyon veriminin düşüklüğü ve sıcaklığa duyarlı maddelerin ekstraksiyonunda sorun yaratmaktadır [23]. Uçucu yağların eldesinde geleneksel yöntemlere alternatif birçok ekstraksiyon metodu geliştirilmiştir. Ultrason destekli ekstraksiyon (UDE), mikrodalga destekli ekstraksiyon (MDE), enzim destekli ekstraksiyon (EDE), basınçlı çözgen ekstraksiyonu (BÇE), süperkritik akışkan ekstraksiyonu (SAE), sıcaklık destekli ekstraksiyon (SDE), ohmik destekli ekstraksiyon (ODE), ultrason destekli hidrolizasyon (UDH) gibi ekstraksiyon metotlarının uçucu yağ eldesinde kullanımı ve ekstraksiyon metotlarının optimizasyonu üzerine bir çok çalışma bulunmaktadır [14, 23–27].

Tablo 1. Kekiğin 2018-2022 yılları arasında ekim alanı, üretim miktarı ve ihracat verileri [28]

Yıl	Ekim Alanı (Dekar)	Üretim (Ton)	İhracat (Dolar) (Ezilmemiş/öğütülmemiş)	İhracat (Dolar) (Ezilmiş/öğütülmüş)
2018	139 061	15 895	17527248	42664063
2019	157 074	17 965	15810306	41828656
2020	184 711	23 866	16945615	48696257
2021	199 573	21 174	17822983	51619736
2022	218 330	44 358	13522424	47629626

Tablo 2. Kekikte bulunan bazı kimyasal bileşenler ve etkileri [29]

Kimyasal bileşen	Biyolojik aktivite
Timol	Antiseptik, antibakteriyel, antifungal ve antioksidan özellikler
Karvakrol	Antimikrobiyal, antitrombotik, anti-inflamatuar, asetil kolinesteraz inhibitör
Linalool	Antiviral etki, anti-inflamatuar, antioksidan, analjezik aktivite
Apigenin	Anti-karsinojenik, anti-inflamatuar, anti-progresyon, antiviral ve antioksidan aktivite
Eugenol	Nöroprotektive, antikanser, antibakteriyel, antianafilaktik aktivite
Rosmarinik asit	Antialerjik, antimutajen, antioksidatif, anti-inflamatuar

5 Uçucu yağların karakterizasyonu

Kurutulmuş *Origanum vulgare* subsp. *hirtum*'dan uçucu yağları elde etmek için Clevenger aparatı ile Nikolova ve ark. [30] ekstraksiyon yapmış ve uçucu yağları GC/MS yöntemi ile karakterize etmişlerdir. Kolon olarak HP-5MS kapiler kolon (30m×0.25mm iç çap (i.ç.), 0.25µm film kalınlı (f.k.)) kullanmışlardır. Kromatografi şartları: Enjeksiyon ünitesi sıcaklığı 220 ºC, enjeksiyon hacmi 1 µL ve split oranı 1:50, taşıyıcı gaz helyum (1mL/dk akış hızında), kolon sıcaklığı 60 ºC'de 10 dk sabit sonra programlı bir şekilde dakikada 3 ºC artarak 200 ºC getirilerek 10 dakika bu sıcaklıkta kalacak şekilde düzenlenmiştir. Önemli MS parametreleri ise; interface (arayüz) sıcaklığı 240 ºC, iyonlaşma voltajı 70 eV, tarama yapılan kütle aralığı 40-400 m/z, örnekleme oranı 1 scan/s olarak belirlenmiştir. Karvakrol (%86.4), p-cymene (%5.98), γ-terpinene (%4.24) ve β-pinene (%1.58) ana uçucu yağ bileşenleri olarak tespit edilmiştir.

Sarikurkcu ve ark. [31] kurutulmuş *O. vulgare* subsp. *(*subsp *vulgare ve* subsp *hirtum)* ile Clevenger aparatını kullanarak yaptıkları ekstraksiyonda, uçucu yağ bileşenlerini ayırmış ve uçucu yağları GC/FID ve GC/MS ile karakterize etmişlerdir. Kolon olarak HP-Innowax FSC (60×0.25mm i.ç., 0.25µm film f.k.) kolon, taşıyıcı gaz olarak 1.2 mL/dk akış hızında helyum (%99.99 saflıkta) kullanmışlardır. GC fırın sıcaklığı 60 ºC'de 10 dk sabit, sonra dakikada 4 ºC artarak 220 ºC'ye ulaşmış ve bu sıcaklıkta 10 dakika sabit tutulmasının ardından dakikada 1 ºC artışla 240 ºC' ye gelecek şekilde programlanmıştır. Enjeksiyon portunun sıcaklığı 250 ºC olarak ayarlamış ve spit oranını 1:40, örnek hacmini ise 1 µL olarak belirlemişlerdir. İyonizasyon voltajı 70 eV, kütle aralığı 35-40 m/z olarak seçilmiştir. Timol (58.31%), karvakrol (16.11%), p-cymene (13.45%) ve γ - terpinene (4.64%) *O. vulgare* subsp. *vulgare* için uçucu yağ bileşenleri arasında majör bileşenler olarak bulunmuştur. *O. vulgare* L. *hirtum* için %96.31 oranla linalool ve %1.27 oranla β- caryophyllene ana bileşen olarak belirlenmiştir.

Kurutulmuş *Coridothymus capitatus* ile Clevenger aparatını kullanarak yaptıkları ekstraksiyonda Fancello ve ark. [32], bitkinin uçucu yağ bileşenlerini GC/MS ile karakterize etmişlerdir. Kolon olarak HP-5MS (%5 fenil metil siloksan, 30m×0.25mm i.ç.,0.25µm f.k.) ve polar fused-silica HP İnnowax (polietilen glikol, 50 m*0.20 mm i.ç., 0.20 µm f.k.) kapiler kolon, taşıyıcı gaz olarak dakikada 0.8 mL akış hızına sahip helyum kullanılmıştır. Fırın sıcaklığı başlangıçta 35 ºC, dakikada 5 ºC artarak 85 ºC (bu sıcaklıkta 20 dakika sabit) son olarak dakikada 10 ºC artarak 300 ºC (5 dakika sabit) olacak şekilde programlanmıştır. Enjeksiyon ünitesinin sıcaklığı 250 ºC ve dedektör sıcaklığı 310 ºC olarak ayarlanmıştır. 1:100 oranında (v/v) seyreltilmiş 1 µL örnek splitless olarak enjekte edilmiştir. İyonlaşma voltajı olarak 70 eV, kütle aralığı 50- 400 amu (full scan mode) olarak belirlenmiştir. Tanımlanan uçucu yağ ana bileşenleri karvakrol (%48.3), timol (%22.4), γ-terpinene (%7.1), *p*-cymene (%6.5) olarak bulunmuştur.

Spagnoletti ve ark. [33] *C. capitatus* uçucu yağ bileşenlerini GC/MS ile karakterize ettikleri çalışmada, Restek Rxi-5Sil MS (30m×0.25mm i.ç., 0.25µm f.k., 95% difenil, 5% dimetil polisiloksan) apolar kapiler kolon kullanmışlardır. Örnekler n-hekzan ile 1:100 oranında seyreltilmiş, split enjeksiyon ile (1:50) 260 ºC sıcaklığa ayarlanmış enjeksiyon ünitesinden kolona verilmiştir. Taşıyıcı gaz olarak akış hızı dakikada 1 mL helyum (49 kPa) kullanmışlardır. Fırın sıcaklığı 50 ºC' den (5 dakika sabit) dakikada 5 ºC artarak 200 ºC' ye ulaşacak şekilde programlanmıştır. Örnek analizleri ayrıca Restek Stabilwax (60 m x 0.25 mm i.ç., 0.25 µm f.k., polietilen glikol) polar kapiler kolon ile tekrarlanmıştır. Kullandıkları polar kolonda taşıyıcı gaz olarak helyumdan (akış hızını dakikada 1.9 mL) faydalanılmış ve fırın sıcaklığı 50 ºC' den (5 dakika sabit) 260 ºC'ye kadar dakikada 5 ºC artırılarak final sıcaklığında 10 dakika sabit kalacak şekilde programlanmıştır. Kuadrapol kütle spektrometresi ile donatılmış sistemde bileşenler, alıkonma sürelerine (Rİ) ve kütle yük oranlarına (m/z) göre tanımlanmıştır. Tanımlanan uçucu yağ ana bileşenleri karvakrol (%69.9), p-cymene (%14.5), α-thujene (%1.3), α-pinene (%1.1)'dir.

Guerra-Boone ve ark. [34] yaptıkları çalışmada taze *Origanum majorana* L. bitkisinin gövdesi ile Clevenger aparatını kullanarak ekstraksiyon yapmış ve elde edilen uçucu yağı GC/MS ile karakterize etmişlerdir. Kolon olarak HP-5MS kapiler kolon (30m×0.25mm i.ç., 0.25µm f.k.), taşıyıcı gaz olarak 0.5 mL/dk helyum gazı kullanmışlardır.

Enjeksiyon ünitesi sıcaklığı 260 ºC'de ayarlanmış, 2µL örnek splitless olarak kolona verilmiştir. GC fırın sıcaklığı 9 dakika 35 ºC sabit tutulduktan sonra dakikada 3 ºC artarak 150 ºC sıcaklığa (10 dakika sabit) ulaşmış ve daha sonra dakika 10 ºC artarak önce 250 ºC ve akabinde dakika 3 ºC artarak 270 ºC sıcaklığa (10 dakika sabit) ulaşacak şekilde programlanmıştır. İyonlaşma voltajı 70 eV, iyon kaynağı sıcaklığı 230 ºC, kuadrapol kütle spektrometresi sıcaklığı 150 ºC olacak şekilde çalışılmıştır. Bileşenlerin tanımlanmasında Rİ değerleri ve MS spektraları kullanılmıştır. Uçucu yağ bileşenleri arasında majör bileşen %23.1 terpinen-4-ol, %16.3 timol olarak bulunmuştur.

Hadef ve ark. [35] gerçekleştirdikleri çalışmada, çiçeklenme evresindeki *O. majorana* L. bitkisinin kurutulmuş yapraklarından Clevenger aparatını kullanarak ekstraksiyon yapmış ve elde ettikleri uçucu yağın bileşenlerini GC/MS ile karakterize etmişlerdir. Kolon olarak HP-5MSTM (30m×0.25mm i.ç., 0.25µm f.k.) apolar kapiler kolon kullanmışlardır. Taşıyıcı gaz olarak helyumdan (1 mL/ akış hızı) faydalanılmış, enjeksiyon hacmi 0.1 µL ve split oranı 1:20, enjeksiyon ünitesi sıcaklığı 250 ºC olarak ayarlanmıştır. Fırın sıcaklığı 60 ºC' den 280 ºC' e dakikada 2 ºC artacak şekilde programlanmıştır. İyonlaşma voltajı 70 eV olarak belirlenmiş, bileşenler Rİ ve m/z değerlerine göre tanımlanmıştır. Tanımlanan uçucu yağ bileşenlerinden p-menth-1-en-4-ol, (R) %21'lik oran ile majör bileşen olarak bulunmuş, onu τ-terpinene (%19), α-terpinene (%15) takip etmiştir.

Thymbra spicata var. *spicata*, gövde, yaprak ve çiçekleri kullanılmak sureti ile İngiliz tipi Clevenger aparatı kullanılarak Kirkan ve ark. [36] tarafından uçucu yağ bileşenlerini ayırmak için ekstraksiyona tabi tutulmuştur. Uçucu yağların tanımlanması hem GC-FID hem de GC/MS ile yapılmıştır. 1 µL örnek 250 ºC sıcaklıktaki enjeksiyon portuna, 1:40 split oranı ile kolona verilmiştir. HP-Innowax FSC (60m×0.25 mm i.ç., 0.25µm film f.k.) kolon, taşıyıcı gaz olarak 1.2 mL/dk akış hızında helyum ve başlangıç sıcaklığı 60 ºC olan (10 dk sabit), daha sonra dakikada 4 ºC artarak 220 ºC'ye ulaşan (bu sıcaklıkta 10 dk sabit) programlı bir fırın sıcaklığı kullanmışlardır. MS tarafında ise iyonizasyon voltajını 70 eV, kütle aralığını 35-40 m/z olarak ayarlamışlardır. Çalışmanın sonucunda *T. spicata*'ya ait uçucu yağ bileşenleri arasında baskın bileşenlerin karvakrol (63.23%), γ-terpinene (18.94%), ve p-cymene (8.31%) olduğu görülmüştür.

T. spicata ile Clevenger aparatını kullanarak Arani ve ark. [37] ekstraksiyon yapmış, bitkinin çiçeklenme evresi ile çiçeklenme öncesi evresi arasında uçucu yağ bileşenleri bakımından fark bulunup bulunmadığını uçucu yağ bileşenlerini GC/FID ve GC/MS ile karakterize ederek araştırmışlardır. GC/FID şartları: Enjeksiyon ünitesi ve dedektör sıcaklığı olarak sırasıyla 250 ºC ve 300 ºC olarak ayarlanmıştır. BPX-5 kapiler kolon (30m×0.25mm i.ç.; 0.25µm f.k.) ve taşıyıcı gaz olarak 1.1 mL/dk akış hızında azot kullanılmıştır. Fırın sıcaklığı programlaması dakikada 4 ºC artarak 60 ºC'den 250 ºC'ye gelecek ve bu sıcaklıkta 10 dakika kalacak şekilde yapılmış, split enjeksyion (1:50) ile numune kolona verilmiştir. GC şartlarında taşıyıcı gaz olarak azot yerine helyumun kullanıldığı GC/MS analizinde, iyonizasyon voltajı 70 eV, iyon kaynağı ile interface sıcaklığı sırasıyla 200 ºC ve 250 ºC, kütle aralığı 35-450 amu olarak ayarlanmıştır. Yapılan çalışmada γ-terpinene (15.5%) ve karvakrol (79.3%) uçucu yağların içinde majör bileşen olarak bulunmuştur.

Thymus vulgaris bitkisinin uçucu yağ bileşenlerinin eldesi için Borugă ve ark. [38], Clevenger aparatını kullanarak ekstraksiyon yapmış, elde edilen uçucu yağı ise GC/MS ile karakterize etmişlerdir. Factor Four VF-35ms kapiler kolon (%5 fenil-metilpolisiloksan, 30m×0.25mm i.ç., 0.25µm f.k.) ve 1 mL/dk akış hızında helyum kullanmışlardır. Enjeksiyon ünitesi sıcaklığı 250 ºC olarak ayarlanmış, fırın sıcaklığı dakikada 40 ºC artarak 50 ºC'den 250 ºC'ye gelip bu sıcaklıkta kalacak şekilde programlanmıştır. MS şartları, iyonizasyon voltajı 70 eV, kuadropol sıcaklığı 100 ºC, tarama hızı 1.6 scan/s, kütle aralığı 40-500 amu olarak girilmiştir. Yapılan çalışmada elde edilen uçucu yağda p-cymene (%8.41), γ-terpinene (%30.90) ve timol (%47.59)'ün baskın olarak bulunduğu tespit edilmiştir.

Uçucu yağ bileşenlerinin karakterizasyonu üzerine çalışan Khan ve ark. [39], *T. vulgaris* bitkisinden su distilasyonu metodu ile Clevenger aparatını kullanarak bitkinin uçucu yağlarını ayırmışlardır. DB-5 kapiler (30m×0.25mm i.ç., 0.25µm f.k.) kolonun kullanıldığı çalışmada, fırın sıcaklık programlaması 60 ºC'den 230 ºC'ye 5 ºC/dk'lık artışla değişecek şekilde yapılmıştır. Taşıyıcı gaz olarak 1.5 mL/dk akış hızında helyum kullanılmıştır. Enjeksiyon hacmi 3 µL ve split oranı 1:60 olarak belirlenmiştir. İyonlaşma voltajı 75 eV, interface sıcaklığı 230 ºC, kütle aralığı 30-655 amu olarak ayarlanmıştır. Çalışmanın sonucunda 5 farklı uçucu yağ bileşeninin yüksek oranda bulunduğu (timol (%60.55), γ-terpinene (%9.48), p-cymene (%8.53), karvakrol (%3.35), terpinolene (%3.15) gözlemlenmiştir.

Gerçekleştirilen diğer bir çalışmada [40] *Satureja montana* L. bitkisinin uçucu yağ bileşenlerini GC/MS ile karakterize etmişlerdir. Uçucu yağların eldesi için Clevenger aparatını kullandıkları çalışmada, GC şartlarını; enjeksiyon ünitesi sıcaklığı 250 ºC, split oranı 1:40, taşıyıcı gaz 1 mL/dk akış hızında helyum olacak şekilde ayarlamışlardır. Örnekler HP-5MS (30m×0.25mm i.ç., 0.25 µm f.k.) kapiler kolona, fırın sıcaklık programlaması (40 ºC'den dakikada 5 ºC artacak şekilde 200 ºC'ye gelir ve bu sıcaklıkta 60 dakika kalır) olacak şekilde verilmiştir. MS şartları ise iyonizasyon voltajı 70 eV, kaynak sıcaklığı (source temperature) 230 ºC, kuadropol sıcaklığı 150 ºC, kütle aralığı 50-350 amu olarak ayarlanmıştır. Çalışma sonucunda karvakrol (%29), timol (%16.5), linalool (%16.4), γ-terpinen (%15), p-cymene (%12.3) ve eucalyptol (%6.8) en yoğun bulunan uçucu yağ bileşenleri olarak bulunmuştur.

Buhar distilasyonu ile uçucu yağları elde edilen *S. montana* L. bitkisinin uçucu yağ karakterizasyonu Čopra-Janićijević ve ark. [41] tarafından GC/MS ile yapılmıştır. Kromatografik ayrım için polariteleri farklı iki kolon (PE-5, 5% fenil metil siloksan ve HP-20M, polietilen glikol) kullanılmış, PE-5 (30m×0.25mm i.ç., 1µm f.k.) kapiler kolon için fırın sıcaklığı dakikada 10 ºC artarak 55 ºC'den 140 ºC'ye sonrasında dakikada 10 ºC artarak 245 ºC sıcaklığa

gelecek şekilde programlanmıştır. Helyum taşıyıcı gaz olarak (1.1 mL/dk) kullanılmış, enjeksiyon ünitesi sıcaklığı 240 ºC, dedektör sıcaklığı 280 ºC, örnek miktarı 1 µL olarak ayarlanmıştır. Elekron iyonlaşma voltajı 70 eV,, kütle aralığı 20-555 amu, tarama hızı saniyede 1.6 scan olarak cihaza girilmiştir. HP-20M (50 m x 0.2 mm i.ç., 0.2 µm f.k.) kapiler kolon için taşıyıcı gaz olarak 1 mL/dk akış hızında helyum, 70 ºC 4 dakika sabit, sonra dakikada 4 ºC artarak 180 ºC sıcaklığa çıkıp 10 dakika sabit kalacak şekilde fırın sıcaklık programı kullanılmıştır. Enjeksiyon ünitesi sıcaklığı 250 ºC, dedektör sıcaklığı 280 ºC, iyonlaşma voltajı 70 eV olarak ayarlanmıştır. Linalool (%38.7) en yoğun bulunan uçucu yağ olarak tespit edilmiş, onu α-terpineol (%14.7) takip etmiştir. Uçucu yağların GC-MS ile karakterizasyonunu konu alan diğer çalışmalar Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Kekin uçucu yağlarının karakterizasyonu

