NÖHÜ MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ NOHU JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

ISSN: 2564-6605

Cilt: 14 Sayı: 2 2025 Volume: 14 Issue: 2 2025

Hope OMER Har

1992

UNIVERSI



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

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



NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2) Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences ISSN: 2564-6605 Cilt/Volume: 14 Sayı/Issue: 2 2025 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



NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2) Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences ISSN: 2564-6605 Cilt/Volume: 14 Sayı/Issue: 2 2025 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.

Prof. 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

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2) Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences ISSN: 2564-6605 Cilt/Volume: 14 Sayı/Issue: 2 2025 www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/ten/pub/ngumuh



Editör Kurulu/ Editorial Board

Prof. Dr. Mustafa Sarıdemir (Baş Editör/*Editor-in-Chief*)

Prof. Dr. Mustafa Korkanç (Yardımcı Editör/Co-Editor)

Doç. Dr. Firdevs Uysal (Yardımcı Editör/Co-Editor)

Doç. Dr. Ahmet Şakir Dokuz (Yardımcı Editör/Co-Editor)

Prof. Dr. Fehiman Çiner

Prof. Dr. Hakan Erdem

Prof. Dr. Zeliha Yıldırım

Prof. Dr. Sencer Buzrul

Prof. Dr. Emel Kızılkaya Aydoğan

Prof. Dr. Hasan Tangüler

Prof. Dr. Maciej Dutkiewicz

Prof. Dr. Bora Timurkutluk

Prof. Dr. Ali Özgün Ok

Prof. Dr. Yasin Kabalcı

Prof. Dr. Kutalmış Gümüş

Prof. Dr. Aydın Yeşildirek

Prof. Dr. Arzum Büyükkeklik

Prof. Dr. Serkan Çayırlı

Doç. Dr. Rahim Hassanzadeh

Doç. Dr. Hatice İnan

Doç. Dr. Andaç Batur Çolak

Doç. Dr. Casen Panaitescu

Doç. Dr. Emrah Zerdali

Dr. Öğr. Üyesi Ehsan Noroozinejad

Dr. Öğr. Üyesi Hatice Sinem Şaş Çaycı

İnşaat Mühendisliği Civil Engineering

Jeoloji Mühendisliği Geological Engineering

İnşaat Mühendisliği Civil Engineering

Bilgisayar Mühendisliği Computer Engineering

Çevre Mühendisliği Environmental Engineering

İnşaat Mühendisliği Civil Engineering

Gıda Mühendisliği Food Engineering

Gıda Mühendisliği Food Engineering

Endüstri Mühendisliği Industrial engineering

Gıda Mühendisliği Food Engineering

İnşaat Mühendisliği Civil Engineering

Makine Mühendisliği Mechanical Engineering

Geomatik Mühendisliği Geomatics Engineering

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Electrical Electronics Engineering

Harita Mühendisliği Geomatics Engineering

Mekatronik Mühendisliği Mechatronics Engineering

Endüstri Mühendisliği Industrial Engineering

Maden Mühendisliği Mining Engineering

Makine Mühendisliği Mechanical Engineering

Çevre Mühendisliği Environmental Engineering

Makine Mühendisliği Mechanical Engineering

Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği Perolium and Natural Gas Engineering

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Electrical Electronics Engineering

İnşaat Mühendisliği Civil Engineering

Üretim Mühendisliği Manufacturing Engineering



NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2) Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences ISSN: 2564-6605 Cilt/Volume: 14 Sayı/Issue: 2 2025 www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh



Mizanpaj Editörleri/Layout Editors

Arş. Gör. Kıvanç Karacan	Mekatronik Mühendisliği Mechatronics Engineering
Arş. Gör. Metehan Bulut	İnşaat Mühendisliği Civil Engineering
Arş. Gör. Dr. 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
Dr. Öğr. Üyesi Tolga Kaynak	Harita Mühendisliği Geomatics Engineering
Arş. Gör. Yasemen İnce Keser	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Electrical Electronics Engineering
Arş. Gör. Yusuf Can Turanoğlu	Makine Mühendisliği Mechanical Engineering
Arş. Gör. Dr. Katibe Sinem Coruk	Gıda Mühendisliği Food Engineering

Dil Editörleri/Language Editors

Doç. Dr. Fatih Çelik	İnşaat Mühendisliği Civil Engineering
Doç. Dr. Hande Baltacıoğlu	Gıda Mühendisliği Food Engineering
Doç. Dr. Hasan Erhan Yücel	İnşaat Mühendisliği Civil Engineering
Dr. Öğr. Üyesi Hamdi Muratçobanoğlu	Çevre Mühendisliği Environmental Engineering
Dr. Öğr. Üyesi Ömer Genç	Makine Mühendisliği Mechanical Engineering
Dr. Öğr. Üyesi Recep Yıldız	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Electrical Electronics Engineering
Arş. Gör. Dr. Efgan Uğur	Bilgisayar Mühendisliği Computer Engineering

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2)



Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences ISSN: 2564-6605 Cilt/Volume: 14 Sayı/Issue: 2 2025 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*











DergiP



ADVANCED SCIENCES INDEX







Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences ISSN: 2564-6605 Cilt/Volume: 14 Sayı/Issue: 2 2025 www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/ten/pub/ngumuh



436-442

443-457

458-472

473-481

482-489

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

Araştırma Makalesi/Research Article

Girdap akım testinde kullanılan farklı tip bobinlerin endüktansının teorik, deneysel ve sayısal incelenmesi

The inductance of various coil types used in eddy current testing: A theoretical, experimental, and numerical analysis

Memduh Suveren, ^{*}Emir Esim, Tuğba Baktır, Serhat Karaca, Furkan Korkmaz, Ömer Enes Yıldız

Research Article /Araştırma Makalesi

A Blockchain-based smart waste management system framework for used cooking oil collection process

Kullanılmış yemeklik yağ toplama süreci için blokzincir tabanlı akıllı atık yönetim sistemi çerçevesi

*Şenay Sadıç, Aslı Bay, Ali Engin Dorum, Anıl Kayan, Aissa Houdjedj

Research Article /Araştırma Makalesi

Experimental investigation of the parameters affecting the surface roughness of materials with different thicknesses by abrasive water jetting: Polymer, composite and elastomer materials

Aşındırıcı su jeti ile farklı kalınlıklardaki malzemelerin yüzey pürüzlülüğüne etki eden parametrelerin deneysel incelenmesi: Polimer, kompozit ve elastomer malzemeler

*Celalettin Baykara

Research Article /Araştırma Makalesi

Superior adsorption performance of high temperature solvothermal synthesized zirconium metal-organic framework nanoparticles in dye removal

Yüksek sıcaklıkta solvotermal sentezlenen zirkonyum metal-organik kafes nanopartiküllerinin boya giderimindeki üstün adsorpsiyon performansı

*Nergiz Kanmaz

Araştırma Makalesi/Research Article

Si₃N₄ katkılı Al7075 matrisli kompozitlerin mikroyapısının ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi

Investigation of microstructure and tribological properties of Si₃N₄ reinforced Al7075 matrix composites

Aleyna Taşkın, Elif Işık, *Mahmut Can Şenel

Research Article /Araştırma Makalesi

Optimizing carbon emission reduction in hybrid microgrids: A case study integrating photovoltaics and hydrogen energy systems

Hibrit mikro şebekelerde karbon emisyonunun azaltılması: Fotovoltaik ve hidrojen enerji sistemlerinin entegrasyonu üzerine bir vaka çalışması

*Hüsnügül Tekin, Heybet Kılıç, Cem Haydaroğlu, Mehmet Emin Asker

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh Araştırma Makalesi/Research Article Kohezif ara yüzey elemanlar aracılığıyla dairesel yığma kemerlerin sistematik olarak modellenmesi ve kırılma mekanizmalarının belirlenmesi Modeling of circular masonry arches systematically via cohesive interface elements and determination of failure *Sedat Kömürcü Research Article /Araştırma Makalesi Using transfer learning models for DNA sequence similarity via fCGR method

Sayı/Issue: 2

2025

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2) Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences ISSN: 2564-6605

fCGR yöntemi ile DNA dizi benzerliği için transfer öğrenme modellerinin kullanılması

Cilt/Volume: 14

*Emre Delibaş

Research Article /Araştırma Makalesi

Transforming ladle furnace slag into an efficient catalyst for hydrogen production by ammonia decomposition

Pota ocağı cürufunun amonyak ayrışması yoluyla hidrojen üretimi için verimli bir katalizöre dönüştürülmesi

*Samira F. Kurtoğlu Öztulum

Araştırma Makalesi/Research Article

Çok yönlü dövme ve yaşlandırma işlemlerinin Cu-Co-Be-Ni alaşımının darbe davranışına olan etkisinin incelenmesi

Investigation of the effect of multi-directional forging and aging processes on the impact behavior of Cu-Co-Be-Ni alloy

*Harun Yanar

Araştırma Makalesi/Research Article

Üniversite kampüs girişi uçucu organik bileşik seviyeleri ve mesleki maruziyetin tahmin edilmesi

University campus entrance volatile organic compound levels and estimating occupational exposure

*Yetkin Dumanoğlu, Aslıhan Irmalı

Araştırma Makalesi/Research Article

Betonarme binalarda sismik izolatör ve viskoz sönümleyici kullanılmasının deprem davranışına etkisinin nümerik olarak incelenmesi

Numerical investigation of the effect of using seismic isolators and viscous dampers on earthquake behavior in reinforced concrete buildings

Burak Çakıl, ^{*}Ömer Faruk Osmanlı, Muhammet Karaton

Research Article /Arastırma Makalesi

Statistical analysis of mechanical properties of waste glass powder substituted glass fiber mortars by ANOVA

Atık cam tozu ikameli cam elyaf içeren harçların mekanik özelliklerinin ANOVA ile istatistiksel analizi

*Mehmet Timur Cihan, Veysel Akyüncü



mechanisms

532-541

516-531

504-515

542-550

551-562

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2) Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences ISSN: 2564-6605 Cilt/Volume: 14 Sayı/Issue: 2 2025

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

Araştırma Makalesi/Research Article

Farklı tatlandırıcılar ve kaymak kullanımı ile üretilen Höşmerim tatlısının akrilamid içeriği ve bazı özellikleri