Tür	Enjeksiyon modu/ miktarı /ünite sıcaklığı	Taşıyıcı gaz ve akış hızı	Kolon	Fırın sıcaklık programı	Dedektör (Taranan kütle aralığı)	Tespit edilen baskın uçucu yağ	Kaynak
Tymus x citriodorus L.	Split (1:40) 1 µL 250 ºC	Helyum 0.8 mL/dk	HP İnnowax kapiler kolon	Başlangıç sıcaklığı 60 ºC (10 dk sbt) 20 ºC/dk artış ile 250 ºC gelir.	MS (35-450 amu)	36 uçucu yağ bileşeni tespit edilmiş, bunlardan %68'i geraniol, neral, karvakrol ve nerol olarak tespit edilmiştir.	[42]
T. x citriodorus L.	Split (1:20) 1 µL 250 ºC	Helyum	HP-88 kapiler kolon	Başlangıç sıcaklığı 70 ºC (1 dk sbt) 10 ºC /dk artış ile 250 ºC gelir.	MS (35-400 amu)	Terpinolene (%71), α-terpineol, linalool, bornyl acetate ve borneol ana bileşenler olarak tespit edilmiştir.	[43]
Origanum minutiflorum	Split 0.4 µL 250 ºC	Helyum	Restek Rxi-5 Sil MS	Başlangıç sıcaklığı 180-240 ºC (20 ºC /dk artış) 240 ºC (20 dk sabit)	MS	64 uçucu yağ bileşeni tespit edilmiş olup, karvakrol (%64.29) ve p-cymene (%9.56) ana uçucu yağ bileşeni olarak tanımlanmıştır.	[44]
O. minutiflorum	Split (1:50) 1 µL 250 ºC	Helyum 1 mL/dk	HP İnnowax kapiler kolon	Başlangıç sıcaklığı 60 ºC (10 dk sbt) 20 ºC /dk artış ile 250 ºC gelir.	MS (35-400 amu)	Baskın uçucu yağ bileşenleri karvakrol (%62.60-86.40), p-cymene (%4.29-8.07), γ-terpinene (%1.72–5.12) ve borneol (%0.27–5.33) olarak tespit edilmiştir.	[45]
Origanum onites L.	Split (1:100) 0.1 µL 250 ºC	Helyum 1 mL/dk	HP-1 MS kapiler kolon	Başlangıç sıcaklığı 50 ºC (1 dk sbt) 2.5 ºC /dk artış ile 160 ºC (20 dk sabit) 5 ºC /dk artış ile 250 ºC (15 dk sabit)	MS	Tanımlanan ana bileşenler karvakrol (%47.99), terp-1-in-4-ol (%6.79), sabinene hydrate (%6.14), γ-terpinene (%5.20), p-cymene (%3.85) ve α-terpineol (%3.76)	[46]
O. onites L.	Split (1:50) - 250 ºC	Helyum 0.8 mL/dk	HP İnnovax FSC kapiler kolon	Başlangıç sıcaklığı 60 ºC (10 dk sbt) 4 ºC /dk artış ile 220 ºC (10 dk sabit) 1 ºC /dk artış ile 240 ºC	MS (35-425 amu)	Çalışmada %76.8-79.2 ile karvakrol ve %4.4-4.7 ile timol ana bileşenler olarak tespit edilmiştir.	[47]
Satureja spicigera ve *Satureja hortensis*	- - 250 ºC	Helyum 1.08 mL/dk	DB-1 FSC kapiler kolon	Başlangıç sıcaklığı 60 ºC 4 ºC /dk artış ile 250 ºC (1 dk sabit)	FID/MS	S.hortensis için karvakrol (%48), g-terpinene (%24.2), p-cymene (%11.7) S.spicigera için, timol (%29.5), p-cymene (%23.4), g-terpinene (%23.4), karvakrol (%9.6) ve karvakrol metil eter (%8.5) ana bileşenler olarak tespit edilmiştir.	[48]
S. spicigera	Splitless 10 µL 200 ºC	Helyum 1.5 mL/dk	SGE-BPX5 MS kapiler kolon	Başlangıç sıcaklığı 50 ºC 5 ºC /dk artış ile 150 ºC (15 dk sabit) 5 ºC /dk artış ile 250 ºC (10 dk sabit)	MS	Majör bileşenler karvakrol (%32.14), timol (%20.01), γ-terpinene (17.05%), p-cymene (9.08%), karvakrol metil eter (5.70%), terpinen-4-ol (2.02%), β-bisabolene (%2.19)	[49]
Origanum syriacum L.	Split (1:40) - 225 ºC	Helyum 1 mL/dk	Teknokroma TR-CN100 kapiler kolon	Başlangıç sıcaklığı 60 ºC (1 dk sabit) 4 oC/dk artış ile 140 ºC 3 ºC /dk artış ile 235 ºC (15 dk sabit)	MS (35-450 amu)	Majör bileşen olarak bitkinin gövde (%66.99), yaprak (%61.62) ve çiçeklerinde (%59.53) karvakrol tespit edilmiştir.	[50]

6 Sonuç

Kekik uçucu yağlarının bileşimi bitkinin türüne, yetiştiği bölgenin iklimine, bitkinin hasat mevsimine, bitkinin çiçeklenme öncesi mi çiçeklenme sonrası mı hasat edildiğine, ekstraksiyon metoduna ve daha birçok faktöre bağlı olarak değişim göstermektedir. Bitkinin çeşitli bölümlerinden yapılan distilasyon çalışmalarında tanımlanan uçucu yağ bileşenlerinin sayısının değiştiği, ortak bulunan uçucu yağ bileşenlerinin ise oranlarının değiştiği görülmektedir. Kekik türleri arasında aroma farklılıklarının da sebebi bitkide bulunan majör uçucu yağ bileşenleridir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde hemen hemen her türe özgü dominant bir uçucu yağ bileşeninin tespit edildiği görülmektedir.

Uçucu yağların karakterizasyonunun GC/MS ile yapılması, çok düşük yoğunluklarda bulunan bileşenlerin bile tespitini mümkün kılmaktadır. Farklı kolon türleri ve markaları, taşıyıcı gaz akış hızları, enjeksiyon hacmi ve enjeksiyon ünitesi sıcaklığı kullanılarak çalışmaların yürütüldüğü, özellikle fırın sıcaklık programlarının çalışmalarda çok çeşitlendiği görülmektedir. Fırın sıcaklık programlarının bu kadar çeşitli olması uçucu yağ bileşenlerinin buharlaşma noktalarının birbirinden farklı olmasından kaynaklanmaktadır.

Bazı çalışmalarda polariteleri farklı kolonlar ile aynı örneğin çalışıldığı ve sonucunda tanımlanan uçucu yağ bileşen sayısının değiştiği görülmüştür. GC/FID ve GC/MS çoğu çalışmada birlikte kullanılmış, sonuçlar kütle spektrumu ve Rİ ile birlikte yorumlanmıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Benzerlik oranı (iThenticate): %11

Kaynaklar

[1] K. H. C. Başer and N. Kırımer, Essential oils of anatolian lamiaceae-An update. Natural Volatiles and Essential Oils, 5(4), 1–28, 2018.

[2] Ç. Şenkul ve S. Kaya, Türkiye endemik bitkilerinin coğrafi dağılışı. Türk Coğrafya Dergisi, 69, 109–120, 2017. https://10.17211/tcd.322515

[3] A. Tan, Türkiye Bitki Genetik Kaynakları ve Muhafazası. Anadolu Ege Tarımsal Araştırma Enstitüsü Dergisi, 20(1), 9–37, 2010.

[4] M. Dönmez ve M. Kargıoğlu, Stachys palustris L .' in Morfolojik , Anatomik ve Ekolojik Özellikleri. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 11, 1-9, 2011.

[5] D. Aebisher, J. Cichonski, E. Szpyrka, S. Masjonis, and G. Chrzanowski, Essential oils of seven lamiaceae plants and their antioxidant capacity. Molecules, 26(13), 1–15, 2021. https://10.3390/molecules26133793

[6] T. M. Karpiński, Essential oils of lamiaceae family plants as antifungals. Biomolecules, 10(1), 103, 2020. https://doi.org/10.3390/biom10010103

[7] K. Singletary, Thyme history, applications, and overview of potential health benefits. Nutrition Today, 51(1), 40–49, 2016. https://10.1097/NT.0000000000000139

[8] Ç. Bozdemir, Economic importance and usage fields of oregano species growing in Turkey. Yüzüncü Yil Üniversitesi Journal of Agricultural Sciences, 29(3), 583–594, 2019. https:// 10.29133/yyutbd.511777

[9] A. Wei and T. Shibamoto, Antioxidant/lipoxygenase inhibitory activities and chemical compositions of selected essential oils. Journal of agricultural and food chemistry, 58(12), 7218–7225, 2010. https://doi.org/10.1021/jf101077s

[10] E. M. Dauqan and A. Abdullah, Medicinal and Functional Values of Thyme (Thymus vulgaris L.) Herb. Journal of applied biology and biotechnology, 5(02), 17-22, 2017. https://10.7324/JABB.2017.50203

[11] K. Carović-Stanko, M. PeteK, M. Grdiš and J. Pintar, Medicinal plants of the family lamiaceae as functional foods-A review. Czech journal of food sciences, 34(5), 377–390, 2016. https://doi.org/10.17221/504/2015-CJFS

[12] M. Sokovicǵ, J. Glamočlija, P. D. Marin, D. Brkić, and L. J. L. D. Van Griensven, Antibacterial effects of the essential oils of commonly consumed medicinal herbs using an in vitro model. Molecules, 15(11), 7532–7546, 2010. https://doi.org/10.3390/molecules15117532

[13] S. Almodaifer, N. Alsibaie, G. Alhoumendan, G. Alammari and M.S. Kavita, Role of phytochemicals in health and nutrition. BAOJ Nutrition, 3(2), 1–6, 2017.

[14] M. Carocho, M. F. Barreiro, P. Morales, and I. C. F. R. Ferreira, Adding molecules to food, pros and cons: A review on synthetic and natural food additives. Comprehensive reviews in food science and food safety,13(4), 377–399, 2014. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12065

[15] G. Nieto, A review on applications and uses of thymus in the food industry. Plants, 9(8), 1–29, 2020. https://doi.org/10.3390/plants9080961

[16] M. F. Nagoor Meeran and P. Stanely Mainzen Prince, Protective effects of thymol on altered plasma lipid peroxidation and nonenzymic antioxidants in isoproterenol-induced myocardial infarcted rats. Journal of Biochemical and Molecular Toxicology, 26(9), 368–373, 2012. https://doi.org/10.1002/jbt.21431

[17] B. Kodal Coşkun, E. Çalikoğlu, Z. Karagöz Emiroğlu, and K. Candoğan, Antioxidant active packaging with soy edible films and oregano or thyme essential oils for oxidative stability of ground beef patties. Journal of Food Quality, 37(3), 203–212, 2014. https://doi.org/10.1111/jfq.12089

[18] E. Ferahoğlu, U. Çürük, D. Çoğalan, S. Kırıcı, and H. Çakan, Çukurova koşullarında yetiştirilen Origanum türlerinin uçucu yağ oranları ve bileşenlerinin belirlenmesi. Turkish Journal of Biodiversity, 5(2), 75-85, 2022. https://doi.org/10.38059/biodiversity.1116233

[19] P. Tongnuanchan and S. Benjakul, Essential oils: Extraction, bioactivities, and their uses for food preservation. Journal of food science, 79(7), 1231–1249, 2014. https://doi.org/10.1111/1750-3841.12492

[20] M. G. Miguel, C. Cruz, L. Faleiro, M.T. Simões, A.C. Figueiredo, J.G. Barroso, and L.G. Pedro, Foeniculum vulgare essential oils: Chemical composition, antioxidant and antimicrobial activities. Natural product communications, 5(2) 319–328, 2010. https://doi.org/10.1177/1934578X1000500231

[21] F. C. Fachini-Queiroz, R. Kummer, C.F. Estevao-Silva, M.D. Carvalho, J.M. Cunha and R. Grespan, Effects of thymol and carvacrol, constituents of thymus vulgaris L. essential oil, on the inflammatory response. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, vol. 2012, 2012. https://doi.org/10.1155/2012/657026

[22] M. H. H. Roby, M. A. Sarhan, K. A. H. Selim, and K. I. Khalel, Evaluation of antioxidant activity, total phenols and phenolic compounds in thyme (Thymus vulgaris L.), sage (Salvia officinalis L.), and marjoram (Origanum majorana L.) extracts. Industrial Crops and Products, 43(1), 827–831, 2013. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.08.029

[23] Y. Tavakolpour, M. Moosavi-Nasab, M. Niakousari, S. Haghighi-Manesh, S. M. B. Hashemi, and A. Mousavi Khaneghah, Comparison of four extraction methods for essential oil from Thymus daenensis Subsp. Lancifolius and chemical analysis of extracted essential oil. Journal of Food Processing and Preservation, 41(4), 1–7, 2017. https://doi.org/10.1111/jfpp.13046

[24] A. A. Jovanović, V.B. Đorđević, G. M. Zdunić, D.S. Pljevljakušić, K.P. Šavikin, D.M. Gođevac and B.M. Bugarski, Optimization of the extraction process of polyphenols from Thymus serpyllum L. herb using maceration, heat and ultrasound-assisted techniques. Separation and Purification Technology, 179, 369–380, 2017. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.01.055

[25] M. Yousefi, M. Rahimi-Nasrabadi, S.M. Pourmortazavi, M. Wysokowski, T. Jesionowski, H. Ehrlich and S. Mirsadeghi, Supercritical fluid extraction of essential oils. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 118, 182–193, 2019. https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.05.038

[26] H. Bendif, K. Adouni, M.D. Miara, R. Baranauskienė, P. Kraujalis, P.R. Venskutonis and F. Maggi, Essential oils (EOs), pressurized liquid extracts (PLE) and carbon dioxide supercritical fluid extracts (SFE-CO2) from Algerian Thymus munbyanus as valuable sources of antioxidants to be used on an industrial level. Food chemistry, 260, 289–298, 2018. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.03.108

[27] K. Hosni, I. Hassen, H. Chaâbane, M. Jemli, S. Dallali, H. Sebei and H. Casabianca, Enzyme-assisted extraction of essential oils from thyme (Thymus capitatus L.) and rosemary (Rosmarinus officinalis L.): Impact on yield, chemical composition and antimicrobial activity. Industrial Crops and Products, 47(2013), 291–299, 2013. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.03.023

[28] Türkiye İstatistik Kurumu, Dış Ticaret. https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Dis-Ticaret-104, Erişim 05 Mayıs 2023.

[29] H. Javed, S. Erum, S. Tabassum, and F. Ameen, An overview on medicinal importance of Thymus vulgaris. Journal of Asian Scientific Research, 3(10), 974–982, 2013.

[30] M. Nikolova, M. Yovkova, E. Yankova-Tsvetkova, B. Traikova, T. Stefanova, I. Aneva and S. Berkov, Biocidal activity of origanum vulgare subsp. hirtum essential oil. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 69(5), 569–578, 2021. https://doi.org/10.11118/actaun.2021.051

[31] C. Sarikurkcu, G. Zengin, M. Oskay, S. Uysal, R. Ceylan, and A. Aktumsek, Composition, antioxidant, antimicrobial and enzyme inhibition activities of two Origanum vulgare subspecies (subsp. vulgare and subsp. hirtum) essential oils. Industrial Crops and Products, 70, 178–184, 2015. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.030

[32] F. Fancello, M. El Beyrouthy, M. Iriti, M. El Khoury, M. Bou Zeidan, and S. Zara, Chemical composition and antimicrobial activity against food-related microorganisms of different essential oils from Lebanon. Journal of Food Safety, 39(6), 1–9, 2019. https://doi.org/10.1111/jfs.12688

[33] A. Spagnoletti, A. Guerrini, M. Tacchini, V. Vinciguerra, C. Leone, I. Maresca and L. Angiolella, Chemical composition and bio-efficacy of essential oils from Italian aromatic plants: Mentha suaveolens, Coridothymus capitatus, Origanum hirtum and Rosmarinus officinalis. Natural Product Communications, 11(10),1517–1520, 2016. https://doi.org/10.1177/1934578X1601101023

[34] L. Guerra-Boone, R. Alvarez-Román, R. Salazar-Aranda, A. Torres-Cirio, V.M. Rivas-Galindo, N. Waksman de Torres and L.A. Pérez-López, Antimicrobial and antioxidant activities and chemical characterization of essential oils of Thymusvulgaris, Rosmarinus officinalis, and Origanum majorana from northeastern México. Pakistan journal of pharmaceutical sciences, 28(1), 363–369, 2015.

[35] D. Hadef, M. Saidi, M. Yousfi, and Y. Moussaoui, GC/MS analysis of essential oils of cymbopogon schoenanthus and origanum majorana L. grown in Eastern Algeria. Asian J. Chem., 27(10). 3575–3578, 2015. http://dx.doi.org/10.14233/ajchem.2015.18859

[36] B. Kirkan, C. Sarikurkcu, and R. Amarowicz, Composition, and antioxidant and enzyme-inhibition activities, of essential oils from Satureja thymbra and Thymbra spicata var. spicata. Flavour and fragrance journal, 34(6), 436–442, 2019. https://doi.org/10.1002/ffj.3522

[37] A. M. Arani, M. Naderi and S.M. Goldansaz, Effect of Harvesting Time on Essential Oil Content and Composition of Thymbra spicata. Journal of Medicinal Plants and By-products, 1, 51–55, 2015.

[38] O. Borugă, C. Jianu, C. Mişcă, I. Goleţ, A. T. Gruia,

and F. G. Horhat, Thymus vulgaris essential oil: chemical composition and antimicrobial activity. Journal of medicine and life, vol. 7(3(3)), 56–60, 2014.
[39] A. A. Khan, M. S. Amjad and Saboon, GC-MS analysis and biological activities of Thymus vulgaris and Mentha arvensis essential oil. Turkish Journal of Biochemistry, 44(3), 388–396, 2019. https://doi.org/10.1515/tjb-2018-0258
[40] A. Maccelli, L. Vitanza, A. Imbriano, C. Fraschetti, A. Filippi, P. Goldoni, and F. Rinaldi, Satureja montana L. Essential oils: Chemical profiles/phytochemical screening, antimicrobial activity and o/w nanoemulsion formulations. Pharmaceutics, 12(1), 1–22, 2020. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12010007
[41] A. Čopra-Janićijević, D. Vidic, and M. Maksimović, Characterisation of satureja montana l. Essential oil and headspace volatiles. Naturel Volatiles Essential Oils, 7(2), 22–34, 2020. https://10.37929/nveo.743706
[42] N. Katar ve D. Katar, Eskişehir Ekolojik Koşullarında Farklı Hasat Zamanlarının Limon Kekiğinin (Thymus citriodorus L.) Verim ve Kalitesi Üzerine Etkisi. Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 34(1), 93–105, 2020.
[43] O. Toncer, S. Karaman, E. Diraz, T. Sogut, and S. Kizil, Essential oil composition of Thymus × citriodorus (Pers.) Schreb. at different harvest stages," Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 45(1), 185–189, 2017. https://doi.org/10.15835/nbha45110672
[44] A. Sokmen, A. A. S. Abdel-Baki, E. S. Al-Malki, S. Al-Quraishy, and H. M. Abdel-Haleem, Constituents of essential oil of Origanum minutiflorum and its in vitro antioxidant, scolicidal and anticancer activities. Journal of King Saud University-Science, 32(4), 2377–2382, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.03.018
[45] R. Toker, M. Gölükcü, and H. Tokgöz, Effects of distillation times on essential oil compositions of Origanum minutiflorum O. Schwarz Et. and P.H. Davis. Journal of Essential Oil Research, 29(4), 330–335, 2017. https://doi.org/10.1080/10412905.2016.1276026
[46] K. Spyridopoulou, E. Fitsiou, E. Bouloukosta, A. Tiptiri-Kourpeti, M. Vamvakias, A. Oreopoulou and K. Chlichlia, Extraction, Chemical Composition, and Anticancer Potential of Origanum onites L. Essential Oil. Molecules, 24(14), 2612, 2019. https://doi.org/10.3390/molecules24142612
[47] A. Altintas, N. Tabanca, E. Tyihák, P.G. Ott, A. M. Móricz, E. Mincsovics and D. E. Wedge, Characterization of volatile constituents from Origanum onites and their antifungal and antibacterial activity. Journal of AOAC International, 96(6), 1200–1208, 2013. https://doi.org/10.5740/jaoacint.SGEAltintas
[48] M. Farzaneh, H. Kiani, R. Sharifi, M. Reisi, and J. Hadian, Chemical composition and antifungal effects of three species of Satureja (S. hortensis, S. spicigera, and S. khuzistanica) essential oils on the main pathogens of strawberry fruit. Postharvest Biology and Technology, 109, 145–151, 2015. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.06.014
[49] T. Gokturk, Chemical composition of Satureja spicigera essential oil and its insecticidal effectiveness on Halyomorpha halys nymphs and adults. Zeitschrift für Naturforschung C, 76(11), 451–457, 2021. https://doi.org/10.1515/znc-2021-0041
[50] A. Özel and F. Tekin, Determination of morphogenetic variability in essential oil ratio and components of Origanum syriacum L. var. bevanii (Holmes) Ietswaart. Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi, 25(3), 315–325, 2021. https://doi.org/10.29050/harranziraat.895711

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2024; 13(1), 393-412

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Derleme makalesi / Review article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

İncirde (*Ficus carica* L.) *in vitro* doku kültürü tekniklerinin uygulanma potansiyelinin değerlendirilmesi

Evaluation of the application potential of *in vitro* tissue culture techniques in fig (*Ficus carica* L.)

Altın Kardelen Abacı[1], Begüm Güler[2,*], Aynur Gürel[3]

[1] *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyoteknoloji Anabilim Dalı, 35040, İzmir Türkiye*
2 Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Genetik ve Biyomühendislik Bölümü, 40100, Kırşehir, Türkiye
3 Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, 35040, İzmir Türkiye

Öz

İncir, çoğunlukla Akdeniz bölgesinde yetişen ve insanlık tarihinin bilinen en eski ıslah edilen meyve türlerinden biri olarak bilinir. Ticari değeri yüksek olan incirin, iklim ve ekolojik istekleri nedeniyle dünyada az sayıda ülkede üretimi yapılabilmektedir. Dünya ülkeleri içinde gerek kuru incir gerekse de taze incir üretiminde Türkiye ilk sırada yer almaktadır. İncir tohumlarının cansızlığı ve ayrıca üretimde yaşanan çeşitli problemlerden ötürü araştırmacılar farklı üretim yöntemlerini tercih etmişlerdir. Bitki doku kültürü teknikleri bu yöntemler arasında iyi bir alternatif olmuştur. Doku kültürü yöntemleri ile çoğaltım; mevsimsel ve diğer çevresel koşullardan bağımsız, yüksek kaliteli, hastalıksız incir üretimine olanak vermesi nedeniyle yüksek avantajlar sağlamaktadır. Bugüne kadar birçok araştırmacı tarafından incir bitkisinde mikroçoğaltım, somatik embriyogenez, kallus kültürü, hastalıksız bitki üretimi (meristem kültürü), protoplast kültürü ve *in vitro* seleksiyon ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla gerçekleştirilen araştırmalarda sürgün ucu, nod, gövde, yaprak ya da meristem başta olmak üzere farklı eksplant kaynakları kullanılmıştır. Bu derlemede, ekonomik öneme sahip olan *Ficus carica* L. türünde *in vitro* koşullarda farklı uygulama alanlarında yapılan çeşitli çalışmalar incelenerek elde edilen sonuçların irdelenmesi amaçlanmıştır.

Anahtar kelimeler: *Ficus carica* L., İncir, Bitki doku kültürü teknikleri, *In vitro*

Abstract

Figs are known as one of the oldest known breeds of fruit in the history of mankind, mostly grown in the Mediterranean region. Fig, which has a high commercial value, can be produced in a few countries in the world due to its climate and ecological demands. Turkey is in first place in the production of both dried and fresh figs among the countries of the world. Researchers have preferred different production methods due to the lifelessness of fig seeds and various problems experienced in production. Plant tissue culture techniques have been a good alternative among these methods. Propagation by tissue culture methods provides high advantages as it enables high quality, disease-free fig production independent of seasonal and other environmental conditions. To date numerous studies have been carried out by many researchers on micropropagation, somatic embryogenesis, callus culture, disease-free plant production (meristematic culture), protoplast culture and *in vitro* selection in fig plants. In the studies accomplished for this purpose, different explant sources, especially shoot tip, node, stem, leaf or meristem were used. In this review, it is aimed to examine the results obtained by examining various studies conducted in different application areas under *in vitro* conditions on the economically important *Ficus carica* L. species.

Keywords: *Ficus carica* L., Fig, Plant tissue culture techniques, *In vitro*

1 Giriş

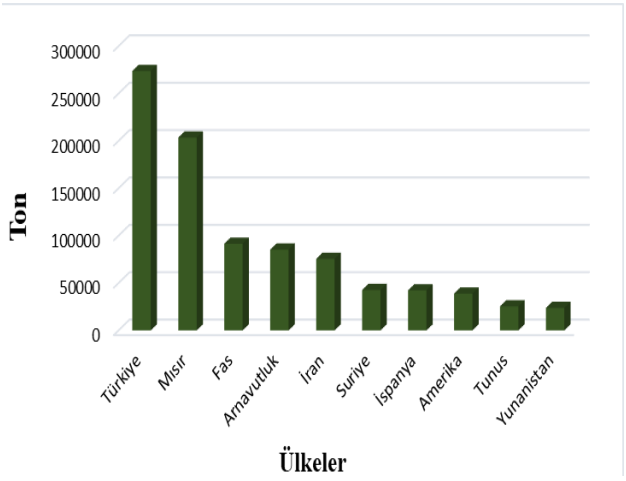
Kökeni Anadolu'da insanlık tarihi kadar eski dönemlere dayanan incir, kültür meyveleri arasında en eski gelişim tarihine sahip olan meyve türlerinden biridir. İncirin anavatanı Türkiye olup, buradan önce Filistin ve Suriye'ye, daha sonra Ortadoğu üzerinden Hindistan ve Çin'e yayılmıştır [1]. Botanik ismi *Ficus carica* L. olan incir, *Moraceae* (Dutgiller) familyasına ait ağaç ya da ağaççık formunda bir bitki türüdür. İncir meyvesi, Anadolu ve özellikle Ege'de binlerce yıllık bir geçmişe sahip olmakla birlikte, adını Ege Bölgesindeki antik yerleşim alanı Caria'dan almıştır [2].

Ficus, dünya çapında tropikal ve alt tropikal bölgelerde bulunan 800'den fazla odunsu ağaç, epifit ve çalı türü ile en büyük kapalı tohumlu (Angiosperm) cinslerinden birini oluşturmaktadır [3]. Yüksekliği 3-10 metre arasında değişen, çok dallı, yaprak döken, küçük dioik ağaçlardır. Dallanması düz, kabuğu grimsi kahverengidir. Yaprakları; alternat, genellikle 3-5 oval loblu (palmat loblu) genişlemiş oval biçiminde ve tıpkı kalın bir kâğıt gibidir. 2–5 cm uzunluğunda güçlü yaprak sapı vardır. 10–20 cm uzunluk ve genişliğindeki laminanın tabanı kalp şeklindedir [4]. *Ficus carica* L.'nın 'erkek' yabani incir (caprifig-kaprifig) ve dişi incir (yenilebilir incir) olmak üzere 2 eşeysel formu bulunmaktadır. Yabani incir, bir evciklidir (monoik) ve bünyesinde ayrı erkek (stamen) çiçekler ile ayrı dişi (pistil)

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: begum.guler@ahievran.edu.tr (B. Güler)
Geliş / Recieved: 15.09.2023 Kabul / Accepted: 16.10.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1360362

çiçekleri bulundurmaktadır. Erkek çiçek işlevsel olarak polen üretmektedir. Yenilebilir incirler sadece uzun biçimli dişi çiçekler içermektedir. İşlevsel olarak erkek ağaçlar hermafrodit olduğundan, *Ficus carica* L. genellikle iki evcikli (dioik) yerine ginodioik (bazı bireylerinde yalnızca dişi çiçek, diğerlerinde ise karma eşeyli çiçek bulunması) olarak kabul edilmektedir [5, 6]. Meyve eti, yumuşak ve tatlıdır. Olgunlaşmış meyvelerindeki kabuk; saydam, parlak, esnek ve etten kolayca ayrılabilir niteliktedir. Rengi çeşidine göre yeşil, yeşilimtırak sarı, açık veya koyu mordur [7].

Pek çok besleyici özelliği bulunan incirin günümüzde yüksek miktarda tüketiminden dolayı, dünya çapında önemli bir ekonomik rolü mevcuttur [8]. Dünya genelinde hem kuru hem de taze olarak tüketilen incir meyvesi, genellikle kurutulduktan sonra pazarlanmaktadır [9]. Son veriler ışığında, dünya çapında incir ağaçlarının dikili olduğu alan 289.818 hektarı aşmakta olup tahmini üretim 1.315.588 tondur [10]. FAOSTAT'dan alınan verilere göre, 1994-2020 yılları arasında en önemli incir üreticisi ülkeler arasında bulunan Türkiye, sahip olduğu zengin incir genetik kaynakları ve farklı ekolojik koşulları barındırması nedeniyle ilk sırada yer almaktadır (Şekil 1) [11, 12]. Türkiye'yi ise Mısır, Fas, Cezayir, İran ve Amerika Birleşik Devletleri (ABD) takip etmektedir [13]. Ülkemiz, 2020 yılında başta Ege, Marmara ve Akdeniz bölgeleri olmak üzere 53.694 ha alanda yıllık 320.000 metrik ton üretimle dünyanın en büyük yaş ve kuru incir üreticisi konumunda olmuştur [14]. Türkiye, incirin genetik kaynağı açısından zengin bir çeşitlilik barındırmaktadır. Bu kaynağı, 272 adet dişi ve 58 adet erkek incir genotipi veya çeşidi oluşturmaktadır. Ülkemiz, ayrıca dünya çapında kaliteli kurutmalık incir üretim merkezi konumundadır [15]. Türkiye'de yetiştirilen ve ihracatı yapılan en önemli taze ve kurutmalık incir çeşitleri sırasıyla '*Sarılop*' ve '*Bursa siyahı*'dır. Üretilen kuru incirin büyük çoğunluğunu oluşturan 'Sarılop' çeşidi, Aydın ve İzmir illerinin sahip olduğu uygun iklim koşullarına optimum şekilde uyum sağlamaktadır [16].

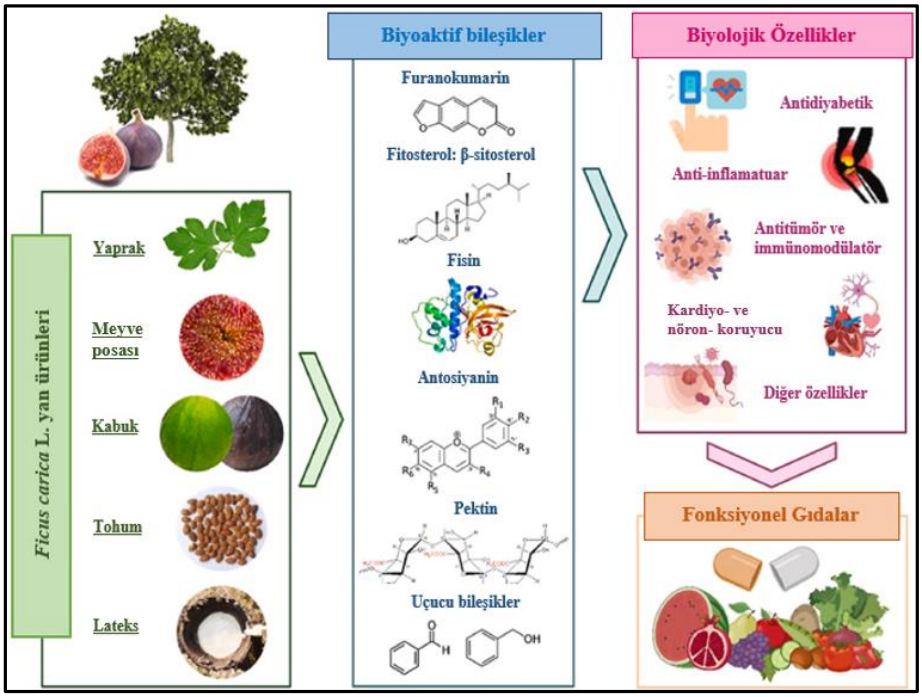


Şekil 1. 1994-2020 yılları arasında dünyanın en önemli incir üretici ülkeleri ve üretim miktarları (ton) [12].

Geleneksel tıpta, incir ağaçlarının yaprakları, meyveleri ve kökleri; solunum, kardiyovasküler ve gastrointestinal sistemler başta olmak üzere çeşitli hastalıkların tedavisinde kullanılmaktadır [17]. İncirde bulunan C vitamini, tokoferol, karotenoid ve fenolik gibi antioksidan özelliğe sahip bileşikler; kanserojenlerin metabolik aktivasyonu ve detoksifikasyonu üzerinde etki göstererek tümör hücrelerinin gelişimini engellemekte, ayrıca yaşlanma ile ilgili nörokimyasal değişiklikleri önleyebilmektedir. Yapılan çalışmalar, fenolikler açısından zengin meyvelerin kardiyovasküler ve serebrovasküler hastalıklar üzerinde etkili olduğunu ve kanser kökenli ölüm oranlarını azalttığını göstermiştir [18]. *Ficus carica* L. yan ürünleri (yaprak, meyve posası, kabuk, tohum, lateks); fenolik bileşikler, uçucu bileşikler, pektin veya fisin dahil olmak üzere farklı biyoaktif bileşikler içerirler. Bu bileşikler, yeni fonksiyonel gıdaların geliştirilebilmesi açısından çeşitli biyolojik özelliklere sahiptirler (Şekil 2) [19]. İncirler, içerdikleri çok sayıda amino asit ile mükemmel bir mineral, vitamin ve diyet lifi kaynağıdırlar [20]. Ayrıca incir, vücudun kendisinin üretemediği bundan dolayı dışarıdan alınması gereken fitosterol maddesini, omega-3 ve -6 gibi yağ asitlerini yoğun bir şekilde içermektedir [16]. Günlük olarak tüketilen 100 g kuru incir (4-6 adet), Avrupa Birliği 90/496 No.lu direktifine göre günlük protein ihtiyacının %7'sini, enerji ihtiyacının %10'unu, kalsiyumun %17'sini, potasyumun %18'ini, fosforun %20'sini, demir ile magnezyumun %30'unu, B1 vitamininin (Thiamin) %5.2'sini ve B2 vitamininin (Riboflavin) ise %4.5'ini karşılayabileceği belirtilmiştir [21].

Yetiştiriciliği yapılan birçok üründe olduğu gibi incir bahçelerinde ve fidanlıklarında, bitki sağlığı açısından çeşitli sorunlarla karşılaşılmaktadır [22]. İncir mozaik hastalığı gibi çeşitli virüs hastalıkları üretimin her aşamasında tehdit oluşturmaktadır [23]. Hasadının insan gücü gerektirmesi ve çeşitli patojenlerden kaynaklanan bitki sağlığı sorunları nedeniyle incir üretimi sınırlı olmaktadır. Bu nedenle, dikili alanların son zamanlarda kademeli olarak yok olduğu görülmektedir [24]. Bunlara ek olarak, dişi çeşitlerin ihtiyaçlarına göre seçilmiş tozlayıcıların eksikliği ve bunların tarlada çoğaltılmasının zorluğu gibi önemli sıkıntılar da bulunmaktadır [23].

İncir tohumlarının cansızlığı nedeniyle eşeyli üretim tercih edilmemekte, vejetatif çoğaltım için ise çelikleme, aşılama ve daldırma gibi yöntemler kullanılmaktadır. Ancak büyük ölçekli üretim için çok sayıda çelik materyaline ihtiyaç duyulmakta ve zayıf köklenme nedeniyle çeliklerin sadece %20-30'u hayatta kalmaktadır. İncir ile yapılan *in vitro* çalışmalar da çoğunlukla incir mozaik virüsü içermeyen bitki materyalinin üretimine yönelik olarak tekli-sürgün ucu eksplantlarının uzamasıyla sınırlı kalmıştır [25]. Bütün bu sebepler, yerel üretimi ve ulusal incir kaynaklarının korunmasını teşvik etmek için incirin çoğaltılmasına yönelik yüksek performanslı ve verimli prosedürlerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır [26].



Şekil 2. *Ficus carica* L'nin yan ürünlerinin fonksiyonel gıda üretiminde kullanımı [19].

Bitki doku kültürü teknikleri, odunsu bitkilerin çoğaltılması ve ıslahında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak cansız tohum sorunu nedeniyle, özellikle sürgün ve kök indüksiyonu için bitki büyüme düzenleyicilerinin yardımıyla bitkinin çeşitli kısımlarından alınan eksplantlar kullanılarak çoğaltım oranını artırabilecek doku kültürü tekniklerine ihtiyaç bulunmaktadır [27]. Bitki doku kültürü teknikleri kullanılarak farklı incir çeşitlerinde gerçekleştirilen birçok çalışmadan olumlu bulgular elde edilmekle birlikte, özellikle çoğaltım protokolünü optimize etmek ve çeşitli biyoteknoloji araştırmalarını desteklemek konusunda literatürde eksiklikler bulunmaktadır. Bu makalede, dünya çapında çeşitli amaçlara yönelik olarak *in vitro* koşullarda *Ficus carica* L. türünde ve diğer Ficus çeşitlerinde gerçekleştirilen bitki doku kültürü tekniklerine ilişkin araştırma sonuçlarının bir incelemesi sunulmuştur.

2 İncir bitkisinde *in vitro* doku kültürü çalışmalarında kullanılan besin ortamları ve içerikleri

Bitki doku kültürü teknikleri; laboratuvarda kontrollü aseptik koşullar altında bütün bitki, organ, doku veya hücrelerin yetiştirilmesine olanak tanımaktadır. Doku kültürü sistemi, temel besin ortamı yoluyla çeşitli bitki eksplantlarının büyüme ve gelişmesi için gerekli tüm besinleri, enerjiyi ve suyu sağlamaktadır [28]. Kültürde bir eksplantın büyümesi, gelişmesi ve morfogenik tepkisi; genetik yapısına, çevre koşullarına ve besin ortamının bileşimine bağlıdır. Bir bitki doku kültürü çalışmasının başarısı, büyük ölçüde uygun besin ortamının seçimi ile ilişkilidir [29].

İncir bitkisinde mikroçoğaltım dahil olmak üzere doğrudan ya da dolaylı organogenez ve somatik embriyogenez yollarıyla *in vitro* rejenerasyonun yanı sıra meristem, protoplast, saçaklı kök kültürleri ve *in vitro* seleksiyon tekniklerinin kullanımıyla gerçekleştirilen çeşitli *in vitro* doku kültürü çalışmalarında, çoğunlukla Murashige ve Skoog (MS) besin ortamının kullanıldığı, bunu Odunsu Bitki Ortamı (WPM, Woody Plant Medium) ile Gamborg (B5) besin ortamının takip ettiği belirlenmiştir. Ayrıca Knudson, White (WH), LS (Linsmaier ve Skoog), Quoirin ve Lepoivre (QL), Zeytin Ortamı (OM, Olive Medium) ve Ceviz Ortamı (DKW, Driver Kuniyuki Walnut) besin ortamlarının da çeşitli denemelerde test edildiği saptanmıştır (Tablo 1-7).

Orkide tohumlarının *in vitro* koşullarda asimbiyotik çimlenmesinin keşfedilmesi ile Knudson tarafından mineral ve şeker içeren oldukça basit bir besin ortamı geliştirilmiş ve orkide doku kültürünün temeli atılmıştır [30]. 1946 yılında Knudson tarafından tanımlanan Knudson C Orchid besin ortamı, orijinal olarak *Cymbidium* orkide tohumlarının *in vitro* çimlenmesini sağlamak için geliştirilmekle birlikte, diğer bitki türleri için de kullanılabilmektedir. Besin ortamı içerisindeki potasyum dihidrojen fosfat, fosfat kaynağı, amonyum sülfat ve kalsiyum nitrat ise azot kaynağı olarak işlev yapmakta ve tohumların çimlenmesi teşvik edilmektedir. Bununla birlikte magnezyum sülfat, fotosentezi ve hücre farklılaşmasını desteklemekte, mangan ve demir gibi mikro elementler de metabolizmayı geliştirerek çimlenmeye yardımcı olmaktadır [31]. Bitki doku kültürlerinde en yaygın olarak kullanılan besin ortamı Murashige ve Skoog tarafından 1962'de geliştirilen MS besin ortamıdır. MS besin ortamı; Ca, Mg, N, K, S ve P gibi makro besin elementleri; Cu, Co, Mo, Mn, Na ve Zn gibi mikro besin elementleri, vitaminler, organik madde elementleri ve karbon kaynakları dahil olmak üzere bitki rejenerasyonunu başlatmak için yeterli besinleri

içermektedir [32]. 1963 yılında White tarafından domates köklerinin elde edilmesi için oluşturulan White besin ortamı, kök kültürüne yönelik eski bir bitki doku kültürü ortamı olarak bilinmektedir. Bu besin ortamı oldukça düşük bir tuz konsantrasyonuna ve daha yüksek bir $MgSO_4$ konsantrasyonuna sahiptir. Ayrıca nitrat konsantrasyonu, MS besin ortamına göre %19 civarında daha azdır [33]. Linsmaier ve Skoog tarafından 1965 yılında geliştirilen LS besin ortamı, ilk olarak tütün kültürlerinin organik takviyelerini optimize etmek için kullanılmıştır. İnositol, bitkilerin primer ve sekonder metabolizmasında yer alan, glikoliz ve trikarboksilik asit döngüsünde enzimatik bir kofaktör olarak işlev görmektedir. LS besin ortamı, MS besin ortamına benzer bileşenlere sahiptir. Ancak Linsmaier ve Skoog, artan tiamin hipoklorit konsantrasyonu (0.1 mg/L yerine 0.4 mg/L) ile MS besin ortamında inositol hariç vitamin eksikliğinin telafi edildiğini belirtmişlerdir [33]. 1968'de Gamborg tarafından geliştirilen B5 besin ortamı ise makro ve mikro elementler, vitaminler, kalsiyum klorür ve potasyum iyodür içeren ve bitki doku kültüründe yaygın olarak kullanılan diğer bir besin ortamıdır [32]. *Prunus* türü bitkicikler, Quoirin ve Lepoivre tarafından tanımlanan QL besin ortamında kök kallusundan yeniden rejenere edilmişlerdir. Kalluslar, 6-benzilaminopürin (BAP) ve giberellik asit (GA_3) içeren meristem kültüründen türetilen bitkiciklerin köklerinden oluşturulmuştur. *Rosa hybrida* L. çeşitlerinin mikroçoğaltımı da bu besin ortamında gerçekleştirilmiştir. QL besin ortamı, MS'e kıyasla birkaç farklılık içermektedir. Amonyum iyon konsantrasyonu güçlü bir şekilde azaltılırken, kalsiyum iyon konsantrasyonu artırılmış ve klor iyonları neredeyse elimine edilmiştir. Bu formülasyon, bitkilerde görülen vitrifikasyon (camsılaşma) sorunlarını önleyebilmektedir [34]. WPM (Woody Plant Medium), düşük iyon seviyeli, ancak yüksek miktarda sülfat içeren bir besin ortamıdır ve 1981 yılında Lloyd ve McCown tarafından odunsu bitkilerin doku kültürü için geliştirilmiştir [32]. Zeytin ortamı (OM, Olive Medium), 1984'te Rugini tarafından olgunlaşmış tohumlardan mineral elementlerin analiz edilmesiyle geliştirilmiştir ve zeytinin mikroçoğaltımı ile ilgili ilk çalışma Rugini tarafından rapor edilmiştir. OM besin ortamı, İtalya'da 50'den fazla zeytin çeşidi için ticari bitki üretiminde kullanılmıştır [35]. Driver ve Kuniyuki tarafından oluşturulan DKW besin ortamı, başlangıçta ceviz bitkisinde sürgün çoğaltımı ve kallus gelişimi için kullanılmıştır ve eksplant büyümesine yardımcı olan MS besin ortamına kıyasla daha yüksek konsantrasyonda kalsiyum elementine sahiptir [32].

Bitki doku kültürü çalışmalarında hem katı hem de sıvı besin ortamları kullanılabilmektedir. Besin ortamının bileşimi, özellikle de bitki büyüme düzenleyicileri ve azot kaynağı, eksplant tepkisi üzerinde önemli etkilere sahiptir. Bitki büyüme düzenleyicileri, besin ortamında bitki hücrelerinin ve dokularının gelişim yolunun belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Oksinler, sitokininler ve giberellinler en yaygın olarak kullanılan bitki büyüme düzenleyicileridir. Kullanılan bitki büyüme düzenleyicilerinin tipi ve konsantrasyonu, esas olarak bitki türüne, kültüre alınan doku veya organ tipine ve çalışmanın amacına bağlı olarak değişmektedir. Yüksek dozlardaki oksin ve sitokininler sırasıyla kök oluşumunu ve sürgün rejenerasyonunu teşvik etmektedirler [36].