Acrylamide content and some properties of Höşmerim dessert produced by using clotted cream and different sweeteners

Gamze Mutlu, *Sümeyra Uğur, Bedia Şimşek

Research Article /Araştırma Makalesi

Competitive hybrid Jaya and β -Hill Climbing algorithm for high-cost optimization problems

Yüksek maliyetli optimizasyon problemleri için rekabetçi hibrit Jaya ve β -Hill Climbing algoritması

Gürcan Yavuz, *Hatem Dumlu, Yacoub Kadar Hassan

Research Article / Araştırma Makalesi

Job rejection scheduling problems with deterioration and learning effects

Bozulma ve öğrenme etkisi altında iş reddetmeli çizelgeleme problemi

*Berrin Atalay, M. Duran Toksarı

Research Article /Araştırma Makalesi

Spatial modeling of chlorophyll-a parameter by Landsat-8 satellite data and deep learning techniques: The case of Lake Mogan

Landsat-8 uydu verileri ve derin öğrenme teknikleri ile klorofil-a parametresinin mekansal modellenmesi: Mogan Gölü örneği

*Osman Karakoç, İlkay Buğdaycı

Investigation the effects of photovoltaic systems on electricity distribution networks and determining the optimum network structure

Fotovoltaik sistemlerin elektrik dağıtım şebekelerine etkilerinin incelenmesi ve en uygun şebeke yapısının belirlenmesi

*Ahmet Sarı, Hüseyin Erişti

Research Article /Arastırma Makalesi

Research Article /Arastırma Makalesi

Research Article /Araştırma Makalesi

Investigation of the physical properties of armor steel after cataphoresis coating

Zırh çeliğinin kataforez kaplama sonrasında fiziksel özelliklerinin araştırılması

İsmet Can Beller, *Memduh Kara

Deep learning on the production line: A novel lightweight CNN model approach for efficient and fast defect detection

Üretim hattında derin öğrenme: verimli ve hızlı kusur tespiti için yeni bir hafif CNN modeli yaklaşımı

*Hakan Tatar, Muhammed Furkan Küçük



588-596

597-606

607-614

649-658

642-648

615-629

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences ISSN: 2564-6605

Cilt/Volume: 14 Sayı/Issue: 2 2025

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

Research Article /Araştırma Makalesi

Seismic performance evaluation of space-frame structures using nonlinear static and time-history analyses

Uzay kafes yapılarının sismik performansının doğrusal olmayan statik ve zaman-tarih analizleri ile değerlendirilmesi

*Fooad Karimi Ghaleh Jough, Sasan Babaei

Araştırma Makalesi/Research Article

CatBoost algoritmasının taşınmaz değerlemede kullanımı: Bayesian hiperparametre optimizasyonu ile karşılaştırmalı analiz

The use of Catboost algorithm in real estate valuation: A comparative analysis with Bayesian hyperparameter optimization

*Berra Nur Tunç, Ümit Haluk Atasever

Araștırma Makalesi/Research Article

Fırçasız doğru akım motorların adaptif filtre tabanlı MRAS ile hız algılayıcısız doğrudan moment kontrolü

Speed sensorless direct torque control of brushless direct current motors with adaptive filter based MRAS

*Canberk Tuzcu, Engin Cemal Mengüç, Rıdvan Demir, Remzi İnan

Research Article /Araştırma Makalesi

Malsmsdetector: Malicious text message detector with hybrid feature vector and stacked ensemble model: a comparative study

Malsmsdetector: Hibrit özellik vektörü ve istiflenmiş topluluk modeli kullanan kötücül mesaj tespit aracı: karşılaştırmalı bir çalışma

*Recep Sinan Arslan

Araştırma Makalesi/Research Article

Kentsel büyümenin vektör hücresel otomat yaklaşımı ile yüksek çözünürlüklü modellenmesi

Modelling urban growth in high resolution employing vector cellular automata approach

*Ahmet Emir Yakup, İsmail Ercüment Ayazlı

Araștırma Makalesi/Research Article

Metalik malzemeler üzerine kendi kendini iyileştiren kaplamaların geliştirilmesi ve karakterizasyonu

Development and characterization of self-healing coatings on metallic materials

*Emre Pehlivan, Taha Yasin Eken, Ebru Devrim Şam Parmak

Research Article/Araștırma Makalesi

Experimental investigation of the behavior of unreinforced masonry structures under horizontal loads as defined in TBDY-2018

TBDY-2018'de belirtilen yığma yapı türlerinden donatısız yığma yapıların yatay yükler etkisi altındaki davranışlarının deneysel olarak incelenmesi

*Mehmet Orhan, M. Sami Döndüren



688-700

701-711

712-721

659-667

668-679

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2)

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences ISSN: 2564-6605 Cilt/Volume: 14 Sayı/Issue: 2 2025

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

Araştırma Makalesi/Research Article

Vinç temel altı grup kazıkların taşıma gücü ve oturmasının değerlendirilmesi: Vaka analizi

Evaluation of the bearing capacity and settlement of the pile groups for the crane foundation: Case study

*Esra Tathoğlu, Firdevs Uysal

Araştırma Makalesi/Research Article

Niğde (Orta Anadolu, Türkiye) Merkezi yeraltısuyunun kalite değerlendirmesi

Quality assessment of groundwater in Central Nigde (Central Anatolia, Türkiye)

^{*}Uğur Erdem Dokuz, Selma Yaşar Korkanç, Mustafa Korkanç, Hilal Dokuz

Research Article/Araştırma Makalesi Mixed model assembly line balancing with in-house parts supply considering the supermarket concept: A new mathematical model

Süpermarket konseptini dikkate alarak tesis içi parça tedariki ile karışık modelli montaj hattı dengeleme: Yeni bir matematiksel model

Emel Kızılkaya Aydoğan, Yılmaz Delice, *Salih Himmetoğlu

	151 157
Araştırma Makalesi/Research Article	
Jeodezik ağlarda matematiksel model seçiminin dengeleme sonuçlarına etkisi	
Effect of mathematical model selection on adjustment results in geodetic networks	
*Nihal Tekin Ünlütürk, Uğur Doğan	
	760-774
Research Article/Araştırma Makalesi	
Provincial-level analysis of land use changes following the 2023 Kahramanmaraş earthquakes using sentinel-2 land use/land cover time series data	
Sentinel-2 arazi kullanımı/arazi örtüsü zaman serisi verileri kullanılarak 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrası arazi kullanımındaki değişimlerin il düzeyinde analizi	
Ceren Yağcı, [*] Münevver Gizem Gümüş	

Araştırma Makalesi/Research Article

Sismik yükler altında yapı-kazık-zemin etkileşimi kapsamında kinematik ve eylemsizlik etkileşim analizlerinin Plaxis-3D sonlu elemanlar programıyla modellenmesi-Bir vaka analizi

Modeling of kinematic and inertial interaction analyses within the scope of structure-pile-soil interaction under seismic loads using plaxis-3d finite element program- A case study

*Fatih Çelik

Review Article/Derleme Makalesi

Review of studies on NAO robot

NAO robot üzerindeki çalışmaların incelemesi

*Tuğba Kara, Ahmet Gökçen





732-737

738-750

751 750



791-802

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2)



Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences ISSN: 2564-6605 Cilt/Volume: 14 Sayı/Issue: 2 2025 www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/ten/pub/ngumuh



Derleme Makalesi /Review Article

Geleceğin otomotivleri için hangi sayısal veri yolu?

Which digital data bus for the automotive of the future?

*Yasemin Yılmazoğlu, Ufuk Sakarya

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 436-442



Niğde Ömer Halisdemir Üni**ver**sitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araștırma makalesi / Research article

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



Girdap akım testinde kullanılan farklı tip bobinlerin endüktansının teorik, deneysel ve sayısal incelenmesi

The inductance of various coil types used in eddy current testing: A theoretical, experimental, and numerical analysis

Memduh Suveren¹, Emir Esim^{2,*}, Tuğba Baktır³, Serhat Karaca⁴, Furkan Korkmaz⁵, Ömer Enes Yıldız⁶

^{1.2} Erciyes Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 38030, Kayseri Türkiye ^{3,4,5,6} Hasçelik Kablo A.Ş, 38070, Kayseri Türkiye

Öz

Elektrik enerjisinin iletiminde Alüminyum Kaplı Çelik (ACS) teller sıklıkla kullanılmaktadır. Bu tellerin imalatı esnasında yüzeylerinde meydana gelen deformasyonları tespit etmek için tahribatsız muayene yöntemlerinden biri olan girdap akım test sistemleri kullanılmaktadır. Bu test sisteminde ver alan sensörler, malzeme vüzevindeki kusurların tespitinde indüktans değisimlerini referans almaktadır. Sensörlerdeki indüktans değerlerinin belirlenmesinde analitik, numerik ve deneysel yöntemler tercih edilmektedir. Bu çalışmada analitik hesaplama için Harold A. Wheeler yöntemi ve numerik hesaplama için sonlu elemanlar metodundan faydalanarak COMSOL Multiphysics programı kullanılmıştır. Referans olması için aynı parametrelerle üretilen 26 adet bobinin indüktans değerleri deneysel olarak ölcülmüs ve diğer iki yöntemle hesaplanan indüktans değerlerinin doğruluğu karşılaştırılarak bobin indüktansının hesaplanmasında hangi yöntemin daha güvenilir olduğu belirlenmiştir. Harold A. Wheeler yönteminin referans olarak kullanılan LCR metre ölçümlerine göre sapma değeri %0.02 ile %6.32 COMSOL aralığında, geliştirilen Multiphysics yöntemindeki sapma değeri ise %0.18 ile %4.83 aralığında hesaplanmıştır. Önerilen bu yöntemin endüstriyel uygulamalarda daha etkin olacağı ortaya konulmuştur.

Anahtar kelimeler: Eddy akım sensörü, Bobin indüktansı, COMSOL Multiphysics, Harold A. Wheeler yöntemi

1 Giriş

Alüminyum Kaplı Çelik (ACS) teller, hem korozyona karşı dirençli olması hem de akım taşıma kapasitesinin yüksek olmasından dolayı Optik Topraklama İletkeni (OPGW) yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Bununla birlikte ACS tellerin üretim sürecindeki olumsuzluklar sebebiyle teller üzerinde deformasyonlar meydana gelmektedir [2-4]. Teller üzerinde meydana gelen deformasyonların tespit edilmesi, kalite kontrol süreci açısından kritik öneme sahiptir [5, 6]. Malzemelerin elektriksel iletkenlikleri ve manyetik özelliklerindeki değişime duyarlı olan girdap akım test sistemleri, bu kalite

Abstract

In the transmission of electrical energy, Aluminum Coated Steel (ACS) wires are frequently used. During the manufacturing of these wires, eddy current testing systems, which are one of the non-destructive testing methods, are used to detect deformations that occur on their surfaces. The sensors included in this test system reference inductance changes to detect defects on the material surface. In determining the inductance values in sensors, analytical, numerical, and experimental methods are preferred. In this study, the COMSOL Multiphysics program was used by employing the Harold A. Wheeler method for analytical calculations and the finite element method for numerical calculations. For reference, the inductance values of 26 coils produced with the same parameters were experimentally measured, and the accuracy of the inductance values calculated by the other two methods was compared to determine which method is more reliable for calculating coil inductance. According to the reference LCR meter measurements for the Harold A. Wheeler method, the deviation value ranges from 0.02% to 6.32%, while the deviation value for the developed COMSOL Multiphysics method is calculated to be in the range of 0.18% to 4.83%. It has been shown that this proposed method will be more effective in industrial applications.

Keywords: Eddy current sensor, Coil inductance, COMSOL Multiphysics, Harold A. Wheeler method

kontrol sürecinin uygulamasında yer alan tahribatsız muayene yöntemlerinden biridir [7-10].

Girdap akım testlerinde bobinler, elektromanyetik indüksiyon prensibi ile çalışarak malzemede girdap akımları oluşturur. Bu akımların neden olduğu indüktans değişimleri, malzemedeki kusurları tespit etmek için sensör olarak kullanılmaktadır [11, 12]. Girdap akımı test sisteminde kullanılan bobinin indüktans değeri, test edilen malzemenin elektriksel ve manyetik özelliklerine bağlı olarak değişir ve bu durum testin hassasiyetini ve doğruluğunu doğrudan etkiler. [13-15]. Bobin indüktans değerini hesaplamanın başta numerik, deneysel ve Sonlu Elemanlar Metodu (SEM)

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: emiresim@erciyes.edu.tr (E. Esim) Geliş / Received: 30.10.2024 Kabul / Accepted: 11.01.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngumuh.1574899

olmak üzere birçok yöntemi mevcuttur [16-19]. Analitik hesaplamalarda geometrik boyutlar ve malzemelerin elektromanyetik özellikleri ilişkilidir [13].

bobin Bu çalışmada indüktans değerinin hesaplanmasında bahsedilen yöntemlerin karşılaştırılması hedeflenmiştir. İlk aşamada analitik olarak bobin indüktans hesabı yapılması için Harold A. Wheeler formülü kullanılmıştır [20]. Wheeler formülü ile hesaplanan indüktans değerlerini karşılaştırmak amacıyla, COMSOL Multiphysics programında bobin parametreleri (karkas iç çapı, karkas iç uzunluğu, sarılan tel çapı, katman sayısı ve sarım sayısı) eş değer olacak şekilde 3 boyutlu bobin tasarımları yapılmış ve SEM simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Son aşamada ise gerçek deneysel bobinler için bobinlerin indüktans değerleri LCR (İndüktans (L), Kapasitans (C), Direnç (R)) metre ile ölçülmüştür. Bu çalışmada Bobin indüktans değeri hesaplamasında kullanılan COMSOL Multiphysics SEM tekniği ile literatürde kabul görmüş ve sıklıkla kullanılan Wheeler formülüne üstünlük sağlanmıştır. Her iki yöntemin karşılaştırılması noktasında ise deneysel olarak sarımı gerçekleştirilen bobinlerin indüktans ölçümleri, literatürde de yapıldığı gibi referans kabul edilmiştir [21].

Çalışmanın geri kalan kısmı şu şekilde düzenlenmiştir. Materyal metot bölümünde bobinlerin tasarımı, imalatı, sarımı ve LCR metre ile ölçümlere yer verilmiştir. Yine bu bölümde imalatı yapılan bobinlere ait numerik hesaplamalar ve COMSOL Multiphysics analizleri bu bölümde sunulmuştur. Sonuçlar kısmında ise elde edilen sonuçlar sunularak değerlendirilmesine yer verilmiştir.

2 Materyal ve metot

Bu çalışmada, bobin indüktans değerlerinin hesaplanması için Harold A. Wheeler formülü, COMSOL Multiphysics simülasyonları ve LCR metre ölçümleri uygulanarak üç farklı yöntem kullanılmıştır. Harold A. Wheeler formülü ve COMSOL Multiphysics simülasyonları ile hesaplanan indüktans değerleri, deneysel çalışma metodu olan LCR metre sonuçları referans alarak karşılaştırılmıştır. Yöntemlerin uygulanması için Şekil 1'de gösterildiği gibi dairesel bobinler kullanılmıştır.



Şekil 1. Bobin karkas tasarımı a) 3D görünümü, b) Bobin parametreleri (D: Karkas iç çapı, L: Karkas iç uzunluğu, C: Sarım kalınlığı, d: Tel çapı).

2.1 Bobinlerin tasarımı ve imalatı

İndüktans değeri hesaplanacak bobinlerin üç boyutlu tasarımları Solidworks programında gerçekleştirilmiştir.

Tasarlanan bobin karkaslarında manyetik alanı bozmaması ve kolay işlenebilmesi sebebiyle derlin malzemesi seçilmiş ve talaşlı imalat yöntemiyle torna tezgâhında işlenmiştir. Bobinlerin sarımında Şekil 2'de gösterilen yarı otomatik sarım sistemi kullanılmıştır.



Şekil 2. Bobin sarma platformu.

Tabla	1	Sommlori	VODI	lan	hohi	inl	arin	noromatra	lari
1 auto	т.	Salimali	yapı	Iall	0001	um	CIIII	parametre	1011

Sarımı Yapılan Bobinler	Karkas iç Çapı (D,mm)	Karkas İç Genişliği (<i>l</i> ,mm)	Sarılan Tel Çapı (d,mm)	Sarılan Katman Sayısı	Sarım Sayısı (N)
Bobin 1	25.95	19.70	0.28	5	336
Bobin 2	25.90	19.80	0.28	5	344
Bobin 3	25.98	9.75	0.28	5	167
Bobin 4	26.10	9.75	0.28	5	166
Bobin 5	25.98	29.30	0.28	5	508
Bobin 6	25.92	29.75	0.28	5	506
Bobin 7	19.90	9.90	0.28	5	165
Bobin 8	19.88	9.90	0.28	5	169
Bobin 9	19.80	19.75	0.28	5	333
Bobin 10	19.85	19.70	0.28	5	345
Bobin 11	19.86	29.95	0.28	5	506
Bobin 12	19.88	29.76	0.28	5	513
Bobin 13	19.86	29.95	0.28	5	410
Bobin 14	19.86	29.95	0.28	5	509
Bobin 15	14.10	9.74	0.28	5	168
Bobin 16	14.10	9.72	0.28	5	164
Bobin 17	14.11	19.71	0.28	5	334
Bobin 18	14.08	19.78	0.28	5	331
Bobin 19	14.10	29.63	0.28	5	501
Bobin 20	14.24	29.71	0.28	5	500
Bobin 21	7.95	9.75	0.28	5	160
Bobin 22	8.00	9.65	0.28	5	156
Bobin 23	7.99	19.65	0.28	5	329
Bobin 24	8.03	19.56	0.28	5	320
Bobin 25	7.92	29.71	0.28	5	488
Bobin 26	8.60	29.64	0.28	5	500

Sarımların hassasiyetini ve doğruluğunu arttırmak için ATMEGA 328 mikrodenetleyicisi tarafından kontrol edilen step motor kullanılmıştır. Sarım esnasında sarım sayısının takibi endüktif sensör ile veri takibi ise LCD ekran ile yapılmıştır. Şekil 1(b)'de belirtilen bobin parametreleri doğrultusunda, Tablo 1'de listelenen 26 adet bobin bu yöntem kullanılarak sarılmıştır. Buradaki değerler, farklı parametrelerin (karkas iç çapı, karkas iç uzunluğu ve sarım sayısı) indüktans değişimine etkisini görmek amacıyla seçilmiştir. Belirtilen parametreler aynı zamanda endüstride kullanılan bobinlere yakın ölçüleri de yansıtmaktadır.



Şekil 3. Örnek bir bobinin ölçümü.

2.2 LCR metre ile bobin indüktanslarının ölçülmesi

LCR metre, bobinin indüktans değerini ölçmek için belirli bir frekansta kullandığı Alternatif Akım (AC) voltaj sinyallerindeki ve akım değişimlerinden faydalanmaktadır. Bobin, uygulanan AC sinyaline karşı indüktif bir tepki göstermektedir ve bu tepki, sinyalin faz kayması ve genlik değişimi şeklinde gözlemlenmektedir. LCR metre, bu faz kaymasını ve voltaj değişimlerini analiz ederek bobinin indüktansını hesaplamaktadır. Bu çalışmada, bobinlerin indüktans değerleri LCR metre ile 10 kHz frekansta ölçülmüştür. Deneylerde 20uH-2000H indüktans aralığına ve $\pm (0.5\%+5)$ hassasiyetine sahip UT612 marka LCR metre kullanılmıştır.

Ölçüm sonuçları, bobinlerin performans ve tasarım parametrelerinin değerlendirilmesinde kritik bir rol oynamış ve örnek olarak bir bobin indüktans değerinin ölçülmesi Şekil 3'te ayrıntılı olarak sunulmuştur. Referans olarak kullanılacak olan 26 adet bobinlerin LCR metre ile ölçülen indüktans değerleri Bölüm 3'te Tablo 3'te gösterilmiştir.