Oksinin kimyasal yapısının aydınlatılmasından sonra, yapı olarak indol-3- asetik asit (IAA)'e benzeyen birçok kimyasal bileşiğin bitkilerde oksin benzeri etkiler oluşturduğu belirlenmiştir. IAA dışında; indol bütirik asit (IBA), naftalin asetik asit (NAA), naftoksi asetik asit (NOAA), fenoksi asetik asit (FOAA), 2,4-diklorofenoksiasetik asit (2,4-D), fenil asetik asit (FAA), parakloro fenoksi asetik asit (4-CPA) ve 2,4,5-triklorofenoksi asetik asit (2,4,5-T) vb. oksinler de mevcuttur. Sitokininler ise bitki dokularında özellikle hücre bölünmeleri esnasında ortaya çıkan kinin yapısındaki organik maddelerdir. Sitokininler iki ana gruba ayrılırlar: tidiazuron (TDZ) olarak bilinen 1-fenil-3-(1,2,3-tiadiazol5-yl) üre ve N-(2-kloro-4-piridil) -N'-fenilüre (CPPU) gibi sentetik fenilüre türevleri ve kinetin (Kin), 6-benziladenin (BA) veya 6-benzilaminopürin (BAP) gibi doğal adenin türevleri. Sentetik fenilüre türevleri, özellikle TDZ, adenin türevlerinden daha yüksek aktiviteye sahiptir [37]. Spesifik bir sitokinin türü olan izopenteniladenin (2IP), yaprak senesensini geciktirmede, kök büyümesini engellemede ve sürgün rejenerasyonunu desteklemede rol oynadığı gösterilmiştir [38].

Bazı bitki doku kültürleri çalışmalarında, büyümeyi teşvik etmek için besin ortamına organik katkı maddeleri de dahil edilebilmektedir. Bu katkı maddeleri arasında hindistancevizi suyu, muz posası, bal, patates, mısır ve papaya özütü bulunmaktadır [39]. Bitki doku kültürü çalışmalarında, *in vitro*'da daha iyi veya daha verimli bitki büyümesini sonuçlayan yeni bileşiklerin araştırılmasına sürekli gereksinim duyulmaktadır. Floroglusinol (PG, 1,3,5 trihidroksibenzen), nispeten bilinmeyen bir bileşik olan floridzinin bir bozunma ürünüdür ve büyümeyi teşvik edici özelliklere sahiptir. PG'nin, çeşitli bahçe ve tahıl bitkilerinde sürgün oluşumunu ve somatik embriyogenezi artırdığı bilinmektedir. Oksin ile birlikte köklendirme ortamına eklendiklerinde daha fazla köklenme uyarılmaktadır. Çünkü PG ve homologları, oksin sinerjistleri veya oksin koruyucuları olarak işlev görmektedir [40]. Bununla birlikte, yaygın olarak 6- aminopurin hemisülfat tuzu olarak bilinen adenin sülfat (Ads, $C_{10}H_{12}N_{10}O_4S$), bir pürindir ve sitokinin biyosentez yolağının öncüsü olarak görev yapmaktadır. Ads'nin bitki doku kültürü üzerindeki etkisi, genellikle benzilaminopürin veya kinetin gibi sitokininlerle birlikte kullanıldığında belirlenmeye çalışılmıştır [41].

İncir bitkisinde gerçekleştirilen *in vitro* doku kültürü çalışmalarında, sürgün rejenerasyonunu teşvik etmek için en fazla kullanılan sitokinin olan BAP'ı, Kin takip etmektedir. Az sayıda çalışmada ise TDZ ve 2IP'nin kullanıldığı belirlenmiştir. Çalışmalarda kök rejenerasyonunun teşvikinde en fazla kullanılan oksinler NAA ve IBA olmuştur. Daha az sayıdaki çalışmada, sırasıyla IAA ve 2,4-D'nin kullanıldığı saptanmıştır. İncirle ilgili çalışmalarda kombinasyon halinde en fazla kullanılan sitokinin ve oksinler; BAP+NAA veya Kin+IBA ya da NAA olarak belirlenmiştir. Kombinasyon halindeki bu bitki büyüme düzenleyicilerine ek olarak GA_3'ün yanı sıra PG ve Ads de kullanılmıştır (Tablo 1-7).

İncir bitkisinde köklenme zordur ve çelikler büyük zorluklarla kök geliştirmektedir. Çeliklerin köklenme başarısında, özellikle kök uyarımını teşvik edici bitki büyüme düzenleyicileri önemli rol oynamaktadır. Oksinler, genellikle kök uyarımının yanı sıra aşılama işleminin başlatılmasında da önemli etkilere sahiptirler ve sitokinin tarafından indüklenen kök apikal baskınlığını kırarak kök oluşumunu indüklerler [42].

İncirde çeşitli alanlarda yapılan doku kültürü çalışmaları incelendiğinde, sürgün ucu eksplantlarının en fazla kullanılan eksplant tipi olduğu belirlenmiştir. Bunu, sırasıyla sürgün ucu meristemleri, yaprak ve nod eksplantları ile apikal ve aksiller (koltuk altı) tomurcuklar takip etmiştir. En az sayıda kullanılan eksplant tiplerinin ise tohum ve gövde eksplantları olduğu belirlenmiştir (Tablo 1-7).

3 İncir bitkisinde çeşitli amaçlara yönelik olarak kullanılan *in vitro* doku kültürü teknikleri

3.1 İncir bitkisinde mikroçoğaltım

Bitki doku kültürlerinde, uygun bir besin ortamı içerisinde aseptik *in vitro* kültür koşulları altında bitkinin tam bir bitki oluşturma yeteneğine sahip olan çeşitli eksplantlarından kısa sürede ve çok sayıda bitkiyi hızlı rejenere etme yöntemi "mikroçoğaltım" olarak isimlendirilmektedir [43]. Ticari düzeyde mikroçoğaltım yöntemleri ilk olarak 1960 yılında George Morel tarafından orkide bitkilerinin üretimi için kullanılmıştır. Mikroçoğaltımda kültürün başlatılması için yaygın olarak kullanılan eksplantlar meristem, sürgün ucu ve aksiller tomurcuklardır. Sürgün apikal kısmı, meristem ve sürgün ucunda aktif olarak bölünen meristematik hücreler grubundan oluşmaktadır [44]. Bir yüzyıldan fazla süredir devam eden etkili biyoteknolojik yöntemlerle ilgili araştırmalara rağmen mikroçoğaltım tekniği, genetik aslına uygunluğu koruyan ve hastalık barındırmayan, klonal bitkiciklerin büyük ölçekli üretimi için önemini sürdürmeye devam etmektedir [45]. *In vitro* kültür teknikleri, yıl boyunca hızlı kitlesel üretimle tek tip bitkiler sağladığı için geleneksel çoğaltma yöntemlerine göre birçok avantajlara sahiptir [46]. Mikroçoğaltım, incirdeki çeşitli sorunların üstesinden gelmek üzere kullanılan doku kültüründeki en uygun tekniktir [25].

Yenilebilir incir (*Ficus carica* L.) meyveleri tozlaşmayla veya tozlaşma olmaksızın çoğaltılabilmektedir. Ancak, partenokarpik incir meyveleri çimlenmede kullanılmak için canlı tohumlar üretememektedir [47]. Bununla birlikte, incirin tohumları temel olarak ıslah amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca çelikle çoğaltım, düşük köklenme yüzdelerine neden olmakta ve bu nedenle çeliklerin sadece %20 ila 30'u hayatta kalmaktadır [48]. Klasik daldırma ve dip sürgün yöntemlerinde ise, sınırlı sayıda sürgün elde edilmesinden dolayı üretilen fidan sayısı düşük olmaktadır. Arazi koşullarında, ani sıcaklık değişimleri ve düşük nem gibi ekolojik koşullar çeliklerin büyümesini ve köklenmesini olumsuz etkilemekte, bu yöntemin üretimde kullanılabilmesi için ise toprağın hazırlanması ve uygun iklim koşullarının sağlanması kritik önem taşımaktadır. Üretim sırasında karşılaşılan en düşük stres koşulları bile üretim miktarını ve maliyetini olumsuz etkileyebilmektedir. İncir fidanlıklarında üretimin kolay olduğu düşünülmektedir ancak bu sorunlar nedeniyle çelikler, yüksek köklenme yeteneğine sahip olsalar bile istenilen düzeyde başarı ve süreklilik göstermemektedir [49]. Brezilya, Güney Amerika'daki temel incir üretici ülkelerinden biridir. Ancak nematodları (*Meloidogyne*), akarları (*Eriophyes fici*) ve mozaik virüsünü (*Heterodera fici*) kontrol etmede zorluklar yaşanmaktadır. Bu nedenle, bu zorlukların üstesinden gelebilmek için çoğaltım tekniklerinin iyileştirilmesi gerektiği ifade edilmiştir [50, 51].

Çok sayıda ve kısa sürede dikime hazır hale gelen fide sorununu çözmek üzere incirde vejetatif çoğaltım tekniğine ihtiyaç duyulmaktadır [52]. İncir bitkisinin mikroçoğaltılması yoluyla patojensiz bitkicikler elde etmek mümkündür ve bu teknikle arzu edilen nitelikte ve kalitedeki başarılı bir ticari meyve bahçesinin, büyük ölçekli üretimi için temel gereksinimlerden biri olarak görülmektedir. Mikroçoğaltımın avantajlarının yanı sıra *in vitro* kültür, genetik transformasyonla elde edilen transgenik bitkiler üzerindeki araştırmaları da desteklemiştir [53]. Doku kültürü, bitki materyalinin yüksek çoğaltım oranlarıyla üretimini ve dolayısıyla germplazmın uzun süreli depolanması için yeterli bitki materyalini sağlayan temel yöntemdir. Doku kültürü, korunan materyalin *in vitro* (hastalıksız) olarak muhafaza edilebilmesi, ülkeler arasında kolaylıkla değiş- tokuş edilebilmesi ve yenilenmiş olgun *F. carica* bitkiciklerinin üretebilmesi için büyük avantajlar sunmaktadır [48].

İncir bitkisinin *in vitro* kültürü, en uygun ve etkili besin ortamının kullanımının yanı sıra, çeşit ve eksplant tipi ile başlangıç, çoğaltım, köklenme gibi farklı kültürleme aşamalarına bağlıdır. İncirin *in vitro*'da kültürü için MS ve WPM ortamı yaygın olarak kullanılmaktadır [53]. WPM besin ortamı, ekonomik olarak daha ucuz olmasının yanı sıra, özellikle ağaç ve odunsu türler için daha uygun olacak şekilde tasarlanmıştır [24].

İncir bitkisinde gerçekleştirilen birçok mikroçoğaltım çalışmasında, en fazla MS besin ortamının kullanıldığı, bunu WPM besin ortamının takip ettiği belirlenmiştir. İncirin mikroçoğaltımıyla ilgili yapılan diğer çalışmalarda ise LS, Knudson, B5'in daha az kullanılan besin ortamları olduğu anlaşılmaktadır (Tablo 1). İncirde *in vitro* koşullarda sürgün rejenerasyonunu teşvik etmek için en çok BAP (BA) ve Kin'in kullanıldığı, az sayıdaki çalışmada ise 2IP'nin test edildiği belirlenmiştir. Kök rejenerasyonu çalışmalarında ise en fazla kullanılan oksin tipleri sırasıyla NAA, IBA ve IAA olduğu saptanmıştır. İncirdeki mikroçoğaltım araştırmalarında en fazla kullanılan eksplant tiplerinin başında sürgün ucu eksplantı gelirken bunu nod eksplantları takip etmiştir. Bazı mikroçoğaltım çalışmalarında ise sürgün, sürgün ucu meristemi, yaprak, aksiller tomurcuk ve gövde eksplant tiplerinin de kullanıldığı Tablo 1'den de görülmektedir.

İncirin *in vitro* mikroçoğaltım çalışmaları incelendiğinde, eksplant başına elde edilen en yüksek ortalama sürgün sayıları ve çoğaltım katsayıları ile ilgili farklı sonuçların elde edildiği anlaşılmaktadır. Kumar vd. [54] *'Gular'* incir çeşidinde apikal tomurcuk eksplantlarının

2 mg/L BAP ve 0.2 mg/L NAA içeren MS besin ortamında kültüre alınması sonucunda, eksplant başına 4.8 adet sürgün sayısının elde edildiğini bildirmişlerdir. Fráguas vd. [50] *'Roxo de Valinhos'* incir çeşidinde nod eksplantlarının 0.5 mg/L Kin eklenen WPM besin ortamında kültüre alınması ile en yüksek çoğaltım katsayılarını 2.4-2.6 olarak belirlemişlerdir. Hepaksoy ve Aksoy [55] *'Sarılop Clone 37'* incir çeşidinde sürgün ucu eksplantlarının 1.0 mg/L IBA, 1.0 mg/L GA_3 ve 5.0 mg/L BA içeren MS besin ortamında kültüre alınması sonucunda, en yüksek çoğaltım katsayısını 2.69 olarak elde etmişlerdir. Kim vd. [56] '*Seungjung Dauphine'* incir çeşidinde yaprak eksplantlarının 2 mg/L BAP ve 0.5 ya da 1 mg/L TDZ'nin kombinasyonlarını içeren MS besin ortamında kültüre alınması ile eksplant başına en yüksek ortalama çoklu sürgün sayısı 10.8 olarak belirlenmiştir. Darwesh vd. [51] *F. carica* L. bitkisinde sürgün ucu eksplantlarının 5 mg/L BA ve1 mg/L GA_3 içeren MS besin ortamında kültüre alınması sonucunda, eksplant başına en yüksek sürgün sayısını 7.25 olarak saptamışlardır. Danial vd. [57] *F. carica* L.'nin sürgün ucu eksplantlarının 3 mg/L BAP içeren MS besin ortamında kültüre alınması ile eksplant başına 5.6 sürgün sayısı elde etmişlerdir. Bayoudh vd. [23] *'Soltani'* incir çeşidinin sürgün ucu eksplantlarının 0.5 mg/L BAP, 0.1 mg/L NAA ve 0.1 mg/L GA_3 içeren MS besin ortamında kültüre alınması sonucunda, eksplant başına en yüksek sürgün sayısını 16.91 olarak belirlemişlerdir. Moniruzzaman vd. [47] *'Masui Dauphine'* çeşidinde sürgün tomurcuk eksplantlarının 0.5 mg/L BAP ve 0.2 mg/L NAA kombinasyonunu içeren MS besin ortamında kültüre alınması ile eksplant başına 2.45 sürgün sayısının elde edildiğini bildirmişlerdir. Mitrofanova vd. [58] sekiz *F. carica* L. çeşidinde apikal tomurcuklu sürgün uçlarının 0.5–2.0 mg/L BAP ve 0.1–0.5 mg/L NAA içeren WPM besin ortamında kültüre alınması sonucunda, eksplant başına 15–25 olarak sürgün sayısını belirlemişlerdir. Shahcheraghi ve Shekafandeh [59] 'Bargchenari', 'Dehdez' ve 'Runu' isimli üç incir çeşidinin nod eksplantlarının, 0.5 mg/L BAP ve 0.2 mg/L 2IP eklenen MS besin ortamında kültüre alınması ile eksplant başına elde edilen sürgün sayılarını *'Runu'* incir çeşidi için 13.67 ve '*Bargchenari'* çeşidi için ise 8.8 olarak saptamışlardır. Patah vd. [60] *Ficus carica* L.'nin gövde eksplantlarının 1 mg/L BAP MS besin ortamında kültüre alınması sonucunda, eksplant başına 2.57 sürgün sayısını belirlemişlerdir. Prabhuling ve Huchesh [61] *'Brown Turkey'* incir çeşidinde nod eksplantlarının 1 mg/L BAP ve 0,10 mg/L NAA içeren MS besin ortamında kültüre alınması ile eksplant başına 3.50 sürgün sayısının saptandığını bildirmişlerdir. Ling vd. [62] Japon *'BTM 6'* incir çeşidinde aksiller sürgün ucu eksplantlarının 2 mg/L BAP içeren MS ortamında kültüre alınması sonucunda, eksplant başına en yüksek sürgün sayısını 1.67 olarak belirlemişlerdir. Al-Zahrani vd. [63] '*Kadotta'* çeşidinde sürgün ucu meristemleri eksplantlarının 3 mg/L BAP, 0.5 mg/L Kin ve 0.5 mg/L 2IP kombinasyonlarını içeren MS besin ortamında kültüre alınması ile eksplant başına 8.5 sürgün sayısını elde ettiklerini ifade etmişlerdir. Shatnawi vd. [46] *'Salti* Kodari 'incir çeşidinde sürgün ucu eksplantlarının 0.4 mg/L BAP ve 0.2 mg/L IBA kombinasyonunu içeren MS besin ortamında kültüre alınması sonucunda, eksplant başına düşen sürgün sayısını 4.2 olarak saptamışlardır. Sahraroo vd. [64] *'Sabz'* incir çeşidinde sürgün ucu meristemlerinin 2 mg/L BAP içeren MS besin ortamında kültüre alınması ile eksplant başına 2.4 adet sürgünün elde edildiğini belirlemişlerdir. Abdolinejad vd. [65] *'Sabz'* incir çeşidinde gövde eksplantlarının 4.54 µM TDZ, 1.07 µM NAA ile 17.68 µM BAP kombinasyonlarını içeren MS besin ortamında kültüre alınması sonucunda, indirekt rejenerasyon yoluyla sürgün çoğaltımında eksplant başına ortalama 6.9 adet sürgünün elde edildiğini bildirmişlerdir. Sriskanda vd. [67] *'Golden Orphan'* incir çeşidinin nodal eksplantlarını 0.8 mg/L BAP ve 0.5 mg/L IAA kombinasoyonunu içeren MS besin ortamında kültüre aldıklarında, eksplant başına 4.15 adet sürgün sayısını elde etmişlerdir.

3.2 İncir bitkisinde in vitro rejenerasyon

In vitro doku kültürü çalışmalarında bitki rejenerasyonu (morfogenez), organogenez (organ oluşumu) ve somatik embriyogenez (somatik embriyo oluşumu) süreci ile gerçekleşmektedir. Hem organogenez hem de embriyogenez doğrudan veya kallus fazı aracılığı ile dolaylı olarak meydana gelebilmekte ve bu süreç, kültüre alınan eksplantların genotipinden etkilenmektedir [78]. *In vitro* vejetatif üretimin ilk aşamasında, eksplant alınacak bitkilerin seçiminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. İyi gelişmiş, sağlıklı bitkilerle kültüre başlanması, başarı şansını artırarak temiz kültür elde edilmesini kolaylaştırmaktadır. Daha sonraki aşamada, meristem, tomurcuk veya sürgün ucu gibi eksplantların steril olarak izolasyonu gerçekleştirilmektedir. Son aşama ise, eksplantın rejenerasyon yeteneğini kaybetmeden, sürekli çoğaltmanın sağlanmasıdır [79]. *F. carica* L.'nin rejenerasyonu ile ilgili yapılmış olan birçok çalışma bulunmakla birlikte, farklı faktörlerin rejenerasyon üzerindeki etkilerinin çok fazla ele alınmadığı görülmüştür. Sonuçta, *F. carica* L.'nin rejenerasyonu üzerine istenen ölçüde çoğalmayı sağlayan yeterli bir çalışma henüz bulunmamaktadır. Bu nedenle, kolay ve verimli bir *in vitro* rejenerasyon yönteminin sağlanması amacıyla çalışmalar devam etmektedir. Verimli bir rejenerasyonun sağlanabilmesi için de ortam ve kültür sistemi optimize edilmelidir [80]. İncir'in *in vitro* koşullarda gerçekleştirilen rejenerasyon çalışmalarında genellikle ortam bileşenlerinin etkileri incelenmiştir. Kallus dokusu, bitkinin yaralanmış veya kesilmiş bölgelerinde oluşan düzensiz şekilli parankima hücrelerinin bir araya gelerek oluşturduğu gruplardır [81]. Bitki rejenerasyonunda klonal çoğaltım için özellikle kallus aracılı protokollerin kullanılması ile somaklonal varyasyon üretimi büyük bir zorluk olarak görülmektedir. Hücre veya dokulardaki epigenetik veya kalıcı genetik değişikliklerin bir sonucu olabilmekte ve rejenerantların genetik doğruluğunun kaybolmasına yol açabilmektedir [65]. Bitkiden elde edilen ürünlerin insan yararına kullanılabilmesi için kallus kültürü biyoteknolojide çok önemli bir yere sahiptir. Kallus kültürü; farmasötik, gıda, tarım ve kozmetik endüstrileri için faydalı ürünler elde etmek üzere tasarlanabilen, farklılaşmamış bir kütle halindeki bitki dokularının çoğaltılmasını içermektedir [82].

Tablo 1. İncir bitkisinde gerçekleştirilen çeşitli mikroçoğaltım çalışmaları.

İncir (*Ficus carica* L.) Genotipi	Besin Ortamı	Bitki Büyüme Düzenleyicisi (mg/L)	Eksplant tipi	Kaynakça
'Calimyma', 'Caprifig', 'Excel', 'Osborne Pacific', 'Pasquale', 'Tena' ve 'Zidi'	MS	0.1 mg/L BA, 0.18 mg/L NAA ve 0.03 mg/L GA3 ile sürgün indüksiyonu 0.5 mg/L NAA ve 0.5 mg/L IBA ile kök indüksiyonu	Sürgün ucu eksplantları	[67]
'Kalamon'	MS	0.5 mg/L BA, 0.1 mg/L IBA, 0.1 mg/L GA3 ve 89 mg/L PG ile sürgün indüksiyonu	Sürgün ucu eksplantları	[68]
'Bursa Siyahi'	MS	1 mg/L BA, 1 mg/L NAA ve 3 mg/L GA3	Sürgün ucu meristemi	[69]
'Bursa Siyahı'	LS	0.5 mg/L BAP, 0.1 mg/L IBA, 0.1 mg/L GA3, 89 mg/L PG ile sürgün indüksiyonu 0.5 veya 1 mg/L BAP, 1 veya 2 mg/L IBA ve 89 mg/L PG ile kök indüksiyonu	Sürgün ucu meristemi	[70]
'Roxo de Valinhos'	MS, B5, Knudson, White ve WPM	*	Aksiller tomurcuklar	[71]
Ficus carica L.	WPM	Farklı dozlarda Kin (0, 0.5, 1, 2 ve 4 mg/L) ve GA3 (0, 2, 4, 6 ve 8 mg/L) ile sürgün ve kök indüksiyonu	Nod eksplantları	[72]
'Roxo de Valinhos'	WPM	Farklı dozlarda BA (0, 0.5, 1.0, 2.0 ve 4.0 mg/L), Kin (0, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 mg/L) ve GA3 (0, 2.0, 4.0, 6.0, ve 8.0 mg/L) ile sürgün ve kök indüksiyonu	Nod eksplantları	[50]
'Sarılop'	MS	8 mg/L NAA ile sürgün büyümesi 1 mg/L IBA, 1 mg/L GA3, 5 mg/L BA ve 89 ml/L PG ile kök indüksiyonu	Sürgün ucu eksplantları	[55]
'Roxo de Valinhos'	WPM	NAA (0.0, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0 mg/L) ve GA3 (0,0, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0 mg/L) ile kök indüksiyonu	Nod eksplantları	[73]
'Roxo de Valinhos'	WPM	0,5 mg/L Kin ile sürgün indüksiyonu	Nod eksplantları	[74]
'Roxo de Valinhos', 'Kadotta', 'Uruguay' ve 'Celeste'	MS	IBA ile kök indüksiyonu	Yaprak primordia ve meristemi	[75]
'Sultany', 'Aboudi', 'White Adcy'	MS	2.5 mg/L BA, Kin, 2IP ve Ads	Sürgün eksplantları	[25]
'Conadria' ve 'Black Mission'	¼ MS, ½ MS, MS ve 2MS	0.5 mg/L BAP ile sürgün indüksiyonu	Sürgün ucu eksplantları	[76]
'Sultany' ve 'Aboudi'	MS	0.5 mg/L BAP ile sürgün indüksiyonu	Sürgün ucu eksplantları	[77]
Ficus carica L.	MS	Farklı dozlarda BA, Kin ve GA3 ile sürgün indüksiyonu	Sürgün ucu eksplantları	[51]
'Zidi' (ZDI),'Soltani' (SNI), 'Bither Abiadh' (BA)	MS	Farklı dozlarda BAP, NAA ve GA3 ile sürgün ve kök indüksiyonu	Sürgün ucu eksplantları	[23]
'Masui Dauphine'	MS	0.5 mg/L BAP ve 0.2 mg/L NAA ile sürgün indüksiyonu	Sürgün tomurcuk eksplantları	[47]
'Bargchenari', 'Dehdez' ve 'Runu'	½ MS ve MS	2, 4, 6 ve 8 mg/L Kin, 0.5 mg/L BA, 0.2 mg/L 2IP, 0.2 mg/L NAA ve 1 mg/L GA_3 ile sürgün indüksiyonu 0, 0.5, 1 veya 1.5 mg/L IBA ile kök indüksiyonu	Nod eksplantları	[59]
Ficus carica L.	MS	Farklı dozlarda BAP, NAA ile sürgün ve kök indüksiyonu	Sürgün ve gövde eksplantları	[60]
'Kadota' ve 'Dattero'	MS	Farklı dozlarda BAP, 2-IP, Kin ve NAA ile sürgün ve kök indüksiyonu	Sürgün ucu meristemleri	[63]
'Salti Kodari'	MS	Farklı dozlarda BAP, Kin, NAA, IBA ve IAA ile sürgün ve kök indüksiyonu	Sürgün ucu eksplantları	[46]
'Golden Orphan'	MS	Farklı dozlarda BAP, Kin, TDZ, NAA, IBA ve IAA ile sürgün ve kök indüksiyonu	Nod eksplantları	[66]

*: belirtilmemiş

İncir bitkisinde gerçekleştirilen kallus kültürü çalışmalarında farklı eksplant kaynakları kullanılmış ve bu kallusların sahip oldukları aktif bileşiklerin biyokimyasal olarak etkileri incelenmiştir [57]. *F. carica* L., *in vitro* morfogenez yeteneği açısından rekalsitrant, odunsu çok yıllık bir bitki olarak bilinmektedir. Bu nedenle, *in vitro* teknikler yoluyla kaliteli incirlerin seçimine bağlı herhangi bir biyoteknolojik programın başarısı, büyük ölçüde yüksek verimli bir morfogenez protokolünün oluşturulmasına bağlıdır. Bu nedenle, uygun bir eksplantın seçimi ve besin ortamındaki bitki büyüme düzenleyicilerinin doğru kombinasyonunun optimize edilmesi, verimli bir rejenerasyon protokolü oluşturmak için kritik faktörlerdir [65].

Bununla birlikte, ışığın *in vitro* morfogenezi etkileyen çok önemli bir unsur olması nedeniyle incir rejenerasyon çalışmalarında ışık kaynakları üzerinde de durulmuştur. Bilindiği üzere, floresan ışığı (Flu) geniş frekans spektrumu (350 ile 750 nm arası) ile genellikle bitki doku kültürü odalarında kullanılmaktadır. Ancak bu ışık frekansı, bitki büyümesini teşvik etmede oldukça yetersiz kalmakta ve yüksek miktarda enerji tüketerek ısı ürettiği için fotostres yaratmaktadır. Bu etkilerden kaçınmak için ise bitkilerle arasının biraz uzak olmasına dikkat edilmektedir. Yapılan araştırmalarda, maliyetleri azaltabilecek ve doku kültüründe bitkilerinin üretimini ve kalitesini artırabilecek enerji açısından verimli bir ışığa sahip yeni tekniklerin de üzerinde durulmuştur. Işık yayan diyotlar (light-emitting diode-LED), çeşitli avantajlar sundukları için *in vitro* bitki büyümesi için umut verici bir ışık kaynağı olarak önerilmiştir [83]. LED lambaların düşük enerji tüketimi, bitki çoğaltımını *in vivo* ve *in vitro* koşullarda daha ekonomik hale getirmektedir. Buna ek olarak, LED enerjisinin çoğu, ısı üretimi minimum düzeyde tutarken, fotosentetik ve fotomorfogenik tepkileri optimize edecek şekilde çeşitli biçimlerde uygun bir aydınlatma gücüne dönüştürebilmektedir. Tüm bu nitelikler LED'leri bitki doku kültürü için mükemmel bir ışık kaynağı yapmıştır. Bu nedenle, LED aydınlatmanın kullanımı bitkilerin hızlı ve büyük ölçekli üretimi açısından son zamanlarda daha çok ilgi çekmiştir [83]. Fotoperiyodizmin etkileri üzerine yapılan bazı çalışmalar, bitkicik rejenerasyonunun, ışık varlığında klorofilin fotooksidasyon ve zincirleme reaksiyonundan etkilendiğini kanıtlamıştır. Bununla birlikte, fotoperiyodizmin incirin bitkicik rejenerasyonu üzerindeki etkisine ilişkin rapor edilmiş bir çalışma henüz bulunmamaktadır [84].

3.2.1 Organogenez

Bitki gelişimine olanak sunan uygun ortam koşulları, bitki sağlığı üzerinde de belirgin bir etki oluşturmaktadır. İyi kalitedeki bir bitkinin yüksek verimde üretilmesi, besin ortamının fiziko-kimyasal özelliklerine bağlıdır [85]. Sürgün indüksiyonunun sağlanmasının amaçlandığı bir besin ortamında, genellikle oksin ve sitokinin hormonlarının doğru kombinasyonlarının kullanılması esastır. Besin ortamında kullanılan sitokinin miktarının oksin miktarından fazla olması durumunda, sürgün ve yaprak gelişimi indüklenebilmektedir. Eğer, besin ortamındaki sitokinin miktarı oksine göre düşükse, kök başlatımının yanı sıra bitki büyümesi de uyarılmaktadır. Aynı zamanda, besin ortamındaki sitokinin ve oksin oranının dengelenmesi halinde sürgün, yaprak ve kök gelişimi de dengelenmektedir [52]. Ayrıca bir karbon ve enerji kaynağı olarak işlev gören sükroz, *in vitro* besin ortamının çok önemli bir bileşenidir [86].

İncirle ilgili yapılan birçok çalışmada, farklı besin ortamları ile değişik tipte ve konsantrasyonlarda bitki büyüme düzenleyicilerinin kombinasyonları kullanılarak bitkinin çeşitli eksplantlarının kültüre alınması ile sürgün rejenerasyonu gibi organogenezin indüklendiği gösterilmiştir [59].

Tablo 2, incir bitkisinde gerçekleştirilen çeşitli *in vitro* doku kültürü organogenez çalışmalarının bir özetini içermektedir. Buna göre, en fazla MS besin ortamının kullanıldığı, MS besin ortamının yanı sıra WPM besin ortamının da kullanıldığı belirlenmiştir (Tablo 2). İncirde sürgün rejenerasyonunu teşvik etmek için en çok sırasıyla BAP, TDZ ve Kin sitokininlerinin kullanımı tercih edilmiştir. Çalışmalarda kök rejenerasyonunun teşvikinde ise sıklıkla NAA, IBA ve IAA oksinleri ele alınmıştır. İncirde organogenez çalışmalarında, sürgün, yaprak sürgün ucu ve apikal tomurcuk eksplantlarının yanı sıra nod, sürgün ucu meristemi ve aksiller tomurcuklarının da kullanıldığı belirlenmiştir (Tablo 2).

3.2.2 Somatik embriyogenez

Biyoteknolojinin önemli konularından birisi olan somatik embriyogenez, zigotik olmayan tüm bitki hücrelerinin embriyolara farklılaşarak fertil bitkiler üretmesini sağlayan ve üreme özelliği olmayan hücrelerin içsel totipotensi özelliğini kullanan bir yöntem olarak adlandırılmaktadır [92]. Somatik embriyo prosesi genel olarak iki farklı yolla gerçekleşebilmektedir. Doğrudan somatik embriyogenez de herhangi bir ara basamak (kallus fazı) gözlenmezken; dolaylı somatik embriyogenezde ara bir faz olarak kallus oluşumu gözlenebilmektedir [93]. Kallus fazının görüldüğü süreçlerde yüksek frekansta somaklonal varyasyon görülebilirken, doğrudan somatik embriyogenezde donör bitki ile birebir benzer özellikte bitkiler elde edilmektedir [94].

Soliman vd. [94] incirde yaptıkları çalışmada, farklı BA, NAA/2,4-D ve Kin ile kombinasyonlarının yaprak eksplantlarında kallus oluşumu üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuçlar kallus oluşumu için en iyi ortamın 2.0 mg/L 2,4-D ve 0.2 mg/L Kin içeren MS olduğunu göstermiştir. Dolaylı somatik embriyogenez aracılığı ile en iyi bitkicik farklılaşması ise 0.25 mg/L NAA ile 30 mg/L 2-IP (N_6-2-izopentenil adenin) ve 7 mg/L TDZ konsantrasyonlarında (sırasıyla %83 ve %79 rejenerasyon verimliliği ile) elde edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada eksplantlar, gus-intron ve bar genlerini barındıran pISV2678 plazmidi aracılığı ile *Agrobacterium* ve mikromermi bombardımanı kullanılarak transforme edilmişlerdir. *Agrobacterium* kullanılarak en yüksek transformasyon etkinliğinin (%17.5), eksplantların bakterilerle 30 dakika boyunca kokültürü ile elde edilmiştir.

Tablo 2. İnci bitkisinde gerçekleştirilen çeşitli organogenez çalışmaları

İncir (*Ficus carica* L.) genotipi	Besin ortamı	Bitki büyüme düzenleyicisi (mg/L)	Eksplant tipi	K*
'Gular'	MS	2.0 mg/L BAP ve 0.2 mg/L NAA	Apikal tomurcuklar	[54]
'Masui Dauphine'	MS	Farklı dozlarda 2, 4-D, TDZ ve 0.5 mM PG	Yaprak eksplantları	[87]
'Seungjung Dauphine', 'Bongraesi', 'Banane', 'Brunswick', 'Violet Dauphine', 'Brown Turkey' ve 'The King'	MS	0.5 mg/L veya 1.0 mg/L TDZ ile 2 mg/L IBA	Yaprak eksplantları	[56]
Ficus carica L.	MS	Farklı dozlarda BAP, Kin, 2,4-D, IBA ve NAA	Sürgün ve yaprak eksplantları	[57]
'Aboudy'	MS	0.1 mg/L NAA	Sürgün ucu meristemi	[86]
'Poona Fig', 'Brown Turkey', 'Conadria' ve 'Deanna' 'Belyiy Ranniy', 'Die Dalmatie', 'Figue Blanche', 'Figue Jaune', 'Limonno-Zheltyiy', 'Pomoriyskiy', 'Sabrutsiya Rozovaya', 'Smena', 'Violette' ve'Yantarnyiy'	MS	Farklı dozlarda BAP, IBA ve GA_3	Aksiller sürgün uçları	[88]
'Brown Turkey'	WPM ve MS	Farklı dozlarda BAP, Kin, TDZ, 2,4-D, NAA, IBA, IAA ve GA_3	Apikal tomurcuklu sürgün uçları	[58]
'Brown Turkey'	MS	Farklı dozlarda BAP, NAA, IBA	Nod eksplantları	[61]
Japon 'BTM 6'	MS	Farklı dozlarda BAP, TDZ, Kin, Zeatin, IBA, IAA, NAA	Aksiller sürgün uçları	[62]
Ficus carica L.	MS	Farklı dozlarda BAP	Sürgün eksplantları	[89]
'Black Jack'	WPM	BAP	Apikal tomurcuk	[90]
'Violette de Solliès'	MS	1.0 mg/L BAP ve farklı dozlarda hindistan cevizi suyu ve muz homojenatı	Sürgün eksplantları	[91]

*: Kaynakça

Mikromermi bombardımanı kullanılarak kaydedilen en yüksek transformasyon verimliliği ise, %12 olarak belirlenmiştir.

Turan vd. [95] tarafından yapılan bir çalışmada, iyi kalitede sofralık ve kurutmalık bir incir çeşidi olan 'Sarılop' çeşidinin yaprak eksplantları kullanılarak doğrudan ve dolaylı somatik embriyogenez yoluyla somatik embriyo oluşumunun eldesi amaçlanmıştır. Doğrudan somatik embriyo oluşumu için yaprak eksplantları, farklı dozlarda TDZ ve 2-IP içeren MS ortamlarında kültüre alınmış ve kallus oluşumu, eksplant uzaması, kök rejenerasyonu ve embriyo oluşumu gözlenmiştir. Eksplant başına oluşan somatik embriyo sayısı 0.83'tür. Çalışmada en yüksek kök oluşum oranı %20 olarak 2 mg/L TDZ ve 8 mg/L 2-IP kombinasyonunu içeren MS besin ortamında elde edilmiştir. İncir yaprak eksplantlarında kallus oluşumları %66.66 oranında elde edilmekle birlikte, bu kalluslardan somatik embriyo oluşumu gözlenmemiştir.

Mitrofanova vd. [58] tarafından *'Smena'*, *'Figue Jaune'* ve *'Die Dalmatie'* incir çeşitlerinde morfogenezin elde edilmesinin en önemli yolunun genç incir bitkilerinin yaprak segmentlerinden *in vitro* somatik embriyogenezin sağlanması olduğu ifade edilmiştir. Sürgünler, somatik embriyolardan %60-90 oranlarında rejenere edilmiştir. Bu çeşitlerde morfogenik yapıların histolojik analizleri yapıldığında, mikrosürgünlerin tabanında spontan ve indüklenmiş rizogenezin meydana geldiği gözlenmiştir.

Tablo 3'te incir bitkisinde yapılan somatik embriyogenez kültürü çalışmaları gösterilmektedir. Bu *in vitro* somatik embriyogenez çalışmalarında, farklı konsantrasyonlardaki çeşitli sitokinin ve oksin tiplerini içeren MS ve WPM besin ortamlarının esas alındığı ve en çok da yaprak eksplantlarının kullanımının tercih edildiği anlaşılmaktadır (Tablo 3).

3.2.3 Kallus kültürleri

Bitki doku kültürleri, temel bilim ve ticari uygulamalarda önemli birer teknik olmaktadırlar. Bu yöntemlerden birisi olan kallus kültürleri, tüm bitkilerde yaralı dokuların farklılaşmamış hücreler ile geri kazanması mantığını temel alır. Bu kallus dokuları farklı biyoteknolojik yöntemler amacıyla *in vitro* olarak kültüre alınabilmektedir. Bitkilerin neredeyse tüm kısımları kallus üretimi amacıyla kullanılabilmektedir. Düzenli altkültürlemeler ile, kalluslar uzun süreli olarak muhafaza edilebilirler. Bu kallus hücreleri, farklılaşmamış meristematik hücrelere benzemektedirler. Uygun kültür ortamı içerisinde bu kallus hücreleri tüm bir bitkiyi oluşturabilme potansiyeline sahiptirler [97]. *In vitro* seleksiyon, somaklonal varyasyondan yararlanma ve genetik transformasyon gibi doku kültürü tekniklerinin etkin kullanımı, bitki rejenerasyonu yapabilen kararlı kallus kültürlerini başlatma ve oluşturma yeteneğine bağlıdır [98]. Kallus indüksiyonu incir çalışmalarında kullanılan diğer önemli tekniklerden biridir. Bugüne kadar incirde yapılan çalışmalarda, bitkinin farklı kısımlarından kallus indüksiyonu teşvik edilebilmiştir [57, 99].

Tablo 3. İnci bitkisinde gerçekleştirilen somatik embriyogenez çalışmaları

İncir (*Ficus carica* L.) genotipi	Besin ortamı	Bitki büyüme düzenleyicisi (mg/L)	Eksplant tipi	K*
'Sultani'	MS	0.0–10 mg/L BAP 0.0–10 mg/L Kin, 0.0–10 mg/L TDZ, 0.0–10 mg/L 2IP veya 0.0–1.0 mg/L NAA	Yaprak eksplantları	[94]
'Belyiy Ranniy', 'Die Dalmatie', 'Figue Blanche', 'Figue Jaune', 'Limonno-Zheltyiy', 'Pomoriyskiy', 'Sabrutsiya Rozovaya', 'Smena', 'Violette' ve'Yantarnyiy'	WPM ve MS	Farklı dozlarda BAP, Kin, NAA, TDZ, 2,4-D, IBA, IAA ve GA_3,	Apikal tomurcuklu sürgün uçları	[58]
'Sarılop'	MS	Farklı dozlarda Kin, TDZ, 2,4-D ve 2IP	Yaprak eksplantları	[96]

*: Kaynakça

Fisin enzimi (EC 3.4.22.3), *Ficus* bitki grubunun lateksinden elde edilebilen bir proteaz enzimidir [100]. Nassar ve Newbury [101] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, incirin gövde eksplantlarından elde edilen kalluslarda, çeşitli immünokimyasal teknikler ile fisin içeriği belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada, besin ortamında bulunan bitki büyüme düzenleyicisi içeriğinin fisin içeriği üzerinde etkili bir parametre olduğu tespit edilmiştir.

Cormier vd. [102] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, *Ficus carica*'nın gövde eksplantlarının kültüre alınmasıyla oluşturulan kallusları, termostabil sistein proteaz içeriği açısından incelenmiş ve elde edilen kallusun önemli miktarda proteaz içerdiği bildirilmiştir.

Dhage vd. [98] yaptıkları çalışmada, farklı *in vitro* kültür koşullarında *'Brown Turkey'*, *'Conadria'*, *'Deanna'* ve *'Poona'* isimli dört yerel incir genotipinde, sürgünlerden elde edilen yaprak eksplantları kullanılarak kallus uyarılması ile verimli bir *in vitro* rejenerasyon protokolü geliştirmeyi amaçlamışlardır. En iyi kallus gelişimi, 2.0 mg/L TDZ ve 4.0 mg/L 2-IP içeren MS ortamında (CM3) gözlenmiştir. Genotipler arasında *'Brown Turkey'*, kallus oluşumuna en iyi yanıtı (%85.8) vermiştir. *'Brown Turkey'* çeşidinde petiolde en yüksek kallus uyarılması (%100) sağlanmış, bunu *'Poona'* (%71.7), *'Deanna'* (%58.4) ve *'Conadria'* (%48.3) izlemiştir.

Sriskanda vd. [103] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, incir bitkisinin *'Violette de Soillès'* çeşidinin gövde eksplantlarından kallus indüksiyonunda TCL (Thin Cell Layer-ince hücre tabaka) tekniğinin etkinliğinin incelenmesi amaçlanmıştır. TCL, kallusu indüklemek için eksplantların ince kesitleri ile birçok bitki türünün mikroçoğaltılmasında kullanılan bir teknik olarak bilinmektedir. 3.0 ile 4.0 mm çapındaki gövde eksplantları, yaklaşık 0.5 ile 0.8 mm'lik bir kalınlıkta kesilmiş ve farklı dozlarda BAP ve NAA içeren MS ortamında kültüre alınmıştır. Sonuçlar, 1.0 mg/L BAP, 0.5 mg/L NAA ve 2.0 mg/L BAP ve 0.5 mg/L NAA içeren MS ortamının, %100 kallus indükleme oranıyla en yüksek miktarda yarı-kırılgan kallusu indüklediğini göstermiştir.