2.3 Harold A. Wheeler yöntemi ile bobin indüktans değerlerinin hesaplanması

Harold A. Wheeler'in indüktans hesaplama yöntemi, yüksek frekansta çalışan devrelerde bobinlerin indüktansını belirlemede kullanılan bir yöntemdir [20]. Bu hesaplama yöntemi, bobinlerin geometrik boyutlarını dikkate alınarak indüktans değerini hesaplamaktadır. Wheeler formülündeki parametreler ve bobinin yapısı Şekil 1 (b)'de gösterilmiştir. Bobinlerin indüktans değerini hesaplamak için kullanılan Harold A. Wheeler formülü Denklem (1)'de verilmiştir [20].

$$L = \frac{(0.8)a^2 N^2}{6a + 9l + 10c} \tag{1}$$

Paylaşılan denklemde N sarım sayısını, a bobin merkezinden katman sayısının orta noktasına olan uzaklığını, l sarımın yapıldığı karkas iç genişliğini, c sarım kalınlığını ve L indüktans değerini mikroHenry (uH) olarak ifade etmektedir. Uzunluk birimleri inç kabul edilmektedir.

Wheeler formülündeki *a* değeri, bobinin sarım çapı (D) ve sarım kalınlığı ile hesaplanmıştır. Bu ilişki Denklem (2)'de gösterilmiştir.

$$a = \frac{c+D}{2} \tag{2}$$

Denklem (1) ve Denklem (2)'de yer alan sarım kalınlığı ise sarım sayısı, sarılan telin çapı (d) ve karkas iç genişliği ile Denklem (3) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$c = \frac{Nd^2}{l} \tag{3}$$

2.4 Sonlu elemanlar metodu ile bobin indüktans değerlerinin hesaplanması

COMSOL Multiphysics, sonlu elemanlar metodunu kullanarak 2D ve 3D simülasyonlar yapmayı sağlayan bir programdır [22-24]. Elektromanyetik alanların modellemesinde yüksek doğruluk sağladığı için geniş bir uygulama alanına sahiptir ve karmaşık elektromanyetik olayların kolaylıkla hesaplanmasını sağlamaktadır [25-27]. Bu çalışmada imalattan önce istenen indüktans değerine göre belirlenmesi bobin parametrelerinin amaçlanmıştır. Simülasyonlar, AC/DC fizik alanı altında bulunan Manyetik Alanlar (mf) modülü kullanılarak frekans etki alanında gerçekleştirilmiştir [28, 29]. Farklı bobin tiplerinin kolay bir şekilde simüle edilebilmesi için geometrik yapı parametrik olarak Sekil 4'teki gibi olusturulmustur. Ayrıca malzeme özellikleri ve voltai-frekans değerleri ile sınır sartları Tablo 2'deki gibi belirlenmiştir. Manyetik izolasyon sağlamak için bobinler, yarıcapı 1m olan hava dolu bir kürenin tam ortasına yerleştirilerek analizler yapılmıştır.

Tablo 1'de paylaşılan parametreler kullanılarak örnek teşkil etmesi amacıyla Bobin 1 için Şekil 4(b)'de gösterilen bobin modeli oluşturulmuştur. Bobine, Şekil 4(c)'de gösterildiği gibi mesh ataması yapılmıştır. Bu bobin örneği için tüm mesh 918 alan elemanı, 80 sınır elemanından oluşmaktadır. Tüm simülasyonlarda triangular mesh yapısı kullanılmıştır. Yapılan bu işlem tüm bobin modelleri için gerçekleştirilmiş ve toplamda 26 farklı bobin için, COMSOL Multiphysics programında oluşturulan makrolar çalıştırılmıştır. Mesh bağımsızlığını sağlamak amacıyla, farklı mesh boyutlarında ön analizler gerçekleştirilmiştir. Sonucun önemli ölçüde değişmediği mesh boyutu dikkate alınarak tüm bobinlerde analizler yapılmıştır. Mesh bağımsızlığı Şekil 5'te örnek bir bobin için verilmiştir.

Bir numaralı bobin (Bobin 1) analizi için sarım çapı, sarım kalınlığı, sarım sayısı, karkas iç genişliği, frekans ve voltaj değerleri gibi parametreler Tablo 1' den alınarak bobin geometrisinin oluşturulması için program ara yüzünde tanımlanmış ve Tablo 2'deki gibi sunulmuştur.



Şekil 4. COMSOL Multiphysics bobin tasarımı: a) Sarım bölgesi kesiti, b) 3D bobin görünüm, c) Mesh yapısı.

 Tablo 2. Simülasyona tanımlanan "Bobin 1" parametre tablosu.

Parametre Adı	Parametre Değeri
Sarım Uzunluğu *	19.7 mm
Bobin İç Yarıçapı *	12.975 mm
Bobin Dış Yarıçapı *	14.375 mm
Bobin Sarım Sayısı *	336
Frekans	10000 Hz
Bobin Voltajı	0.85 V
Sınır Uzay tipi, Yarıçapı	Küre, 1m
Bobin Tel İletkenliği (Cu)	5.9x10 ⁷ S/m

Simülasyonlar Tablo 2'deki ilgili bobin değerlerinin parametrik değişken olarak tanımlanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Buna göre Tablo 1'de paylaşılan ve diğer 26 adet bobinin çözümleri sırasıyla bu şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. Örnek bir bobin için mesh bağımsızlığı grafiği (I-X: 10 farklı mesh hassasiyeti).

3 Deneysel ve simülasyon bulguları

Bu çalışmada, girdap akımı test sisteminde kullanılan bobinlerin indüktans değerleri, Harold A. Wheeler formülü ve COMSOL Multiphysics programı kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca, laboratuvar ortamında aynı parametrik ölçülerde sarımlar gerçekleştirilerek, teorik ve simülasyon sonuçları LCR metre ile elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Tablo 1'de ölçüleri verilen 26 adet bobinin Harold A. Wheeler formülü, COMSOL Multiphysics programı ile hesaplanan indüktans değerleri ve LCR metre ile ölçülerek referans olarak kullanılan indüktans değerleri Tablo 3'te detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 3. Bobinlerin indüktans değerleri.

Sarımı Yapılan Bobinler	DİD* (µH)	WHİ* (µH)	CHİ* (μH)	Sapma1* (%)	Sapma2* (%)
Bobin 1	2470.00	2432.60	2459.80	1.51	0.41
Bobin 2	2460.00	2533.55	2562.90	2.99	4.18
Bobin 3	861.80	895.23	875.50	3.88	1.59
Bobin 4	837.60	890.57	870.77	6.32	3.96
Bobin 5	4315.00	4233.32	4370.00	1.89	1.27
Bobin 6	4321.00	4137.17	4274.30	4.25	1.08
Bobin 7	586.60	582.38	576.64	0.72	1.70
Bobin 8	609.90	610.03	604.05	0.02	0.96
Bobin 9	1587.70	1536.81	1573.00	3.21	0.93
Bobin 10	1629.40	1659.31	1698.00	1.84	4.21
Bobin 11	2747.00	2623.50	2733.10	4.50	0.51
Bobin 12	2761.00	2722.21	2833.50	1.40	2.63
Bobin 13	1754.50	1727.34	1757.60	1.55	0.18
Bobin 14	2731.00	2662.22	2771.80	2.52	1.49
Bobin 15	346.00	361.11	362.71	4.37	4.83
Bobin 16	334.70	344.53	346.03	2.94	3.39
Bobin 17	912.90	891.44	919.93	2.35	0.77
Bobin 18	903.10	870.16	898.09	3.65	0.55
Bobin 19	1513.50	1457.79	1521.10	3.68	0.50
Bobin 20	1527.50	1473.12	1537.30	3.56	0.64
Bobin 21	140.720	136.54	138.77	2.97	1.39
Bobin 22	135.88	131.94	134.07	2.90	1.33
Bobin 23	341.70	345.74	354.48	1.19	3.74
Bobin 24	334.80	330.90	339.31	1.16	1.35
Bobin 25	541.20	531.07	544.89	1.87	0.68
Bobin 26	643.90	638.46	657.72	0.84	2.15

*DİD: LCR metre ile ölçülen deneysel indüktans değeri.

*WHİ: Wheeler formülü ile hesaplanan indüktans değeri.

*CHİ: COMSOL Multiphysics ile hesaplanan indüktans değeri.

*Sapma1: WHI ile DID arasındaki % sapma.

*Sapma2: CHİ ile DİD arasındaki % sapma.



Şekil 6. Farklı bobinlerin elektrik alan dağılımları a) Bobin 1, b) Bobin 13, c) Bobin 17, d) Bobin 21

Tablo 3'e göre indüktansı hesaplanan 26 adet bobinde Wheeler formülü ile referans olarak kullanılan LCR metre ölçümleri arasındaki sapma değerleri incelendiğinde, en düşük sapma değeri Bobin 8 için 0.02% olarak hesaplanmıştır. Ancak, Bobin 4 için bu sapma değeri 6.32%'ye yükselmiştir; bu da Wheeler formülünün bazı durumlarda LCR metre ile elde edilen deneysel sonuçlardan büyük ölçüde sapabileceğini göstermektedir. Buna göre, Wheeler formülü ile elde edilen sapma değerleri 0.02% ile 6.32% arasında değişmektedir. COMSOL Multiphysics simülasyon sonuçları ile referans olarak kullanılan LCR metre ölçümleri arasındaki sapma değerleri incelendiğinde, minimum sapma değeri Bobin 13'te 0.18% olarak hesaplanmıştır. Bu, simülasyonun deneysel verilerle oldukça uyumlu olduğunu göstermektedir. En yüksek sapma değeri ise Bobin 15'te 4.83% olarak hesaplanmıştır.

Ayrıca 4 adet farklı bobin için elektrik alan dağılımı Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'da her bir sonuç aynı perspektif ve mesafeden farklı boyut ve sarımlardaki bobinlerin elektrik alan dağılımlarını göstermektedir. Bilindiği gibi elektrik alan değeri bobin indüktansına doğrudan etki eden bir ölçüm değeridir. Sonuç olarak sırasıyla bobin 1, bobin 13, bobin17 ve bobin 21 için COMSOL Multiphysics simülasyonlarında elde edilen elektrik alan değerlerinin Tablo 3'teki indüktans değerleri ile orantılı olduğu görülmektedir.