Tablo 4'te incir bitkisinde yapılan kallus kültürü çalışmaları gösterilmektedir. Bu kapsamda, kallus eldesine yönelik olarak MS ve B5 besin ortamlarının kullanıldığı belirlenmiştir. Çalışmalarda eksplant tipi olarak da en çok gövde ve yaprak eksplantları kullanılmıştır (Tablo 4).

Tablo 4. İnci bitkisinde gerçekleştirilen kallus kültürü çalışmaları

İncir (*Ficus carica* L.) genotipi	Besin ortamı	Bitki büyüme düzenleyicisi (mg/L)	Eksplant tipi	K*
Ficus carica L	B5	0.2 mg/L Kin ve 0.5 mg/L NAA	Gövde eksplantları	[102]
'Brown Turkey', 'Conadria', 'Deanna' ve 'Poona'	MS	2.0 mg/L TDZ ve 4.0 mg/L 2IP veya IBA	Yaprak eksplantları	[98]
'Sabz' ve 'Torsh'	MS	Farklı dozlarda BAP, TDZ, IBA ve NAA	Gövde eksplantları	[65]
'Violette de Soillès'	MS	Farklı dozlarrda BAP, TDZ ve NAA	Gövde eksplantları	[103]

*: Kaynakça

3.3 İncir bitkisinde meristem kültürleri

Çeşitli abiyotik ve biyotik kısıtlamalar, incirin meyve gelişimini sınırlamakta ve gelirin azalmasıyla birlikte üretim alanlarının kademeli olarak ortadan kalkmasına neden olmaktadır. Başta incir mozaik hastalığı olmak üzere çeşitli virüs hastalıkları, sağlıklı incir meyve bahçelerinin gelişmesini engelleyerek üretimi sınırlayıcı şekilde tüm üretim alanlarında bir tehdit olarak yayılma göstermektedir [23]. İncir mozaik hastalığı, incir üretimini ekonomik açıdan etkileyen önemli bir hastalık olmakla birlikte, yenilebilir incirin yetiştiği bölgelerde doğal olarak bulunmaktadır. İncir meyvelerinin verimini ve kalitesini düşürerek yıkıcı kayıplara neden olan önemli virüsler arasında incir mozaik virüsü yer almaktadır [104]. İncir mozaik virüsü, inciri enfekte eden diğer RNA virüslerine göre daha sık görülen bir etmendir ve mozaik hastalığının başlıca tetikleyicisidir [105]. İncir mozaik hastalığına yol açan viral etmenler tohumla taşınmamaktadır. Uzun yıllar tanımlanmamış olmasına rağmen, bu etmenlerin taşınmasında önemli ölçüde *Eriyophidae* familyasına ait *Aceria ficus* ve *Lepidosaphes*

ficus akarları etkili olmaktadır. Ayrıca mekanik olarak aşı ve çelik ile de taşınabildiği ifade edilmiştir [106].

İncirdeki bitkisel üretim düşüşü, geleneksel çoğaltım yöntemlerinin kullanılması ve sistemik virüslerin, özellikle de incir mozaik virüsünün kalıcı olmasından kaynaklanmaktadır. Çelikle üretim sırasında virüsler, incir genetik materyalinde yayılma gösterirler. Bitki ıslahçıları, viral enfeksiyonun ortadan kaldırılması veya engellenmesi için kimyasal kontrol yöntemlerinin etkisizliği nedeniyle, hastalıktan ari yüksek kaliteli, kalıtımsal olarak kararlı ve türlerine sadık olan stok incir bitkilerini elde etmek üzere sürgün ucu ve meristem kökenli mikroçoğaltıma dayalı doku kültürü tekniklerinin uygulanmasına giderek daha fazla yönelmişlerdir [63]. Dünya çapında yaygın bir hastalık olan incir mozaiği ile ilişkili bazı virüslerden arındırılmış incir bitkilerinin elde edilmesi için genellikle termoterapi, *in vitro* meristem ucu kültürü ve her iki tekniğin kombinasyonu kullanılmıştır [107]. Meristemler, vasküler sistemlerinin olmaması nedeniyle çoğu durumda virüssüzdür. Çalışmalar, daha küçük boyutlardaki meristemlerin kültüre alınmasının başarılı bir şekilde virüssüz bitkilerin üretimiyle sonuçlandığını göstermiştir Ayrıca yüksek sıcaklıklar virüs transkripsiyon enzimlerini inhibe ederek, virüs replikasyonunu önlemekte ve virüsün apikal meristeme doğru taşınmasını azaltmaktadır [108]. Bu nedenle, meristem kültürleri çok sayıda sağlıklı bitki elde etmek için başarılı biyoteknolojik bir alternatif teknik haline gelmiştir [109]. Meristemden elde edilen bitkicikler, kallustan üretilen bitkiciklere göre şekil ve form açısından donör bitkiye daha benzer özellikler göstermiş, ayrıca daha kısa sürede ve daha yüksek derecede virüs eliminasyonu ile çok sayıda bitki çoğaltılabilmiştir [63]. *In vitro* uygulamalarından biri olan termoterapi, bitki türlerinde virüs eliminasyonu için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, termoterapi uygulanmış sürgünlerle ilişkili en yaygın problemler, sürgün ucu nekrozu ve hiperhidrisitedir. Bu problemler, virüssüz bitkilerde önemli kayıplara neden olmaktadır [110]. Meristem kültürü ve termoterapiye ek olarak yapılan çalışmalarda, kemoterapi, elektroterapi ve kriyoterapi gibi diğer uygulamalar da kullanılmaktadır. Ancak bu uygulamaların her biri sırasında eksplantlar; düşük hayatta kalma oranlarına, büyüme inhibisyonuna, bodur büyümeye veya anormal morfolojiye yol açabilecek bir dizi baskıya maruz kalmaktadır [111].

Çömlekçioğlu vd. [112] yaptıkları çalışmada, *'Bursa Siyahi'* ve *'Alkuden'* isimli iki incir genotipinin kısa ve uzun süreli termoterapi muamelesi ve meristem kültürü ile mozaik virüsü içermeyen incir bitkisi elde etmeye çalışmışlardır. Sürgün oluşumu, *'Bursa Siyahi'* çeşidinde, uzun süreli bir termoterapi uygulaması ile 0.2 mg/L GA_3+0.5 mg/L BA+0.1 mg/L IBA içeren MS ortamında en yüksek değeri verirken, *'Alkuden'* çeşidinde ise en yüksek sürgün oluşumu termoterapi uygulaması olmadan, 0.2 mg/L GA_3+0.2 mg/L BA+0.1 mg/L IBA içeren MS besin ortamında elde edilmiştir.

Başarılı bir mikroçoğaltım, çoklu sürgün rejenerasyonuna dayalı apikal meristem ya da koltuk altı tomurcuk kültürleri kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Singh vd. [99] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, incir sürgün uçları *in vitro* kültüre alınarak mikroçoğaltım yapılmıştır. En yüksek sürgün oluşum yüzdesi (%83), 30 mg/L 2-IP içeren MS ortamında belirlenmiştir. En yüksek yaprak sayısı 3.0 mg/L BAP içeren MS ortamında elde edilmiştir. En yüksek sağkalım yüzdesi ise %100 olarak 10.0 mg/L BA ve NAA içeren MS ortamında saptanmıştır.

Sahraroo vd. [64] gerçekleştirdikleri bir çalışmada, *'Jaami-e-Kan'* ve *'Sabz'* iki İran incir çeşidine ait meristem uçlarını; sürgün çoğaltımı, kök uyarımı ve bitkicik rejenerasyonu için en iyi koşulları optimize etmek üzere *in vitro* koşullar altında kültüre almışlardır. Çalışmada, 0,2-0,4 mm ve 0,5–0,7 mm boyutlarındaki meristem uçları, 0.5, 1.0 ve 1.5 mg/L konsantrasyonlarda BA içeren MS ve B5 besin ortamlarına transfer edildikten sonra hayatta kalan meristemler, 0.5 mg/L BA ve 0.1 mg/L NAA içeren MS besin ortamına aktarılmışlardır. En yüksek meristem sağkalımı, *'Sabz'* çeşidinde 0.5-0.7 mm boyutundaki eksplantlardan 0.5 mg/L BA içeren MS besin ortamında kaydedilmiş ve mikrosürgün başına 2.4 sürgün ile en yüksek çoğaltım oranı 2 mg/L BA içeren MS besin ortamında elde edilmiştir. En yüksek oranda köklenmiş mikrosürgünler (%88.3) ise 1.5 mg/L IBA içeren MS besin ortamında belirlenmiştir. Sonuçlar, incir ağaçlarının meristem kültürü ile mikroçoğaltımında meristem boyutunun ve bitki büyüme düzenleyicilerinin varlığının önemli bir rol oynadığını göstermiştir.

Tablo 5, incir bitkisinde gerçekleştirilen meristem kültürü çalışmaları gösterilmektedir. Buna göre, en fazla MS besin ortamının kullanıldığı, ayrıca çalışmalarda B5, QL ve DKW besin ortamlarının da denendiği belirlenmiştir. Çalışmalarda eksplant tipi olarak sürgün ucu eksplantları ve sürgün ucu meristemleri kullanılmıştır (Tablo 5).

Tablo 5. İnci bitkisinde gerçekleştirilen meristem kültürü çalışmaları

İncir (*Ficus carica* L.) genotipi	Besin ortamı	Bitki büyüme düzenleyicisi (mg/L)	Eksplant tipi	K*
'Bursa Siyahi' ve 'Alkuden'	MS	Farklı dozlarda BA IBA ve GA_3	Sürgün ucu meristemleri	[112]
Ficus carica L.	DKW ve modifiye edilmiş QL	**	Apikal veya aksiller tomurcuklar ve sürgün ucu eksplantları	[107]
Ficus carica L.	MS	Farklı dozlarda BA Kin, NAA ve 2,4-D	Sürgün ucu eksplantları	[99]
'Jaami-e-Kan' ve 'Sabz'	MS ve B5	Farklı dozlarda BA, NAA ve IBA	Sürgün ucu meristemleri	[64]

*: Kaynakça, **:belirtilmemiş

3.4 *İncir bitkisinde protoplast kültürleri*

Protoplast; hücre duvarının enzimler ya da mekanik yollarla uzaklaştırılmasının ardından elde edilen izole tek hücrelerdir [113]. Protoplastlar, bitkilerde hücre çalışmaları için uygun bir sistem olarak kabul edilirler [114]. Toprak kaynaklı *Ceratocystis canker* hastalığına karşı direnç sağlamak için incir anaçları üzerine bir araştırma programı geliştirilmiştir. Genellikle incir ağaçlarının bu hastalığa direncinde çeşitler arası farklılıklar rapor edilmiş, ancak yapılan çalışmalar neticesinde tüm yaygın incir çeşitlerinin bir dereceye kadar bu hastalığa yakalandığı belirlenmiştir [115]. Yaygın incir (tohum ebeveyni) ile yabani tür *Ficus erecta* (polen ebeveyni) arasında yapay tozlaşma yoluyla türler arası hibridizasyon gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar bu türler arası hibridizasyonun *C. canker*'e dirençli yeni bir incir anacı kaynağı sağladığını göstermiştir. Protoplast rejenerasyonu ile incir çeşitlerinin geliştirilmesi hala çok sınırlıdır. Bununla birlikte, bitkilerin protoplast kültürü ile rejenerasyonu, bazı meyve türlerinde pratik ıslah için yeni ufuklar açmıştır. *Ficus*'un hücre süspansiyonlarından oluşturulan canlı protoplast kültürleri, önce bir inkübasyon ortamına tutulduktan sonra protoplastların MS tuzları, vitaminler ve glikoz içeren bir besin ortamına aktarılmasıyla elde edilmiştir. Hücre bölünmesi tespit edildikten sonra protoplast yoğunluğu $5x10^5$ canlı protoplast/cm^3 olarak belirlenmiştir [115, 116].

Protoplast kültürü, bitki ıslahında hücre düzeyinde uygulanan biyoteknolojik yöntemler arasında giderek daha fazla kullanılır hale gelmektedir. Mitrofanova vd. [117] tarafından *'Sabrutciya Rozovaya'* ve *'Datte de Naples'* incir çeşitlerine ait *in vitro* mikrosürgünlerin yaprak eksplantlarından protoplast izolasyonu üzerine ilk çalışmalar yapılmıştır. Bu değerli incir çeşitlerinin yaprak eksplantları, 0.1-0.5 mg/L NAA ve 0.5-2.0 mg/L BAP içeren modifiye WPM besin ortamında *in vitro* kültüre alınmıştır. Ardından bir yıkama ortamında yeniden süspansiyon haline getirme ve üç kez santrifüjleme sonucunda *'Sabrutciya Rozovaya'* (2×10^5) ve *'Datte de Naples'* (1.39×10^5) incir çeşitlerinde yeterli sayıda canlı protoplastın elde edilmesi sağlanmıştır.

3.5 *İncir bitkisinde saçaklı kök kültürleri*

Bitkiler, genellikle sekonder metabolitleri çok düşük miktarlarda üretir ve biriktirirler. Bu nedenle, yeterli miktarda aktif madde elde edebilmek için yüksek miktarlarda bitki materyalinin temin edilmesi önemlidir. Bu kapsamda saçaklı kökler, bu sorunun üstesinden gelmek ve daha yüksek miktarlarda sekonder metabolitleri veya yeni bulunan özel metabolitleri üretmek için iyi bir alternatif sunarlar [118].

İncir bitkisi, değerli farmasötik uygulamaları bulunan önemli fenolik ve flavonoid bileşiklerin kaynağı olarak bilinmektedir. Amani vd. [119] incirde yaptıkları çalışmada, *Rhizobium (Agrobacterium) rhizogenes* aracılığı ile elde edilen saçaklı kök (hairy root-HR) kültürlerinde fenolik bileşiklerin üretimi, antioksidan kapasitesi ve flavonoid biyosentetik yolak genlerinin ekspresyon düzeyinin *Piriformospora indica*'nın büyümesi üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlamışlardır. HR kültürlerinde %2'lik *P. indica* kültür filtratına 72 saat maruz bırakıldığında, gallik asit (80.5 kat), kafeik asit (26.2 kat), kumarik asit (4.5 kat) ve sinnamik asit (60.1 kat), apigenin (27.6 kat) ve rutin (5.7 kat) olarak maksimum fenolik bileşik birikimi gözlenmiştir. En yüksek klorojenik asit (4.9 kat) ve kuersetin flavonoid (8.8 kat), *P. indica* ile %6 (h/h)'lık oranda 48 saat süren bir inkübasyondan sonra elde edilmiştir. Bu çalışma, *P. indica*'nın incir HR'ler tarafından sekonder metabolit üretimini artırmaya yönelik etkili bir elisitör olma potansiyelini göstermektedir.

Amani vd. [120] tarafından ele alınan başka bir araştırma kapsamında ise iki *'Sabz'* ve *'Siah'* çeşidinden elde edilen saçaklı köklerin *Leishmania major* promastigotları ve amastigotları üzerinde *in vitro* inhibitör etkileri ve biyokimyasal kapasitesi araştırılmıştır. 'HR oluşumunu teşvik etmek için beş haftalık birkaç steril fide, *'Sabz'* çeşidi için "ATCC 15834" ve *'Siah'* çeşidi için ise "A7" *A. rhizogenes* suşları ile inoküle edilmiştir. Yaprak, kök, saçaklı kök ve meyveleri içeren numuneler, 25±2°C'de 7-10 gün boyunca kurutulmuştur. Kurutulmuş toz numuneler daha sonra, metanol maserasyon yöntemi ile ekstrakte edilmiştir. Sonuçta, antioksidan enzim ve HPLC analizine dayanarak, saçaklı kökler yüksek antioksidan kapasite sergilemişler ve yüksek seviyelerde fenolik bileşikler içermişlerdir. Tetrazolyum boya 3-(4,5-dimetiltiyazol-2-il)-2, 5-difeniltetrazolyum-bromür ve tripan mavisi testlerinin sonuçlarına göre, her iki çeşidin saçaklı kök ekstraktları *Leishmania major* promastigotlarına karşı doza bağımlı önemli ölçüde inhibitör etki göstermiştir. Bu çalışmanın bulguları, incirin saçaklı köklerinin umut verici bir doğal antileyşmanyal ajan kaynağı olarak kabul edilebileceğini düşündürmüştür.

Tablo 6, incir bitkisinde gerçekleştirilen saçaklı kök kültürü çalışmalarının bir özetini içermektedir. Buna göre, çalışmalarda MS besin ortamında sürgün ve tohum eksplantları kullanılarak *Agrobacterium rhizogenes* suşları aracılığı ile saçaklı kökler elde edilmiştir (Tablo 6).

Tablo 6. İnci bitkisinde gerçekleştirilen saçaklı kök kültürü çalışmaları

İncir (*Ficus carica* L.) genotipi	Besin ortamı	Bitki büyüme düzenleyicisi (mg/L)	Eksplant tipi	K*
'Sabz'	½ MS	**	Sürgün eksplantları	[119]
'Sabz' ve 'Siah'	½ MS	**	Tohum eksplantları	[120]

*: Kaynakça, **:belirtilmemiş

3.6 *İncir bitkisinde in vitro seleksiyon-tuz stresi*

Abiyotik stresler arasında tuz stresi, sadece edafoklimatik koşullarda bir dengesizliğe neden olmakla kalmayıp, aynı zamanda bitki büyümesi ve fizyolojik süreçler üzerinde de yıkıcı etkiler yaratan en önemli stres

etkeni olarak kabul edilmektedir. Yüksek toprak tuzluluğu, dünya çapında yaklaşık %6 (800 milyon hektar) civarında verimli araziyi ekilemez hale getirmiştir. Tuz stresi koşulları altındaki topraklar, bitki büyümesini ciddi şekilde engelleyebilmektedir. Tuz stresi, ozmotik basınca ve iyon toksisitesine yol açarak bitkilerde iyonik dengeyi bozmaktadır. Ayrıca bitkiler, hücre düzeyinde oksidatif strese de maruz kalırlar. Bu gibi problemler, tuz stresinin bitkiler üzerinde nihai zararlı etkilere neden olurlar. Na^+ ve Cl^- iyonları, bitkiler için gerekli olsa da bu iyonların yapraklarda yüksek düzeyde birikmesi hücre işleyişi için toksik olabilmekte ve programlanmış hücre ölümüne yol açabilmektedir. Ek olarak, daha yüksek miktarda Na^+ ve Cl^- iyonları; protein sentezini, bitki yağ metabolizmasını ve enzim işleyişini olumsuz etkilemektedir [121]. Biyoteknoloji ve doku kültürü teknikleri, abiyotik veya biyotik stres altında dayanıklı bitkileri seçmek ve bahçe bitkilerinde verimlilik özelliklerini geliştirmek için kullanılan güçlü araçlar olarak bilinmektedir. Ayrıca *in vitro* kültürler, bilinen çevresel koşullar altında tuzun hücresel düzeyde fizyolojik etkilerini incelemek için önemli bir teknik sağlarlar [122].

Genellikle meyve ağaçlarının tuzluluğa karşı duyarlılıkları fazladır. Ilıman iklim meyve ağaçlarından biri olan incir ise tuzluluğa orta derecede dayanıklıdır. Son zamanlarda yapılan çalışmalar, incir yapraklarının birkaç hafta boyunca 100 mM sodyum klorüre (NaCl) maruz kaldıktan sonra sağlıklı ve yeşil olduklarını, ayrıca gaz değişim parametrelerinin de nispeten yüksek kaldığını göstermiştir. Bununla birlikte, ≥200 mM NaCl konsantrasyonları, yoğun yaprak nekrozuna, yaprak dökülmesine ve yaprak fotosentezinde dramatik bir düşüşe neden olmuştur. İncir ağaçları kuraklığa karşı oldukça dayanıklıdır ve çoğunlukla Akdeniz bölgesi, Orta Doğu ve Asya'nın yarı kurak iklimleri ile ılıman koşulları altında iyi performans göstermektedir [123]. Ayrıca incir, sulama için tuzlu veya acı su kullanımının oldukça yaygın olduğu yarı kurak ortamlarda yetiştirilmeye uygunluğunun yanı sıra su eksikliğini ve orta derecedeki tuzluluğu tolere etme yetenekleri ile iyi bilinmektedir [124].

İran, incir üretiminde dünyada dördüncü sırada yer almaktadır. Bununla birlikte, yıllar boyunca aralıksız şekilde devam eden kuraklık nedeniyle toprak tuzluluğu yoğunlaşmıştır ve bu nedenle İran incir üretim endüstrisi kısıtlanmıştır. Bu nedenle Abdolinejad ve Shekafandeh [125] yaptıkları çalışmada, farklı tuz konsantrasyonlarının (0, 80, 120 ve 180 mM NaCl) iki incir çeşidi olan *'Anjir Sabz'* ve *'Shah Anjir'*in fizyolojik ve biyokimyasal değişiklikleri üzerindeki etkilerini *in vitro* kültür yoluyla değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak, kültüre alınan yaprak eksplantlarına farklı tuz konsantrasyonlarının uygulanmasından üç gün sonra, her iki çeşitte de 80 mM NaCl'de herhangi bir sararma belirtisi gözlenmemiştir. Ancak iki çeşitten alınan yaprak eksplantları için 120 ve 160 mM NaCl uygulanması durumunda ise sararmalar görülmüş ve bu durum nekroz ile sonuçlanmıştır. Bu belirtiler *'Anjir Sabz'*da *'Shah Anjir'*den daha belirgin olmuştur. Her iki çeşitte de toplam klorofil konsantrasyonu 80 mM NaCl'de kontrole kıyasla önemli ölçüde artmış, ancak '*Shah Anjir'de 'Anjir Sabz'*a or*anla* artış daha az olmuştur. Bununla birlikte, aynı tuzluluk seviyesinin *'Shah Anjir'*in klorofil bozunması üzerinde daha az yıkıcı etkiye sahip olduğu da görülmüştür.

Suudi Arabistan'da tarımın %90'ından fazlası yeraltı suyu ile sulamaya bağlıdır. Bu nedenle yüzey sulama suyunun yoğun buharlaşması ve yerel hidrojeolojik koşullar, yeraltı suyu tuzluluğu riskini artırarak tuz stresine yol açmaktadır. Toprak suyunun tuzluluğundaki artış, bitki kökleri tarafından su ile K^+, Ca^{+2} ve NO_3 alımını engellediği için çoğu bitkinin çimlenmesini ve kök uzamasını engellemektedir. Bu kapsamda Metwali vd. [126] yaptıkları çalışmada, *'Black Mission'*, *'Brown Turkey'* ve *'Brunswick'* isimli üç Suudi incir çeşidinin sürgün ucu eksplantlarından *in vitro* koşullarda bitki oluşumunu ve bu bitkiciklerin farklı konsantrasyonlardaki tuza olan tolerans durumlarını incelemişlerdir. 12 g/L'den fazla NaCl konsantrasyonları, çalışmada ele alınan tüm parametreler üzerinde öldürücü etkilere yol açmıştır. 11 g/L'deki tuz konsantrasyonunda *'Brunswick'* çeşidine ait bitkicikler olumsuz etkilenmişlerdir. K^+, Na^+, Fe^+ ve Zn^+ içeriği, tüm çeşitlerde artan NaCl seviyeleri ile kademeli olarak artmıştır, ancak *'Brown Turkey'* çeşidi diğerlerinden daha fazla K^+ ve Na^+ biriktirmiştir.

Ürdün'de incir üretimi, biyotik ve abiyotik stresler (kuraklık, tuzluluk, alkalilik, toprak kaynaklı hastalıklar ve nematodlar) dahil olmak üzere çeşitli zorluklar nedeniyle son elli yılda 20 kattan fazla azalma göstermiştir. Bu nedenle Al-Shomali vd. [127] yaptıkları çalışmada, yeni bir sürgün ve kallus rejenerasyon protokolünü geliştirmek için üç yerel incir genotipinin (*'Khdari'*, *'Mwazi'* ve *'Zraki'*) apikal tomurcuk eksplantlarını MS, OM ve WPM temelli üç farklı besin ortamında kültüre almışlardır. Kültür kurulduktan sonra, farklı besin ortamlarında gelişme gösteren aynı eksplantlar, besin ortamlarının aktarılmaya olan etkilerinin incelenmesi için MS besin ortamında tekrar kültüre alınmışlardır. 2 aylık apikal tomurcuk eksplantlarının transferinden sonra üç incir genotipi için elde edilen veriler incelendiğinde, önemli ölçüde en yüksek sürgün büyümesinin OM'den aktarılan eksplantlarda gözlendiği belirlenmiştir. Buna karşılık WPM besin ortamından aktarılan kültürlerde en yüksek kallus gelişiminin olduğu saptanmıştır. *'Khdari'* yerel genotipinde sürgün büyümesi için incelenen üç besin ortamı arasında önemli bir farklılık tespit edilmezken, *'Mwazi'* ve *'Zraki'* yerel genotipi için OM kullanılarak en yüksek oranda anlamlı sürgün büyümesi elde edilmiştir.

Emek [128] tarafından *'Bursa Siyahı'* incir çeşidinde fidelerin morfolojisi üzerine farklı NaCl konsantrasyonlarının etkisini belirlemek amacıyla bir çalışma yapılmıştır. Çalışma kapsamında, tohumların *in vitro* koşullar altında çimlendirilmesiyle elde edilen fideler, tuz stresi için farklı konsantrasyonlarda NaCl içeren MS besin ortamında kültüre alınmıştır. Bitki canlılığının NaCl konsantrasyonunun artışına bağlı olarak azaldığı gözlenmiştir. Altı haftanın sonunda, bitkiler yaş ağırlık, sürgün uzunluğu, yaprak sayısı, kök sayısı ve kök uzunluğu gibi parametrelerle değerlendirilmiş, 40 mM NaCl içeren besin ortamında bulunan bitkiler maksimum büyüme göstermişlerdir. Ayrıca, tuz stresi etkilerinin artan tuz konsantrasyonlarına bağlı olarak arttığı belirlenmiştir.

Tablo 7, incir bitkisinde tuz stresine dayalı olarak gerçekleştirilen *in vitro* seleksiyon çalışmaları gösterilmektedir. Bu kapsamda, *in vitro* seleksiyona yönelik olarak en fazla MS ortamının yanı sıra OM ve DKW besin ortamlarının denendiği belirlenmiştir. Çalışmalarda eksplant tipi olarak sürgün ucu, tohum, aksiller tomurcuk ve fide eksplantları kullanılmıştır (Tablo 7).

Tablo 7. İnci bitkisinde gerçekleştirilen tuz stresine dayalı *in vitro* seleksiyon çalışmaları

İncir (*Ficus carica* L.) genotipi	Besin ortamı	Bitki büyüme düzenleyicisi (mg/L)	Eksplant tipi	K*
'Anjir Sabz' ve 'Shah Anjir'	MS	**	Fide eksplantları	[125]
'Black Mission', 'Brown Turkey' ve 'Brunswick'	MS	Farklı dozlarda ve kombinasyonlarda BAP, Kin, 2IP ve NAA	Sürgün ucu eksplantı	[126]
'Khdari', 'Mwazi' ve 'Zraki'	MS, OM, WPM	1 mg/L BAP	Apikal tomurcuk eksplantları	[127]
'Bursa Siyahı'	MS	**	Tohum eksplantları	[128]
'Achtoy White', 'Masone Black', 'Zeiblly Red', 'Zeiblly Flair' and 'Shami Stihy'	MS	2 veya 3 mg/L BAP ile 0.5 mg/L 2IP	Sürgün ucu eksplantları	[122]

*: Kaynakça, **:belirtilmemiş

4 Sonuçlar

İncir bitkisinin yerel ve küresel boyutta üretimi, tüketimi ve ekonomik geliri her geçen yıl artarak devam etmektedir. Son zamanlarda, *in vitro* yöntemlerin kullanımı, nesli tükenmekte olan bitkilerde germplazmın korunmasında önemli bir yoldur ve koruma amaçları için giderek daha popüler hale gelmiştir. Bitki biyoteknolojisi ve genetik mühendisliğinin ilk basamaklarından olan *in vitro* doku kültürü teknikleri, incir genetik materyalinin çoğaltımı açısından alternatif bir üretim yöntemi olarak yenilikçi bir bakış açısı sunmaktadır.

Bitkiler arasında en yüksek kalsiyum ve lif kaynağına sahip olan incir bitkisi, çeşitli vejetatif yöntemlerle çoğaltılabilirken, tohumlarının çoğunlukla cansız olması sebebiyle tohumla eşeyli çoğaltım yöntemi tercih edilmemektedir. Bu nedenle, incir bitkilerinin konvansiyonel olarak çoğaltımı; çelikleme, aşılama ve daldırma ile yapılan vejetatif çoğaltıma dayanmaktadır. Büyük ölçekli üretimin sağlanabilmesi için dikim alanını artırmada çok sayıda çelikle üretime ihtiyaç bulunmaktadır. Bu açıdan mikroçoğaltım bu tip sorunların üstesinden gelmede iyi bir seçenek olarak görülmektedir. İncir bitkisinde mikroçoğaltımın gerçekleştirilmesiyle ilgili çok sayıda farklı çalışma olmakla birlikte çoğunlukla büyük ölçekli üretimlerin optimizasyonu ve ticari üretim protokollerinin oluşturulmasına yönelik araştırmalar artan ilgi ile devam etmektedir. Ayrıca incirde çok çeşitli doku kültürü teknikleri, farklı amaçlara yönelik çalışmalarda daha detaylı olarak ele alınmalıdır.

İncire olan yoğun talebi karşılamak ve incir üretiminde karşılaşılan sorunları çözmek üzere hastalıktan ari, kaliteli ve kısa sürede hızlı kitlesel üretimin gerçekleştirilmesi bir zorunluluk olarak görülmektedir. Sonuç olarak, incir yetiştiriciliğinin çeşitli *in vitro* doku kültürü teknikleri aracılığı ile geliştirilmesi çalışmalarına hız verilmesi yerinde olacaktır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %12

Kaynaklar

[1] D. Bay, Bursa Siyahı incir bitkisi (*Ficus carica* L.)'nde K, Ca, Mg ve P besin elementlerinin mevsimsel değişimlerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2012.

[2] N. F. Edremit, Aydın ilinin bazı ilçelerinde incir mozaik hastalığının yaygınlığının belirlenmesi, etmenin tanılanması ve üretim materyalinin incir sürgün ucu kültürü-termoterapi ile etmenden arındırılması. Doktora Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2013.

[3] D. Singh, B. Singh, and R. K. Goel, Traditional uses, phytochemistry and pharmacology of *Ficus religiosa*. A review, Journal of Ethnopharmacology, 134 (3), 565-583, 2011. https://doi.org/10.1016/j.jep.2011.01.046.

[4] Ö. Aytürk, Dioik *Ficus carica* L. (incir)'de dişi, gal ve erkek çiçek gelişiminin mikroskobik ve moleküler yöntemler ile karşılaştırılması. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2016.

[5] W. P. Armstrong, Sex life of figs: coevolution of a tree & minute wasp. Palomar.Edu, 2012. Erişim adresi: https://www.waynesword.net/arbimg10.htm (accessed: 11.12.2023).

[6] Tureng Dictionary and Translation, 2023. Erişim adresi: https://tureng.com/tr/turkce-ingilizce/gynodioecious (accessed: 15.06.2023).

[7] G. Çatmadım, Aydın ili Kuyucak ilçesinde (Büyük Menderes Ovası) yetiştirilen sarılop ve bursa siyahı incir çeşitlerinde meyve gelişimlerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2014.

[8] D. Núñez-Gómez, P. Legua, J. J. Martínez-Nicolás and P. Melgarejo, Breba fruits characterization from four varieties (*Ficus carica* L.) with important commercial interest in Spain. Foods, 10 (12), 3138, 2021. https://doi.org/10.3390/foods10123138.

[9] N. Soni, S. Mehta, G. Satpathy and R. K. Gupta, Estimation of nutritional, phytochemical, antioxidant and antibacterial activity of dried fig (*Ficus carica*). Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 3 (2), 158-165, 2014. doi: 10.12691/jfnr-8-12-3.

[10] C. Teruel-Andreu, L. Andreu-Coll, D. López-Lluch, E. Sendra, F. Hernández and M. Cano-Lamadrid, *Ficus carica* fruits, by-products and based products as potential sources of bioactive compounds: A review. Agronomy, 11 (9), 1834, 2021. https://doi.org/10.3390/agronomy11091834.

[11] O. Çalışkan, Türkiye'de sofralık incir yetiştiriciliğinin mevcut durumu ve geleceği. Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 26 (2), 71-87, 2012.

[12] FAOSTAT, 2022. Erişim adresi: https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize (accessed: 14.03.2022).

[13] D. Çelik, Kuru incirlerde aflatoksin ve oktaroksin varlığının belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Ensititüsü, Türkiye, 2022.

[14] İ. G. Güney, T. Bozoğlu, G. Özer, Ş. Türkölmez and S. Derviş, First report of *Neoscytalidium dimidiatum* associated with dieback and canker of common fig (*Ficus carica* L.) in Turkey. Journal of Plant Diseases and Protection, 129 (3), 701-705, 2022. https://doi.org/10.1007/s41348-022-00586-8.

[15] Ş. N. Erdeğer, İncir (*Ficus carica* L.) genomunda sekans temelli ssr (basit dizi tekrarı) markörlerinin geliştirilmesi. Doktora Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2019.

[16] A. Güler, Şanlıurfa'da yetiştirilen Ege kökenli bazı incir çeşitlerinin toprakta bulunan besin maddelerinden yararlanma durumlarının belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2021.

[17] E. Nakilcioğlu-Taş, Biochemical characterization of fig (*Ficus carica* L.) seeds. Journal of Agricultural Sciences, 25 (2), 232-237, 2019. https://doi.org/10.15832/ankutbd.398268

[18] H. Crisosto, L. Ferguson, V. Bremer, E. Stover and G. Colelli, Fig (*Ficus carica* L.). In Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits. Woodhead Publishing, Sawston, Cambridge, pp. 134-160, 2011. https://doi.org/10.1533/9780857092885.134

[19] M. Ayuso, M. Carpena, O. Taofiq, T.G. Albuquerque, J. Simal-Grdana, M.B.P.P. Oliveira, M.A. Prieto, I.C.F.R. Ferreira and L. Barros, Fig "*Ficus carica* L." and its by-products: A decade evidence of their health-promoting benefits towards the development of novel food formulations. Trends in Food Science and Technology, 127: 1-13, 2022. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.06.010.

[20] S. Mahmoudi, M. Khali, A. Benkhaled, I. Boucetta, Y. Dahmani, Z. Attallah and S. Belbraouet, Fresh figs (*Ficus carica* L.): Pomological characteristics, nutritional value, and phytochemical properties. European Journal of Horticultural Science, 83 (2), 104-113, 2018. doi: 10.17660/eJHS.2018/83.2.6.

[21] M. Tepecik, Farklı potasyum dozlarının incirde kaliteye etkisi. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2010.

[22] F. Özçiçekçi, İncir mozaik hastalığının Aydın ilindeki incir bahçe ve fidanlıklarındaki yaygınlığının saptanması ile hastalık etmeninin, bitki özsuyu ile taşınması, konukçu çevresi ve serolojik yöntemlerle (elisa) karakterizasyonunun belirlenmesi. Doktora Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2008.

[23] C. Bayoudh, R. Labidi, A. Majdoub and M. Mars, *In vitro* propagation of caprifig and female fig varieties (*Ficus carica* L.) from shoot-tips. Journal of Agricultural Science and Technology, 17, 1597-1608, 2015. http://jast.modares.ac.ir/article-23-2152-en.html.

[24] A. C. Boliani, A. F. A. Ferreira, L. N. H. Monteiro, M. S. A. C. D. Silva and A. D. Rombola, Advances in propagation of *Ficus carica* L. Revista Brasileira de Fruticultura, 41, 2019. http://dx.doi.org /10.1590/0100-29452019026.

[25] N. S. Mustafa and R. A. Taha, Influence of plant growth regulators and subculturing on *in vitro* multiplication of some fig (*Ficus carica*) cultivars. Journal of Applied Sciences Research, *8*(8), 4038-4044, 2012.

[26] A. Ismail, Using of DNA-barcoding, scot and sds-page protein to assess soma-clonal variation in micropropagated fig (*Ficus carica* L.) plant. Pakistan Journal of Biological Sciences: PJBS, 25 (5), 415-425, 2022. https://doi.org/10.3923/pjbs.2022.415.425.

[27] N. A. Azhar and Z. Zainuddin, Tissue culture of *Ficus carica* variety BTM-6. Malaysian Journal of Sustainable Agriculture (MJSA), 4 (1), 26-28, 2020. doi: http://doi.org/10.26480/mjsa.01.2020.26.28.

[28] G. C. Phillips and M. Garda, Plant tissue culture media and practices: an overview. *In Vitro* Cellular & Developmental Biology-Plant, 55 (3), 242-257, 2019. https://doi.org/10.1007/s11627-019-09983-5.

[29] E. Chimdessa, Composition and preparation of plant tissue culture medium. Tissue Cult Bio Bioeng, 3: 120, 2020. doi: 10.29011/2688-6502.000020.

[30] S. S. Bhojwani and P. K. Dantu, Micropropagation, In Plant tissue culture: An introductory text, Springer, India, 2013.

[31] Himedia Laboratories, 2023. Erişim adresi: https://www.diagnocine.com/Content/Upload/Product/datasheets/m%20(250).pdf (accessed: 11.12.2023).

[32] A. Purwito, D. Efendi and T. M., Ermayanti, Growth response of four accessions of *Moringa oleifera* Linn shoots cultured on various basic media. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 741 (1), 012054, 2021. https://doi.org/10.1088/1755-1315/741/1/012054.

[33] Plant Cell Technology, 2023. Erişim adresi: https://www.plantcelltechnology.com/pct-blog/tissue-culture-medium-types-and-5-steps-of-selection/ (accessed: 21.06.2023).

[34] Biochemie, 2023. Erişim adresi: https://www.duchefa-biochemie.com/product/details/number/Q0251 (accessed: 21.06.2023).

[35] M. Peyvandi, F. Farahani, Z. Noormohammadi, O. Banihashemi, M. Hosseini and S. Ataee, Mass production of *Olea europea* L. (cv. rowghani) through micropropagation. General and Applied Plant Physiology, 35, 35-43, 2009.

[36] A. Hussain, I. A. Qarshi, H. Nazir and I. Ullah, Plant tissue culture: current status and opportunities. Recent Advances in Plant *In Vitro* Culture, *6*(10), 1-28, 2012. http://dx.doi.org/10.5772/50568.

[37] A. M. Kumlay ve T. Eryiğit, Bitkilerde büyüme ve gelişmeyi düzenleyici maddeler: bitki hormonları. Journal of the Institute of Science and Technology, 1 (2), 47-56, 2011, https://dergipark.org.tr/tr/pub/jist/issue/7925/104223.

[38] H. T. Hallmark and A. M. Rashotte, Cytokinin isopentenyladenine and its glucoside isopentenyladenine-9G delay leaf senescence through activation of cytokinin-associated genes. Plant Direct, 4, (12), 2020. https://doi.org/10.1002/pld3.292.

[39] Y. J. Lee, D. Sriskanda, S. Subramaniam and B. L. Chew, The effects of banana, potato and coconut water in the regeneration of *Ficus carica* cv. Japanese BTM 6. Malaysian Applied Biology, 51 (1), 163-170, 2022. https://doi.org/10.55230/mabjournal.v51i1.2157.

[40] J. A. Teixeira da Silva, J. Dobránszki and S. Ross, Phloroglucinol in plant tissue culture. *In Vitro* Cellular & Developmental Biology, 49, 1–16, 2013. https://doi.org/10.1007/s11627-013-9491-2.

[41] A. Rency, S. Pandian and M. Ramesh, Influence of adenine sulphate on multiple shoot induction in *Clitoria ternatea* L. and analysis of phyto-compounds in *in vitro* grown plants. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 16, 181-191, 2018. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.07.034

[42] T. S. Dattatraya and R. N. S. S. Vidyadhar, To study the effect of plant growth regulator and chemicals on survival of cuttings in fig (*Ficus carica* L.) cv. Dinkar. International Journal of Conservation Science, 8 (6), 2220-2222, 2020. https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i6af.11103.

[43] A. Gürel, Ş., Hayta, P. Nartop, M. Bayraktar ve S.O. Fedakar, Bitki hücre, doku ve organ kültürü uygulamaları. Ege Üniversitesi Yayınları Mühendislik Fakültesi, İzmir, Türkiye, 2013.

[44] S. Bhatia and K. L. Sharma, Micropropagation. Modern applications of plant biotechnology in pharmaceutical sciences. Academic Press, Burlington, New Jersey, pp. 32-98, 2015. http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-802221-4.00002-9.

[45] J. C. Cardoso, L. T. Sheng Gerald and J. A. Teixeira da Silva, Micropropagation in the twenty-first century. Plant Cell Culture Protocols, Springer, pp. 17-46, 1815, 2018. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8594-4_2.

[46] M. A. Shatnawi, R. A. Shibli, W. G. Shahrour, T. S. Al-Qudah and T. Abu-Zahra, Micropropagation and conservation of fig (*Ficus carica* L.). Journal of Advances Agriculture, 10, 1669-1679, 2019. https://doi.org/10.24297/jaa.v10i0.8160.

[47] M. Moniruzzaman, Z. Yaakob and R. A. Taha, *In vitro* production of fig (*Ficus carica* L.) plantlets. In V International Symposium on Fig, pp. 231-236, Napoli, Italy, 2015. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1173.40.

[48] I. M. Qrunfleh, M. M. Shatnawi and Z. I Al-Ajlouni,. Effect of different concentrations of carbon source, salinity and gelling agent on *in vitro* growth of fig (*Ficus carica* L.). African Journal of Biotechnology, 12 (9), 936-940, 2013. https://doi.org/10.5897/AJB12.2871.

[49] O. Dolgun and F. E. Tekintas Production of fig (*Ficus carica* L.) nursery plants by stem layering method. Agriculturae Conspectus Scientificus, 73 (3), 157-160, 2008. https://hrcak.srce.hr/26826.

[50] C. B. Fráguas, M. Pasqual, L. F. Dutra and J. O. Cazetta, Micropropagation of fig (*Ficus carica* L.) '*Roxo de Valinhos*' plants. *In Vitro* Cellular & Developmental Biology-Plant, 405, 471-474, 2004b. http://dx.doi.org/10.1079/IVP2004562.

[51] H. Darwesh, S. Bazaid and B. Samra, *In vitro* propagation method of *Ficus carica* at Taif governorate using tissue culture technique. International Journal of Advanced Research, 2, 6, 756-761, 2014.

[52] R. S. D. Pratiwi, L. A. M. Siregar and C. Hanum, The response of several combination of plant growth regulators to shoot induction of fig (*Ficus carica* L.) var. improved celeste. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, p. 032088, Fakultas Pertanian Universitas Sumatera Atara, Indonesia, 2021. doi:10.1088/1755-1315/782/3/032088.