4 Tartışma ve sonuçlar

COMSOL Multiphysics simülasyon sonuçları, Wheeler formülü ile yapılan hesaplamalara kıyasla LCR metre ölçümlerine daha yakın sonuçlar vermektedir. Tablo 3'te hesaplanan sapma değerleri dikkate alındığında; 26 bobinin 16 tanesinde COMSOL Multiphysics programı ile LCR metre ile yapılan ölçümler arasındaki sapma değerleri, Wheeler formülüne göre daha düşük bulunmuştur. Bu, COMSOL Multiphysics'in deneysel indüktans hesaplamalarında daha yüksek bir doğruluk sunduğunu göstermektedir. Benzer şekilde COMSOL Multiphysics ve Wheeler formülünün istatiksel CDF (Kümülatif Dağılım Fonksiyonu) karşılaştırması Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. COMSOL Multiphysics ve Wheeler formülünün istatiksel CDF karşılaştırması.

Şekil 7'de COMSOL ve Wheeler formülü arasındaki Kümülatif Dağılım Fonksiyonu (CDF) karşılaştırması, bu iki yöntem arasındaki hataları istatistiksel olarak incelemek amacıyla yapılmıştır. Grafik, % hata cinsinden her iki yaklaşımın LCR metreden sapmalarını göstermektedir. COMSOL ve Wheeler verisi karşılaştırıldığında, COMSOL'un düşük hata oranlarında Wheeler'a göre daha hızlı birikim gösterdiği gözlemlenmektedir. Bu da, COMSOL'un hata dağılımının genel olarak daha düşük olduğunu ve daha doğru sonuçlar ürettiğini ispatlamaktadır. Örnek olarak, grafiğe göre ölçülen hatanın %2.5 değerinin altında olma olasılığı COMSOL yönteminde %73 olasılık ile mümkün iken Wheeler tekniğinde %46 olasılık ile mümkündür. Bu da COMSOL yönteminin istatistiksel açıdan da daha iyi olduğunu ispatlamaktadır.

Sonuç olarak;

- COMSOL Multiphysics programı, bobin sarımlarındaki tellerin arasındaki boşlukların etkisini hesaplayabilmesi ve bobinlerin 3D olarak modellenebilmesi bakımından Harold A. Wheeler yöntemine kıyasla önemli hassas hesaplama avantajı sunmaktadır [30, 31].
- Harold A. Wheeler formülü, indüktans hesaplamalarında geleneksel bir yaklaşım olarak literatürde kullanılmaya devam etse de deneysel ölçümlere kıyasla yüksek sapmaların olabileceği görülmektedir.
- COMSOL Multiphysics programı bobin indüktanslarının tespitinde daha yüksek doğruluk sağladığı bu çalışmada istatistiksel olarak da ispatlanmıştır. Bu sebeple hassas sonuçlar gerektiren uygulamalarda COMSOL Multiphysics programının Wheeler formülüne kıyasla tercih edilebileceği sonucuna ulaşılmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma TUBİTAK 1505 Üniversite Sanayi iş birliği projesi kapsamında 5220140 kodu ile desteklenmektedir. Ayrıca çalışmamız Hasçelik Kablo San. Tic. A. Ş. Ar-Ge Merkezi bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Katkılarından dolayı firmaya ve TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %2

Kaynaklar

- [1] B. Li, L. Liu, P. Dang, G. Wang, L. Tang, and T. Li, Study on corrosion test of corrosion-proof steel core of high-anticorrosive conductor. In 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), pp. 1-4, Beijing, China, 6-10 September 2020.
- [2] N. A. Jaffrey and S. Hettiwatte, Corrosion detection in steel reinforced aluminium conductor cables. In 2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), pp. 1-6, Perth, Australia, 28 September - 1 October 2014.
- [3] A. S. Arman, S. W. Glass, L. S. Fifield, and M. Ali, Non-conductor-contact surface wave reflectometry for cable insulation damage detection, IEEE Sensors Journal, 22(11), 11065-11074, 2022. https://doi.org /10.1109/JSEN.2022.3167609.
- [4] K. J. Stevens, K. Lichti, I. A. Minchington, N. Janke-Gilman, T. Mactutis, D. Rook, and P. Bondurant, Conductor damage inspection system for overhead ACSR power cables CDIS on ACSR. In 2013 Seventh International Conference on Sensing Technology (ICST), pp. 901-905, Wellington, New Zealand, 3-5 December 2013.

- [5] X. Huang, R. Ding, W. Pan, C. Yang, Y. Xu, Y. Miao, Q. Zhuang, J. Zhu, M. Wu, Z. Lei, and Y. Li, Overview of quality control issues related to submarine cables in project cycle of offshore wind power projects in Jiangsu. In 2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), pp. 1-5, Nanjing, China, 20-23 September 2020.
- [6] T. N. Hung, Methods for fault location in high voltage power transmission lines: A comparative analysis. International Journal of Renewable Energy Development, 11(4), 1134-1141, 2022. https://d oi.org/10.14710/ijred.2022.46501.
- [7] O. Kara, H. Erdal, ve H. H. Çelik, Tahribatsız test yöntemleri: Karşılaştırmalı bir derleme çalışması. Marmara Fen Bilimleri Dergisi, 29(3), 82-93, 2017. https://doi.org/10.7240/marufbd.326674.
- [8] K. Tsukada, M. Hayashi, Y. Nakamura, K. Sakai, and T. Kiwa, Small eddy current testing sensor probe using a tunneling magnetoresistance sensor to detect cracks in steel structures. IEEE Transactions on Magnetics, 54(11), 1-5, 2018. https://doi.org/10.1109/T MAG.2018.2845864.
- G. Peruń, Advances in non-destructive testing methods. Materials, 17(3), 554, 2024. https://doi.org/10.3390/m a17030554.
- [10] S. K. Dwivedi, M. Vishwakarma, and P. A. Soni, Advances and researches on non destructive testing: A review. Materials Today: Proceedings, 5(2), 3690-3698, 2018. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017 .11.620.
- [11] C. Wang, M. Fan, B. Cao, B. Ye, and W. Li, Novel noncontact eddy current measurement of electrical conductivity. IEEE Sensors Journal, 18(22), 9352-9359, 2018. https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2870676.
- [12] J. García-Martín, J. Gómez-Gil, and E. Vázquez-Sánchez, Non-destructive techniques based on eddy current testing. Sensors, 11(3), 2525-2565, 2011. https://doi.org/10.3390/s110302525.
- [13] W. Cheng, Measurement of magnetic plates at a few hertz with two concentric coils and thickness estimation using mutual inductance. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 70, 1-10, 2021. https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3087820.
- [14] S. She, Y. Chen, Y. He, Z. Zhou, and X. Zou, Optimal design of remote field eddy current testing probe for ferromagnetic pipeline inspection. Measurement, 168, 108306,2021. https://doi.org/10.1016/j.measurement. 2020.108306
- [15] T. P. Theodoulidis and E. E. Kriezis, Impedance evaluation of rectangular coils for eddy current testing of planar media. NDT & E International, 35(6), 407-414, 2002. https://doi.org/10.1016/S0963-8695(02)000 08-7.
- [16] D. Vyroubal, Impedance of the eddy-current displacement probe: the transformer model. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 53(2),384-391,2004. https://doi.org/10.1109/TIM.200 3.822705.

- [17] S. Hao and B. Li, Calculation inductance of toroidal inductor wound by rectangular cross-sectional wire. IEEE Transactions on Plasma Science, 49(9), 2910-2915, 2021. https://doi.org/10.1109/TPS.2021.3101570.
- [18] T. Župan, Š. Ž, and B. Trkulja, Fast and precise method for inductance calculation of coaxial circular coils with rectangular cross section using the one-dimensional integration of elementary functions applicable to superconducting magnets. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 24(2), 81-89, 2014. https://doi.org/10.1109/TASC.2014.2301765.
- [19] W. Liu, S. Dai, T. Ma, Y. Shi, M. Song, and L. Li, Analytical calculation of mutual inductance of dshaped coils applied to high-temperature superconducting magnet. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 34(5), 1-5, 2024. https://doi.org/10.1109/TASC.2024.3358765.
- [20] H. A. Wheeler, Simple inductance formulas for radio coils. Proceedings of the Institute of Radio Engineers, 16(10), 1398-1400, 1928. https://doi.org/10.1 109/JRPROC.1928.221309.
- [21] J. Kim, K. Kim, B. Kim, and J. Kang, Experimental validation of multi-layer coil inductance estimation method. In 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, pp. 1303-1304, San Diego, California, 2017.
- [22] S. Kumar and Y. K. Jain, Simulation of circular-shaped PZT-5H sensor for train measurement using COMSOL multiphysics. IEEE Sensors Journal, 15(8), 4380-4387, 2015. https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2419281
- [23] Z. Xia, A. A. Bhatti, X. Peng, B. Yang, H. Zhou, C. Zhao, and C. Xie, Electric field and temperature distribution of high voltage cables with the addition of particles based on COMSOL simulation. In 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), pp. 1-4, Beijing, China, 2020.
- [24] S. V. Oskin, A. V. Miroshnikov, and D. S. Tsokur, Studying the Aerodynamic Characteristics of Electric

Motors in COMSOL Multiphysics. In 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), pp. 350-354, Sochi, Russia, 2021.

- [25] D. S. Filip and D. Petreus, Simulation of an inductive coupled power transfer system. In IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 6559-6564, Florence, Italy, 2016.
- [26] S. M. Mousavi and A. Ghayebloo, Design and implementation a new coil and introduction a topology for electric vehicle wireless charger. In 2024 28th International Electrical Power Distribution Conference (EPDC), pp. 1-8, Zanjan, Iran, 2024.
- [27] F. Gozalpour and M. Yavari, 2-D axisymmetric modeling of circular PCB coils and solenoids in COMSOL multiphysics. In 2023 5th Iranian International Conference on Microelectronics (IICM), pp. 102-106, Tehran, Iran, 2023.
- [28] K. Slobodnk, Detection and evaluation of subsurface defects using pulse eddy current differential probe. In 2017 18th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), pp. 1-4, Kutna Hora, Czech Republic, 2017.
- [29] R. Singh and V. Singh, Analysis of eddy current damper for suppression of vibrations using COMSOL software. Engineering Solid Mechanics, 3(4), 215-222, 2015. http://dx.doi.org/10.5267/j.esm.2015.7.004.
- [30] M. Elbaa, K. Berger, B. Douine, M. Halit, E. H. Ailam, and S. E. Bentridi, Analytical modeling of an inductor in a magnetic circuit for pulsed field magnetization of HTS bulks. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 28(4), 1-6, 2018. https://doi.org/10.1109/TASC.2018.2809438.
- [31] S. Balaji and P. D. Sundari, COMSOL FEA modeling of square and cirular coil for inductive power transfer in electric vehicle systems. In 2023 Third International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies (ICAECT), pp. 1-4, Bhilai, India, 2023.



NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 443-457



Niğde Ömer Halisdemir Üni**ver**sitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araștırma makalesi / Research article

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



A Blockchain-based smart waste management system framework for used cooking oil collection process

Kullanılmış yemeklik yağ toplama süreci için blokzincir tabanlı akıllı atık yönetim sistemi çerçevesi

Şenay Sadıç^{1,*}, Aslı Bay², Ali Engin Dorum ^{3,}, Anıl Kayan⁴, Aissa Houdjedj⁵

^{1,3} Antalya Bilim University, Industrial Engineering Department, 07190, Antalya, Türkiye ^{2,4,5} Antalya Bilim University, Computer Engineering Department, 07190, Antalya, Türkiye ⁵ Akdeniz University, Computer Engineering Department, 07070, Antalya, Türkiye

Abstract

Used Cooking Oil (UCO) has significant potential for biodiesel production recycling; however, its recycling is limited by the absence of smart waste management systems specifically designed for UCO. This article proposes a blockchain-based smart UCO collection platform aimed at UCO collection with real-time tracking. The platform features system architecture, UCO detection and classification modules, and a fuzzy inference system (FIS)--based decision support module for estimating UCO collection potential and calculating collection thresholds for smart garbage bins (SGBs). The proposed platform integrates various technologies and tools, including blockchain, IoT sensors, smart bins, cryptocurrency micropayments, gamification elements, and machine learning. A case study from Antalya is presented to showcase the FIS-based decision support module and the computation of collection thresholds. To the best of the authors' knowledge, this platform is the most comprehensive smart recycling solution presented in the literature for UCO, enhancing public awareness, increasing interaction, and motivating recycling through financial incentives.

Keywords: Sustainable biodiesel feedstock, IoT-enabled smart waste solutions, Cryptocurrency incentives, Fuzzy inference systems, Used Cooking Oil (UCO) collection, Blockchain, real-time tracking, smart garbage bin (SGB), smart waste management systems.

1 Introduction

Fast-paced consumption culture is depleting the world's natural resources and causing environmental pollution by emiting hazardous waste and byproducts. Among these waste streams, used cooking oil (UCO) is a prominent one produced by households, restaurants, and other food service establishments. Just like petroleum-based oils and animal fats, vegetable oils can also carry toxic properties and have negative impacts on the environment by coating animals and plants causing oxygen depletion, destroying food supplies, and triggering fires [1]. Pouring UCO into the sewage system can pollute drinking water supplies and endanger human

Özet

Kullanılmış Yemeklik Yağ (UCO), biyodizel üretimi için geri dönüşüm açısından önemli bir potansiyele sahiptir; ancak, UCO'ya özel tasarlanmış akıllı atık yönetim sistemlerinin olmaması, geri dönüsümünü sınırlamaktadır. Bu makale, UCO'nun toplanmasına yönelik gerçek zamanlı takip imkânı sağlayan blokzincir tabanlı bir akıllı UCO toplama platformu önermektedir. Platform, sistem mimarisi, UCO tespit ve sınıflandırma modülleri ile akıllı çöp kutuları (SGB'ler) için UCO toplama potansiyelini tahmin eden ve toplama eşiklerini hesaplayan bulanık çıkarım sistemi (FIS) tabanlı karar destek modülünü içermektedir. Önerilen platform, blokzincir, IoT sensörleri, akıllı çöp kutuları, kripto para mikro ödemeleri, oyunlaştırma unsurları ve makine öğrenimi gibi çeşitli teknoloji ve araçları bir araya getirmektedir. Antalya'dan bir vaka calışması, FIS tabanlı karar destek modülü ve toplama eşiği hesaplamalarını göstermek icin sunulmaktadır. Yazarların bilgisine göre, bu platform, literatürde sunulan en kapsamlı akıllı UCO geri dönüşüm çözümü olup, kamu farkındalığını artırmakta, etkileşimi güçlendirmekte ve geri dönüşümü finansal teşviklerle motive etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir biyodizel ham maddesi, IoT destekli akıllı atık çözümleri, Kripto para teşvikleri, bulanık çıkarım sistemleri, Kullanılmış Yemeklik Yağ (UCO) toplama, Blokzincir, gerçek zamanlı takip, akıllı çöp kutusu (SGB).

health. It is estimated that one liter of UCO contaminates 1 million liters of drinking water [2].

Over the past 10 years, there has been a consistent increase in global vegetable oil consumption. It is predicted that global vegetable oil consumption was approximately 160 Mton in 2013, while in 2023, it is projected to exceed 210 Mton [3]. Concurrently, the International Energy Agency predicts that demand for biofuels that can be made from UCO will increase by 41 billion liters, or 28%, between 2021 and 2026 [4]. Although UCO can supply a considerable share of biofuel production feedstock, worldwide UCO collection values have not yet reached the anticipated levels. The projected annual UCO collection volumes in the EU and

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: senay.sadic@antalya.edu.tr (§. Sadıç) Geliş / Received: 19.09.2024 Kabul / Accepted: 14.01.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngumuh.1552937

UK range between 0.7 and 1.2 Mton/yr, while only 18.5% of the biodiesel produced in the EU is derived from UCO [5].

UCO possesses inherent chemical properties that make its recycling a beneficial practice. When properly recycled, UCO can be utilized as a main feedstock for biodiesel production, one of the most common green energies. Biodiesel currently accounts for 90% of the renewable energy utilized in transportation in the EU, making it a prominent clean energy source used in many areas, including aviation [5]. Biodiesel is being utilized in various blends with diesel worldwide, as its substitute with lower greenhouse gas emissions [6].

In addition to biofuel production, UCO can also produce various other goods such as soaps, detergents, lubricants, and other industrial products. UCO can help decrease the dependency on fossil fuels by providing a clean alternative. The recycling of UCO also reduces the environmental impact associated with its disposal.

Nevertheless, there are various challenges associated with the recycling of UCO. One of the primary challenges is the lack of public awareness regarding the proper disposal of oil and the unavailability of a collection service in some areas. The absence of safe storage containers and transportation options can result in oil spills and leaks that may lead to environmental damage. Another major challenge is related to financial incentives, as the benefits of collecting UCO may not be evident to some individuals or companies. Thus, addressing these challenges requires raising public awareness, providing safe storage and transportation options, and creating effective economic incentives to promote the collection and recycling of UCO.

To achieve this goal, today, there are many active initiatives around the world between local communities and the government, leading to nationwide assisted UCO recycling processes. For effective collaboration within this context, new sustainable business models are necessary to bring together stakeholders, along with the development of infrastructures and platforms to standardize and simplify UCO recycling processes.

Several companies and partnerships are implementing UCO collection systems to recycle this valuable resource and promote sustainability. Henkel, a German chemical and consumer goods company, has developed the Fat Box, a container that collects UCO and ensures it is transported safely for recycling [7] Bio Oil Energy in the Netherlands collects UCO and transforms it into biodiesel and other products for different industries [8]. Neste, a Finnish renewable fuels and oil refining company, has acquired the UCO collection and aggregation business of Crimson Renewable Energy in the United States [9]. Italian energy company Eni has partnered with Renoils to boost the collection of used food oil and UCO in Italy, which is then transformed into biodiesel [10]. Austrian hypermarket chain Interspar has implemented a unique UCO collection system in its stores, allowing customers to bring their UCO for recycling [11]. These companies and partnerships' UCO collection and recycling initiatives contribute to the circular economy and promote sustainable energy sources.

Integrating blockchain technology for UCO waste management system is relatively new. According to a recent literature review, only 4 papers have contributed to modeling such platforms and none of the articles tackled UCO recycling processes [12]. To the best of the authors' knowledge, the only existing system for UCO collection with smart capabilities was developed for the Island of Crete, Greece, by the Technical University of Crete in partnership with the Municipality of Rethymno and local stakeholders in 2018. The smart UCO collection system has multiple collection points and bins and integrates sensors, GSM technology, and a web-based platform. The software enables the optimization of collection routes and real-time monitoring of bin-filling levels. While decreasing operational expenses, fuel consumption, and greenhouse gas emissions, this technology improves collection efficiency [13]. Our work differs significantly from the established platform and achieves contributions in the following areas. Firstly, our platform is incentive-based and supports crypto payments. Secondly, our platform incorporates a detection and classification module for UCO. Lastly, our platform is blockchain-based and facilitates the UCO recycling process.

The article proposes a new smart garbage bin (SGB) system that offers various contributions to the waste management process. Firstly, the system is designed with blockchain technology in a novel way to support operations of stakeholders and enable efficient collection of UCO from consumers. Secondly, the system integrates advanced sensor technologies to assess the quality of the collected cooking oil, which allows for more accurate sorting and processing. Moreover, a sophisticated oil quality detection module is suggested to detect UCO and classify it with concerning to its characteristics. Furthermore, a secure and efficient transaction system that utilizes smart contracts is implemented to facilitate payments and incentivize recycling. Lastly, the system offers real-time tracking and monitoring of garbage bin status, ensuring efficient and timely waste collection. Overall, our article presents a promising solution for facilitating the collection and recycling of UCO, while promoting sustainable and ecofriendly waste management practices.