[53] M. Pasqual and E. A. Ferreira Micropropagation of Fig tree (*Ficus carica* sp). In Protocols for micropropagation of woody trees and fruits Springer, Dordrecht, pp. 409-416, 2007. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6352-7_37.

[54] V. Kumar, A. Radha and S. Kumar Chitta, *In vitro* plant regeneration of fig (*Ficus carica* L. cv. Gular) using apical buds from mature trees. Plant Cell Reports, 17, 717-720, 1998. https://doi.org/10.1007/s002990050471.

[55] S. Hepaksoy and U. Aksoy, *In vitro* propagation of *Ficus carica* cv. Sarılop clone selected for its high performance. In III International Symposium on Fig, pp. 199-204, Vilamouran, Algarve, Portugal, 2005. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.798.27.

[56] K. M. Kim, M. Y. Kim, P. Y. Yun, T. Chandrasekhar, H. Y. Lee and P. S. Song, Production of multiple shoots and plant regeneration from leaf segments of fig tree (*Ficus carica* L.). Journal of Plant Biology, 50, 440-446, 2007. https://doi.org/10.1007/BF03030680.

[57] G. H. Danial, D. A. Ibrahim, S. A. Brkat and B. M. Khalil, Multiple shoots production from shoot tips of fig tree (*Ficus carica* L.) and callus induction from leaf segments. International Journal of Pure & Applied Sciences & Technology, 20 (1), 117-124 2014.

[58] I. V. Mitrofanova, N. P. Lesnikova-Sedoshenko, V. A. Brailko, T. N. Kuzmina, S. V. Chelombit, E. L. Shishkina and O. V. Mitrofanova, Realization of *Ficus*

carica L. morphogenic capacity via organogenesis and somatic embryogenesis *in vitro*. In International Symposium on Horticulture: Priorities and Emerging Trends, 1255, pp. 69-76, Bengaluru, India, 2017. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1255.12.

[59] S. T. Shahcheraghi, and A. Shekafandeh, Micropropagation of three endemic and endangered fig (*Ficus carica* L.) genotypes. Advances in Horticultural Science, 30 (3), 129-134, 2016. https://doi.org/10.13128/ahs-20248.

[60] F. K. A. Patah, N. A. Hasbullah, H. Idris and N. S. Radzuan, Micropropagation of *Ficus carica* L. through Tissue Culture System. 12th Int'l Conference on Advances in Agricultural, Chemical, Biological & Medical Sciences (AACBMS-18), pp. 19-22, Pattaya, Thailand, 2018. https://doi.org/10.17758/EARES3.C0818108.

[61] G. Prabhuling and H. Huchesh, Direct *In Vitro* regeneration in fig (*Ficus carcia* L.) cv. 'Brown Turkey'. Research Journal of Biotechnology, 13, 5, 77-83, 2018.

[62] Wan Ting Ling, Fui Chu Liew, Wei Yong Lim, Sreeramanan Subramaniam and Bee Lynn Chew. Shoot induction from axillary shoot tip explants of fig (*Ficus carica*) cv. Japanese BTM 6. Tropical Life Sciences Research, 29 (2), 165–174, 2018. https://doi.org/10.21315/tlsr2018.29.2.1.

[63] H. S. Al-Zahrani, O. A. Almaghrabi, M. P. Fuller, H. I. Soliman, M. Farooq and E. M. Metwali, Micropropagation of virus-free plants of Saudi fig (*Ficus carica* L.) and their identification through enzyme-linked immunosorbent assay methods. *In Vitro* Cellular & Developmental Biology-Plant, 54, 626-636, 2018. doi: 10.1007/s11627-018-9933-y.

[64] A. Sahraroo, A. Zarei and M. Babalar, *In vitro* regeneration of the isolated shoot apical meristem of two commercial fig cultivars '*Sabz*'and '*Jaami-e-Kan*'. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 17, 743-749, 2019. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.01.024.

[65] R. Abdolinejad, A. Shekafandeh, A. Jowkar, A. Gharaghani and A. Alemzadeh, Indirect regeneration of *Ficus carica* by the TCL technique and genetic fidelity evaluation of the regenerated plants using flow cytometry and ISSR. Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC), 143, 131-144, 2020. https://doi.org/10.1007/s11240-020-01903-5.

[66] D. Sriskanda, Y. X. Liew, S. P. Khor, F. Merican, S. Subramaniam and B. L. Chew, An efficient micropropagation protocol for *Ficus carica* cv. Golden Orphan suitable for mass propagation. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, *38*, 102225, 2021. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102225

[67] L. M. Muriithi, T. S. Rangan and B. H. Waite, *In Vitro* propagation of fig through shoot tip culture1. HortScience, 17 (1), 86-87, 1982. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.17.1.86.

[68] C.A. Pontikis and P Melas, Micropropagation of *Ficus carica* L. HortScience, 21 (1):153-154, 1986.

[69] G. Günver and E. A. Ertan, Study on the propagation of figs by the tissue culture techniques. In I International Symposium on Fig, pp. 169-172, İzmir, Turkey, 1997. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1998.480.29.

[70] A. Demiralay, Y. Yalçin-Mendi, Y. Aka-Kaçar and S. Cetiner, *In vitro* propagation of *Ficus carica* L. var. Bursa Siyahi through meristem culture. In I International Symposium on Fig, pp. 165-168, İzmir, Turkey, 1997. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1998.480.28.

[71] G. R. Brum, M. Pasqual, A. B. Silva and N. N. J. Chalfun, Sucrose, culture media, and their interactions during *in vitro* proliferation of 'Roxo de Valinhos' (*Ficus carica* L.). In II International Symposium on Fig, pp. 131-135, Caceres, Spain, 2001. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.605.20.

[72] C. B. Fráguas, M. Pasqual and A. R. Pereira, Multiplicação *in vitro* de *Ficus carica* L.: efeito da cinetina e do ácido giberélico. Ciência e Agrotecnologia, 28, 49-55, 2004. https://doi.org/10.1590/S1413-70542004000100006.

[73] E. A. Ferreira and M. Pasqual, *Ficus carica* L. produced by micropropagation. In International Symposium on Biotechnology of Temperate Fruit Crops and Tropical Species, 738, pp. 437-441, Florida, USA, 2005. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2007.738.53.

[74] E. A. Ferreira and M. Pasqual, Protocol optimization for micropropagation of 'Roxo de Valinhos' fig tree. Ciência Rural, 38, 1149-1153, 2008. https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000400040.

[75] W. Barbosa, R. Pio, R. F. de Arruda Veiga, E. A. Chagas and N. P. Feldberg, Efeito de concentrações do AIB no enraizamento *in vitro* de cultivares de figueira, 24, 2, 1-6, 2008.

[76] R. A. Taha, N. S. Mustafa and S. A. Hassan, Protocol for micropropagation of two *Ficus carica* cultivars. World Journal of Agricultural Sciences, 9 (5), 383-388, 2013. doi:10.5829/idosi.wjas.2013.9.5.1802.

[77] N. S. Mustafa, R. A. Taha, S. A. M. Hassan and N. S. M. Zaied, Effect of medium strength and carbon source on *in vitro* shoot multiplication of two *Ficus carica* cultivars. Journal of Applied Sciences Research, 9 (4), 3068-3074, 2013.

[78] L. Erfa, D. Maulida, R. M. Sari and F. Yuniardi, Regeneration of red palestine fig (*Ficus carica* L.) from formation of adventitious shoots in murashige & skoog media with additional of BAP/TDZ and NAA. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, p. 012068, Lampung State Polytechnic, Indonesia, 2022. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1012/1/012068.

[79] S. Hepaksoy, Bazı kiraz anaçlarının mikroçoğaltımı üzerinde araştırmalar I. Gelişme ve çoğalma. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 41 (3), 11-12, 2004.

[80] M. Moniruzzaman, Z. Yaakob and N. Anuar, Factors affecting *in vitro* regeneration of *Ficus carica* L. and genetic fidelity studies using molecular marker. Journal

of Plant Biochemistry and Biotechnology, 30 (2), 304-316, 2021. https://doi.org/10.1007/s13562-020-00590-9.

[81] A. M. S. Almemary, Callus induction and differentiation. The Future Journal of Agriculture, 3, 5-9, 2020. https://doi.org/10.37229/fsa.fja.2020.07.02.

[82] E. D. Benjamin, G. A. Ishaku, F. A. Peingurta and A. S. Afolabi, Callus culture for the production of therapeutic compounds. American Journal of Plant Biology, 4 (4), 76-84, 2019. https://doi.org/10.11648/j.ajpb.20190404.14

[83] M. Lotfi, Effects of monochromatic red and blue light-emitting diodes and phenyl acetic acid on *in vitro* mass production of *Pyrus communis* 'Arbi'. Journal of Horticulture and Postharvest Research, 5 (2), 119-128, 2022. https://doi.org/10.22077/jhpr.2021.4517.1229.

[84] E. C. Hong, C. B. Lynn and S. Subramaniam, Development of plantlet regeneration pathway using *in vitro* leaf of *Ficus carica* L. cv. Panachee supported with histological analysis. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 27, 101697, 2020. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101697.

[85] S. Mehmood, Q. Ayub, S. M. Khan, N. Arif, M. J. Khan, A. Mehmood... and M. U. Ayub, Responses of fig cuttings (*Ficus carica*) to different sowing dates and potting media under agro-climatic conditions of Haripur. RADS Journal of Biological Research & Applied Sciences, 11 (2), 112-119, 2020. https://doi.org/10.37962/jbas.v11i2.268

[86] D. S. Elazab and M. M. Shaaban, The impact of sucrose concentration on root growth and development in fig (*Ficus carica* L.) *in vitro*. Assiut Journal of Agricultural Sciences, 46 (6), 67-75, 2015. doi: 10.21608/AJAS.2015.521.

[87] H. Yakushiji, N. Mase and Y. Sato, Adventitious bud formation and plantlet regeneration from leaves of fig (*Ficus carica* L.). The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 78 (6), 874-878, 2003. https://doi.org/10.1080/14620316.2003.11511712.

[88] S. S. Dhage, V. P. Chimote, B. D. Pawar, A.A. Kale, S. V. Pawar and A. S. Jadhav, Development of an efficient *in vitro* regeneration protocol in fig (*Ficus carica* L.). Journal of Applied Horticulture, 17, 2, 160-164, 2015. https://doi.org/10.37855/jah.2015.v17i02.30

[89] M. Hayati and E. Kesumawati, Response of *in vitro* propagated fig (*Ficus carica* L.) shoots to the concentrations of benzyl amino purine and coconut water. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 922, 1, 012067, 2021. https://doi.org/10.1088/1755-1315/922/1/012067.

[90] A. R. Parab, K. Y. Han, B. L. Chew and S. Subramaniam, Morphogenetic and physiological effects of LED spectra on the apical buds of *Ficus carica* var. '*Black Jack'*. Scientific Reports, 11 (1), 1-11, 2021. https://doi.org/10.1038/s41598-021-03056-7.

[91] X. J. Lui, D. Sriskanda, W. T. Ling, S. Subramaniam and B. L. Chew, The Incorporation of coconut water and banana homogenate in the regeneration of fig (*Ficus carica* L.) cv. Violette de Solliès. Malaysian Applied Biology, 51 (5), 13-22, 2022. https://doi.org/10.55230/mabjournal.v51i5.2327.

[92] B. Güler, Çay (*Camellia sinensis* [L.] O. Kuntze) bitkisinde geçici daldırma sistemine dayalı biyoreaktörler aracılığıyla sentetik tohumların üretilmesi. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2022.

[93] S. Asghar, N. Ghori, F. Hyat, Y. Li and C. Chen, Use of auxin and cytokinin for somatic embryogenesis in plant: a story from competence towards completion. Plant Growth Regulation, 99 (3), 413-428, 2023. https://doi.org/10.1007/s10725-022-00923-9.

[94] H. I. Soliman, M. Gabr and N. A. Abdallah, Efficient transformation and regeneration of fig (*Ficus carica* L.) via somatic embryogenesis. GM crops, 1 (1), 40-51, 2010. https://doi.org/10.4161/gmcr.1.1.10632.

[95] T. Turan, Sarılop İncir *(Ficus carica* L.*)* Çeşidi Yaprak Segmentlerinden Somatik Embriyogenesis Oluşumu. Yüksek Lisans Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2013.

[96] D. Büyükdinç and G. Günver Dalkılıç, Sarılop incir (*Ficus carica* L.) çeşidi yaprak segmentlerinden somatik embriyogenesis oluşumu, Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 19 (1), 29-35, 2022. https://doi.org/10.25308/aduziraat.1011855.

[97] Efferth, T. Biotechnology applications of plant callus cultures. Engineering, 5 (1), 50-59, 2019. https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.11.006.

[98] S. S., Dhage, B. D. Pawar, V. P. Chimote, A. S. Jadhav and A. A. Kale, *In vitro* callus induction and plantlet regeneration in fig (*Ficus carica* L.). Journal of Cell & Tissue Research, 12, 3, 3395-3400, 2012.

[99] B. M. Singh, C. M. Rajoriya, I. A. Wani, R. S. Rawat and B. L. Jat, *In vitro* studies of *Ficus carica* and its application in crop improvement. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 4 (11), 135-148, 2016.

[100] S. Wahyuni, R. Susanti and R. S. Iswari, Isolation and caracterization of ficin enzyme from *Ficus* septica Burm F stem latex. Indonesian Journal of Biotechnology, 20 (2), 161-166, 2015. https://doi.org/10.22146/ijbiotech.24200.

[101] A. H. Nassar and H. J. Newbury, Ficin production by callus cultures of *Ficus carica*. Journal of Plant Physiology, 131 (3-4), 171-179, 1987. https://doi.org/10.1016/S0176-1617(87)80157-8.

[102] F. Cormier, C. Charest and C. Dufresne, Partial purification and properties of proteases from fig (*Ficus carica*) callus cultures. Biotechnology letters, 11, 797-802, 1989. https://doi.org/10.1007/BF01026100.

[103] D. Sriskanda, X. J. Chew and B. L. Chew, Callus induction of fig (*Ficus carica* cv. Violette de Soillès) via thin cell layer technique. Journal of Tropical Plant Physiology, 14 (1), 22-30, 2022. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102225.

[104] E. Hafez, A. A. El Morsi and A. A. Abdelkhalek, Biological and molecular characterization of the fig mosaic disease. Molecular Pathogens, *2*, 2, 2011. https://doi.org/10.5376/mp.2011.02.0002

[105] M. Afechtal, Fig tree viruses in Morocco. Moroccan Journal of Agricultural Sciences, 1, (1), 54-58, 2020.
[106] G. Sümer, Sürgün Ucu ve Termoterapi Yöntemleri ile İncir Mozaik Hastalık Etmenlerinden Arındırılmış ve Tek Basamaklı Rt-Pcr ile Testlenmiş, Sarılop ve Bursa Siyahı İncir Üretim Materyalinin Elde Edilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2014.
[107] M. Chiumenti, A. Campanale, G. Bottalico, A. Minafra, A. De Stradis, V. Savino and G. P. Martelli, Sanitation trials for the production of virus-free fig stocks. Journal of Plant Pathology, 95, 655-658. 2013.
[108] K. Magyar-Tábori, N. Mendler-Drienyovszki, A. Hanász, L. Zsombik and J. Dobránszki, Phytotoxicity and other adverse effects on the *in vitro* shoot cultures caused by virus elimination treatments: Reasons and solutions. Plants, 10, (4), 670, 2021. https://doi.org/10.3390/plants10040670.
[109] K. A. Quiroz, Berríos, M., Carrasco, B., Retamales, J. B., Caligari, P. D., and García-Gonzáles, R. (2017). Meristem culture and subsequent micropropagation of Chilean strawberry (Fragaria chiloensis (L.) Duch.). Biological Research, 50, 20, 2-11, 2017. https://doi.org/10.1186/s40659-017-0125-8.
[110] S. Karimpour, G. H. Davarynejad, M. ZakiAghl, M. R. Safarnejad, P. Martínez-Gómez and M. Rubio, Rapid assessment of sanitary and physiological state of thermotherapy-treated apple shoots by chlorophyll content evaluation. European Journal of Horticultural Science, 86, 205- 211, 2021. https://doi.org/10.17660/eJHS.2021/86.2.11.
[111] M. Ebrahimi, A. A. Habashi, M. Emadpour and N. Kazemi, Recovery of virus-free almond (*Prunus dulcis*) cultivars by somatic embryogenesis from meristem undergone thermotherapy. Scientific Reports, 12 (1), 14948, 2022. http://dx.doi.org/10.17660/eJHS.2021/86.2.11.
[112] S. Çömlekçioğlu, A. B. Kuden, Y. A. Kacar and M. A. Kamberoglu, Meristem culture of two fig cultivars in Turkey. Fruits, 62 (2), 125-131, 2007. http://dx.doi.org/10.1051/fruits:2007006.
[113] M. Ziv and A. Altman, Tissue culture- general principles. encyclopedia of applied plant sciences. Brian Thomas (Eds.), Elsevier, pp. 1341-135, Wellesbourne, UK, 2003. https://doi.org/10.1016/B0-12-227050-9/00213-1.
[114] J. E. Han, H. S. Lee, H. Lee, H. Cho and S. Y. Park, Embryogenic stem cell identity after protoplast isolation from *Daucus Carota* and recovery of regeneration ability through protoplast culture. International Journal of Molecular Sciences, 23 (19), 11556, 2022. https://doi.org/10.3390/ijms231911556.
[115] F. Aljane, A. Essid and S. Nahdi, Improvement of fig (*Ficus carica* L.) by conventional breeding and biotechnology. M. Al-Khayri et al. (Eds.), Advances in Plant Breeding Strategies: Fruits, 3, 343-375, 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91944-7_9.
[116] H. Yakushiji, T. Morita, S. Jikumaru, Interspecific hybridization of fig (*Ficus carica* L.) and *Ficus erecta* Thunb., a source of *Ceratocystis canker* resistance. Euphytica, 183, 39–47, 2012. https://doi.org/10.1007/s10681-011-0459-1.
[117] I. Mitrofanova, N. Lesnikova-Sedoshenko and O. Krivenko, Some features of protoplast isolation from leaf explants of *Ficus carica* plantlets cultured *in vitro*. Journal of Biotechnology, 305 (S), 52-53, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2019.05.186.
[118] N. E. Moreno-Anzúrez, S. Marquina, L. Alvarez, A. Zamilpa, P. Castillo-España, I. Perea-Arango... and J. Arellano-García, A cytotoxic and anti-inflammatory campesterol derivative from genetically transformed hairy roots of *Lopezia racemosa* Cav. (*Onagraceae*). Molecules, 22, (1), 118, 2017. https://doi.org/10.3390/molecules22010118
[119] S. Amani, M. Mohebodini, S. Khademvatan, M. Jafari and V. Kumar, *Piriformospora indica* based elicitation for overproduction of phenolic compounds by hairy root cultures of *Ficus carica*. Journal of Biotechnology, 327, 43-53, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2020.12.015.
[120] S. Amani, S. Khademvatan, M. Mohebodini, M. Jafari and V. Kumar, *Ficus carica* hairy roots: *In vitro* anti-leishmanial activity against *Leishmania major* promastigotes and amastigotes. Asian Pacific Journal of Tropical Medicine, 15 (5), 220, 2022. https://doi.org/10.4103/1995-7645.345945.
[121] M. Abid, Y. J. Zhang, Z. Li, D. F. Bai, Y. P. Zhong and J. B. Fang, Effect of salt stress on growth, physiological and biochemical characters of four kiwifruit genotypes. Scientia Horticulturae, 271, 109473, 2020. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109473.
[122] H. I. A. Soliman, and M. R. Abd Alhady, Evaluation of salt tolerance ability in some fig (*Ficus carica* L.) cultivars using tissue culture technique. Journal of Applied Biology and Biotechnology, 5 (6), 29-39, 2019. https://doi.org/10.7324/JABB.2017.50605.
[123] A. Vangelisti, L.S. Zambrano and G. Caruso, How an ancient, salt-tolerant fruit crop, *Ficus carica* L., copes with salinity: a transcriptome analysis. Sci Rep, 9, 2561, 2019. https://doi.org/10.1038/s41598-019-39114-4.
[124] A. Mascellani, L. Natali, A. Cavallini, F. Mascagni, G. Caruso, R. Gucci... and R. Bernardi, Moderate salinity stress affects expression of main sugar metabolism and transport genes and soluble carbohydrate content in ripe fig fruits (*Ficus carica* L. cv. Dottato). Plants, 10 (9), 1861, 2021. https://doi.org/10.3390/plants10091861.
[125] R. Abdolinejad and A. Shekafandeh, Responses of two figs (*Ficus carica* L.) cultivars under salt stress via *in vitro* condition. Agriculture Science Developments, 3 (5), 194-199, 2014.
[126] E. M. Metwali, I. A. S. Hemaid, H. S. Al-Zahrani, S. M. Howlader and M. P. Fuller, Influence of different concentrations of salt stress on *in vitro* multiplication of some fig (*Ficus carcia* L.) cultivars. Life Science

Journal, 11 (10), 386-397, 2014. oai: pearl.plymouth.ac.uk:10026.1/3047.

[127] I. Al-Shomali, M. T. Sadder and A. Ateyyeha, Culture media comparative assessment of common fig (*Ficus carica* L.) and carryover effect. Jordan Journal of Biological Sciences, 10 (1), 13-18, 2017.

[128] Y. Emek, *In vitro* Şartlar Altında 'Bursa Siyahı' (*Ficus carica* L.) incir çeşidinin morfolojisi üzerine tuzun etkisi. KSÜ Tarım ve Doğa Derg, 21 (3), 292-296, 2018. https://doi.org/10.18016/ksudobil.298973.