The proposed blockchain-based Smart UCO collection platform makes the following contributions:

- A novel system that incorporates several modules based on machine learning and smart contracts
- Providing an SGB for efficient collection of UCO
- Supporting cryptocurrency micropayments as incentives
- Real-time tracking of SGB status
- Supporting gamification via NFTs, leadership boards, personalization to boost user engagement
- Preventing fraud and enhancing security in UCO collection via a UCO detection module
- Implementing multiple Fuzzy Inference Systems (FIS) to estimate the UCO collection potential and the threshold level

Waste Management Platform	Type of Waste	Blockchain Adoption	Gamificatio n and Social Elements	Incentive	Incentive Approach	Real-Time Monitoring	Multiple Collectors	Optimized Vehicle Routing	Threshold Estimation	Threshold Estimation Approach
<i>Mamun</i> et al., 2016 [15]	Solid Waste					V		√		
Baby et al., 2017 [16]	Solid Waste					√			~	Machine Learning
Al-Jabi and Diab, 2017 [17]	Solid Waste					~	√			
Dua et al., 2020 [18]	E- Waste	√		~	Payment based on Smart Contracts		√			
França et al., 2020 [19]	Solid Waste	\checkmark		~	Payment by coin transfer					
<i>Akter, 2021</i> [20]	Solid Waste	\checkmark		\checkmark	Payment by coin transfer					
Sen Gupta et al., 2022 [14]	Solid Waste	√		~	Payment based on Smart Contracts	√		\checkmark		
Ramos et al., 2013 [21]	UCO							\checkmark		
Winpol, 2019 [13]	UCO					\checkmark				
Proposed Platform	UCO	\checkmark	V	√	Micro Payment based on Smart Contracts, NFTs	V	\checkmark		\checkmark	Fuzzy Inference System

Table 1. Summary of the literature review

2 Theoretical foundation

2.1 Literature review: SGBs and waste management systems

The main application areas in smart waste management systems can be classified into three categories: 1. Waste collection and segregation, 2. Real-time bin monitoring and disposal, 3. Optimized vehicle routing [14]. Researchers have been designing and implementing waste management systems that automate and integrate few or all categories of the application areas. The literature does not include any smart systems or platforms developed to boost the recycling process of UCO [12], therefore we have performed a brief literature review on smart waste management systems and platforms designed by implementing blockchain technology.

One of the earliest examples of smart systems for real time bin monitoring and disposal for solid waste management is developed in [15]. They have introduced a novel model, framework, and intelligent sensing algorithm that operates and enables data transactions via GPRS. The proposed methodology tracks bin status in real-time and provides information to the solid waste collector on which bin to collect and when. [16] also developed a smart waste bin for real-time bin monitoring and disposal that utilizes basic ultrasonic and IR sensors and microcontrollers, which alert the authorities when the bin is full and ready to be collected. The system will predict possible future generation amount via machine learning by using previous collected data.

Another waste management system to boost waste collection and segregation was proposed by [17] that aims to measure citizen engagement with the bin by leveraging IoT devices, RFID tags, weight sensors, and ultrasonic sensors. The process evaluates each citizen's interaction with the waste management system and awards them with marks.

More recent studies involve decentralized approaches to waste management and integrating blockchain into the proposed platforms. For instance, [18] presented a waste management technique to deal with electronic waste (ewaste) by using blockchain in the 5G scenario for waste segregation and collection. A public-private partnership model was developed for effective implementation of the methodology and an incentive-based system to encourage recycling was suggested. Ethereum's blockchain digital architecture is used by [19] for solid waste management in a small municipality in Sao Paulo, Brazil. The proposed system facilitates the economic management of waste collection and segregation by replacing the current paperbased system with crypto coins.

A blockchain-based smart garbage management system for developing countries is presented in [20] which motivates citizens to recycle more waste. The cost-efficient waste collection and segregation methodology runs on an app and includes an incentive mechanism based on cryptocurrency and a proximity sensor is embedded in each garbage bin to open the lid when an individual is detected nearby. [14] suggested an end-to-end smart waste management system based on blockchain using smart contracts. The methodology combines multiple functionalities of waste management systems in one platform. It contributes to the field by offering incentives through tokens for waste segregation, monitoring real-time waste collection, detecting full garbage bins and providing optimum routes to vehicles for waste transfer and disposal.

Research in smart waste management systems for UCO is currently limited. [21] presented a mixed integer linear programming model to optimize the vehicle routes in a waste cooking oil collection system. The only known smart UCO collection system, developed in 2018 for the Island of Crete, Greece, incorporates sensors, GSM technology, and a webbased platform. It optimizes collection routes and provides real-time monitoring of bin filling levels, improving efficiency and reducing expenses and emissions [13].

The related literature is summarized in Table 1 concerning the adoption of several characteristics and technologies. These elements are types of waste targeted, implementation of blockchain, usage of gamification elements, integration of incentives, the types of incentive approach used, compatibility with multiple collectors, enabling optimized vehicle routing, the existence of threshold estimation tools, and the threshold estimation approach used.

While previous research has predominantly focused on solid waste management, our framework targets the underexplored domain of UCO. Unlike existing systems that primarily address solid or e-waste, such as [15-17], our approach is designed specifically for UCO management. The only comparable UCO-related works [13, 21] lack critical features such as secure transactions, gamification, incentives, and threshold estimation tools, which are integral to our proposed system.

Moreover, while systems like [14,18-20] incorporate blockchain for solid waste management, our platform uniquely integrates these elements with micropayments based on smart contracts, gamification elements and NFTs, specifically for UCO collection. It also combines real-time monitoring, multi-collector support, and FIS-based threshold estimation, addressing gaps identified in these works. Similarly, the systems [14, 20] provided optimized vehicle routing but did not address threshold estimation for UCO collection or gamification tailored to incentivize recycling behavior.

The proposed blockchain-based smart UCO collection framework integrates unique features absent in prior research.

By integrating and automating these multiple processes, our proposed platform combines secure transactions, incentives, real-time SGB tracking, and Fuzzy Inference Systems (FIS) to estimate UCO collection potential and support multiple collectors simultaneously. This comprehensive approach addresses gaps in the literature, offering a secure, efficient, and engaging solution for UCO recycling.

2.2 Technical background

This section explores the diverse applications of blockchain technology. Subsection 1 focuses on the core components of blockchain and smart contracts. Subsection 2 discusses the potential of NFTs and gamification in incentivizing social and environmental benefits. Finally, subsection 3 explores the potential of micropayments and the emerging consensus algorithms to facilitate low-cost transactions in various fields.

2.2.1 Blockchain and smart contracts

A blockchain is a decentralized, immutable digital ledger that securely and transparently records transactions and data. The term "blockchain" was first coined by Satoshi Nakamato [22]. Its primary objective was to solve the double-spending problem. This was achieved by utilizing a network of nodes, or miners, to validate transactions and establish ownership records of assets owned by individuals on the network. This secure and traceable system encourages research to find new use cases beyond being only a cash system. Over time, Blockchain technology has been studied on numerous potential uses, such as supply chain management [23], voting systems [24], real estate transactions [25], inexpensive and efficient financial transactions [26, 27], digital identity management [28], healthcare data management [29], smart cities [30], [31], sustainability and social responsibility [32, 33] and many more.

Blockchain technology has gained widespread recognition and adoption due to its key characteristics. These include decentralization, ensuring that no single entity controls the network; immutability, making data tamperevident; transparency and traceability, enabling public auditing and tracking of transactions; security, achieved through cryptographic methods; and consensus, requiring agreement among network nodes to validate new blocks. These features have made blockchain a potential technology across various fields.

The concept of smart contracts was first introduced by computer scientist and cryptographer Nick Szabo in 1997 [34]. However, the technology was limited and it didn't gain attention until the emergence of Bitcoin and especially Ethereum [35].

Smart contracts are self-executing contracts (or computer programs) with the terms of the agreement between sides directly written into lines of code. They are designed to execute when the predefined conditions are met. These contracts run on blockchain technology, which ensures that they are transparent, immutable, and tamper-proof without the need for any intermediaries.

2.2.2 NFT-gamification

NFTs, or non-fungible tokens, are digital assets that represent unique ownership (partially or whole) of items such as art, music, real estate, in-game items, and more. Unlike cryptocurrencies, NFTs cannot be fungible and replicated. For this reason, NFTs are gaining mainstream attention among collectors [36, 37].

Gamification is widely recognized as one of the most effective ways to motivate people by turning a dull system into a game. A gamified system may help the stakeholders to contribute to beneficial causes like increased recycling [38-40]. NFTs work as part of the incentive mechanisms to increase the recycling rate within households. In our proposed system, certain NFTs can provide discounts, act like a pass card or indicate achievements like a milestone for recycled amounts, and the number of visits to SGB.

2.2.3 Micropayments

Existing payment methods for international transfers in traditional financing usually operate with high fees and require time to finalize the transfer. Although it varies from bank to bank, these fees range from \$25 to \$50 [41]. The emergence of Bitcoin has made the transfer of assets secure, inexpensive, traceable, and anonymous way. As of August 23, 2022, the typical fee for a Bitcoin transaction is 0.000044 BTC, which is equivalent to \$0,957. Over the past year, the fee has varied from under \$1 to almost \$5. Nevertheless, during its highest point in April 2021, the average fee for a transaction was over \$60 [42]. Often in many practices, transaction amounts are small, sometimes even higher than the transaction fee [43]. For instance, in Japan, the sale price of UCO is around \$0,38 while there is a demand average price \$1,21 from Singapore [44]. Therefore, these kinds of applications require a low transaction fee environment to function properly, which has driven researchers to develop a new consensus mechanism to reduce costs amid volatility and high fees. Many blockchains using new consensus algorithms, such as Solana, Polygon, and Astar, have been commercially released throughout the years. Even, some of them have practically near to zero fees. These advancements have revealed new use cases for micropayments with blockchain.

3 Research methodology

In our research paper, a structured methodology is employed to guide the design and formulation of our proposal's solution (see Figure 1). The process begins with setting clear research goals and objectives, followed by a comprehensive literature review aimed at identifying gaps in existing smart waste management systems. In particular, the review explores the lack of studied systems for UCO collection and recycling, which ultimately informs the conceptual framework of the study. Building on this foundation, we then examine the technical background by exploring relevant technologies such as blockchain, NFTs, micropayments, gamification, and fuzzy inference systems (FIS). The roles of these technologies are detailed, emphasizing their significance in enhancing the proposed platform. Using these insights, we design a collaborative framework that facilitates communication among stakeholders, including municipalities, waste collectors, SGB organizer, and consumers. This framework integrates smart garbage bins (SGBs) equipped with IoT sensors and a blockchain-enabled incentive system.

The development of the waste management system follows, structured around three key steps: defining the architecture of the SGB system, including user registration and operational processes; designing detection and classification modules for UCO using machine learning algorithms; and implementing a fuzzy inference system within a decision support system to estimate UCO collection potential and determine threshold levels for SGBs.

To demonstrate the practical benefits of our system, we present a case study. This phase begins with the collection of data on population, food service points, distances to recycling facilities, and historical UCO data. This information is then utilized to predict UCO collection and establish threshold levels through the decision support system.

Finally, the methodology concludes with an analysis of the study's results, highlighting key findings, limitations, and suggestions for future work. This systematic approach ensures the design and validation of a robust blockchainbased UCO management platform.



Figure 1. Research methodology

4 Our proposed UCO waste management system

4.1 Proposed framework for UCO collection system

The platform supports collaboration among shareholders by facilitating decentralized communication and provides the base framework for parties to prolong their activities using predetermined smart contracts (see Figure 2). The main shareholders in the developed UCO recycling system can be listed as the municipality, consumers, UCO waste collector companies, and the SGB organizer. The proposed platform contributes to shareholder by different means. Through the platform consumers can receive incentives in return of collected UCO, in terms of cryptocurrency which makes micropayments available, NFTs and other gamification tools. Moreover, consumers can also donate their earnings to charities and support social causes. Discounts or promotions can be made available via the platform as an incentive to their recycling efforts. UCO SGBs will also increase public awareness by its display and availability in neighborhoods.

Traditionally, municipalities play an intermediary role in collecting UCO from the consumers and aim to increase recycling through regulations and social campaigns. In this setting, municipalities only rent out the space for the SGBs and charge a rental fee for the area where SGBs are established.

The platform offers significant benefits to UCO collectors. First and foremost, it aims to boost the UCO recycling by facilitating and simplifying the process. The recycling quality is improved by determining whether collected liquids are UCO or not. Then, UCO is classified based on its composition, and an incentive value is computed with respect to its amount and quality.

UCO waste collector firms act as a bridge between UCO recyclers and consumers, ensuring that collected UCO reaches the biodiesel production plants. Funds flow from biodiesel production plants to UCO collectors and from UCO collectors to consumers in the proposed system. It should be noted that data transfer between biodiesel production facilities and UCO collectors does not occur via this platform, hence biodiesel production plants are not included in the system. In addition, the fullness of SGBs is monitored and collected using real-time data flow and unnecessary trips to the SGBs are minimized.

The SGB organizer is responsible for designing, operating, and updating the platform and receives a percentage of the users' incentive in return. The platform serves a set of stakeholders mentioned above and is upgraded in response to changes in technology, market demands, or received user feedback. The SGB will also provide a team of employees for the installation and maintenance of the SGBs.

4.2 The UCO waste management system

This section explains the UCO Waste Management System, by providing its functionalities and processes and further describes three main components namely: SGB System Architecture, UCO Detection and Classification Modules and Decision Support tool for UCO collection threshold level.

4.2.1 SGB system architecture

Figure 3 visualizes the proposed smart and incentivebased system for UCO collection process. The system provides users with a convenient way to register themselves using a dedicated mobile application. This application operates on a private blockchain infrastructure, and a trusted third-party entity responsible for user registration generates a unique set of public-private keys. The private key is kept confidential and known only to the user, while the public key can be shared with others and stored within the blockchain network.

During the registration process, the user creates a password and a username. These, along with the encrypted password and additional data generated by the application, are linked to the corresponding public key and securely stored within the blockchain ledger. This ensures that all user data stored within the private blockchain is in advance, providing a secure and reliable method for authenticating users to Internet of Things (IoT) devices, without the need for a centralized database. At a conceptual level, the authentication procedure involves the user providing their username and password to initiate the login process. The application then uses one of the secure cryptographic authentication algorithms to verify the user's identity during the login phase.



Figure 2. Proposed framework for UCO collection system

SGB operational processes. Figure 4 depicts the SGB operational process followed in the platform. Upon completion of the authentication, the SGB will grant the user access by opening its lid. Subsequently, the user deposits a bottle of UCO into the bin. Oils are collected in standardized bottles, specifically designed for the SGB for UCO collection purposes. To prevent fraud and user mistakes, the SGB initially runs an oil detection module. The UCO detection module will utilize machine learning methods trained with the physical parameters of UCO samples to accurately identify UCO during the collection phase in an SGB. To overcome the lack of comprehensive datasets, the machine learning model will be trained using data obtained from a local UCO recycling company, including previously measured physical and chemical characteristics of UCO samples. Integrated sensors such as density, viscosity, pH, odor, and level sensors in the SGB enable the measurement of various physical and chemical properties of the newly received UCO sample, which are then used as input for the machine learning model to predict whether the liquid supplied by the consumer is UCO or not. If the module does not detect oil content in the bottle, access will be denied.



Figure 3. Visualization of the proposed smart and incentive-based system for UCO collection process

Once the UCO is approved, the UCO classification module based on machine learning tools and algorithms will evaluate UCO quality. The SGB will measure the amount of UCO deposited by the user. Both the quality and quantity of the UCO are essential in evaluating the user's total contribution. Section 4.2.2 provides a more detailed explanation of the UCO detection and UCO classification modules.

The proposed UCO waste management system offers two types of incentives to reward UCO disposal: cryptocurrency and non-fungible tokens (NFTs). The system utilizes a smart contract to automatically transfer cryptocurrency to the respective user via blockchain's micropayment solutions upon receiving payment from the waste collector.

However, the NFTs are automatically transferred to the user's digital wallet upon meeting certain predefined criteria at the time of UCO disposal. The type of NFT earned by the user can be determined using a set of predefined rules, such as number of times the user contributed to an SGB, or the quality of UCO they have deposited.

The proposed system incorporates a notification mechanism that informs registered UCO waste collectors when an SGB reaches a predefined level of UCO. This functionality is achieved by employing the level sensor to track the UCO level after each deposit. The SGB retrieves the current status of the bin and verifies if it has exceeded the predetermined threshold. Once the threshold is reached, the system promptly sends notifications to the registered waste collectors, indicating the need for emptying the bin. The waste collector registers and signs in to the SGB in the analogous way as a regular user, using their unique collector's name and password. The payment for the waste collected will be transferred from the waste collector's wallet to the wallets of all contributing users, along with the SGB organizer's share. The amount transferred to each user's wallet will depend on the incentive amount agreed upon and written previously in the smart contract. After the waste collector empties the SGB, the status of the bin will be set as "Empty".

The waste management system incorporates various gamification strategies to enhance user engagement and motivation. As discussed in [38], gamification revolves around concepts such as fun, engagement, motivation, purpose, and social collaboration/competition. In line with these principles, the system implements a reward system utilizing NFTs and virtual medals based on users' recycling performance. A smart contract embedded within the system evaluates the overall recycling performance of each user, following the payment process, and mints additional NFTs that are sent to the respective user's wallet. The performance criteria for earning these rewards include the total number of tokens earned, the number of payments received, the reduction in particulate matter exposed to the environment, and the prevention of carbon monoxide emissions [45]. Additionally, fostering a sense of neighborhood and community competition, the system emphasizes the value of recycling and personalization. However, social media announcements of winners and leaderboard statistics will only be provided if users explicitly provide their consent.



Figure 4. SGB operational process

4.2.2 UCO detection and classification modules

Within the SGB framework, two modules with machine learning algorithms will be employed for enhanced functionality: UCO Detection and UCO Classification.

The UCO detection module detects whether the liquid provided by the consumer is UCO based on ML-based methods trained with the physical parameters of UCO samples. The detection of UCO in an SGB is crucial to prevent fraud. Some individuals or businesses may attempt to dispose of non-UCO substances as UCO to take advantage of recycling incentives or regulations. By accurately identifying UCO, the system can detect and prevent such fraudulent attempts, ensuring that the recycling process remains legitimate and reliable. Moreover, improper disposal of non-UCO substances in UCO recycling bins can have adverse environmental impacts. By detecting UCO, the system can ensure that only genuine UCO is collected, preventing the contamination of the recycling process with substances that may harm the environment.

The module aims to identify UCO during collection, but the lack of datasets on UCO's physical properties limits the use of ML techniques. To overcome this, the ML model will use data from a local UCO recycling company, including physical and chemical characteristics of UCO samples. Table 2 provides the ranges for the key properties observed in UCO samples [6].

Table 2. Physical and chemical properties of waste cooking oil collected

Property	Units	Value
Density	g/cm3	0.910 - 0.924
Kinematic viscosity (40 °C)	mm2/s	36.4 - 42.0
Saponification value	mgKOH/g	188.2-207.0
Acid value	mgKOH/g	1.32 - 3.60
Iodine number	gI2/100g	83.0 -141.5

Once the ML-model is built, the module can identify if a fresh sample obtained from a consumer is UCO or not. For this purpose, the SGB incorporates integrated sensors such as density, viscosity, pH, odor, and level sensors, enabling the measurement of various physical and chemical properties of the newly received UCO sample. These sensors facilitate the detection process by capturing the associated characteristics of the sample.

The UCO classification module is designed to categorize UCO samples based on their recycling potential, with a particular focus on the FFA ratio to enhance biodiesel production efficiency. Since UCO typically contains a higher percentage of FFAs than vegetable oil, this concentration plays a critical role in selecting the appropriate catalyst for the transesterification process [46], and managing the limitations it poses for large-scale biodiesel production. By accurately classifying UCO samples, the module ensures that essential transesterification parameters—such as reaction temperature, time, catalyst concentration, and the molar ratio of oil to alcohol—are optimally adjusted for each sample. This approach maximizes biodiesel yield and overall production efficiency. Leveraging ML tools and algorithms, the module will improve the classification accuracy and adaptability of the system, driving further optimization.

4.2.3 Decision support tool for UCO collection threshold level

A decision support tool is also developed to predict UCO collection potential and compute SGB threshold levels. The module first clusters districts by K-means clustering. Then these clustered are used in a FIS based model to predict UCO collection potential of each district. Then the associated threshold levels are estimated by considering the collection process and its assumptions. Figure 5 provides an overview of the decision support tool designed. The following section provides an application of the decision support tool through a pilot study from Antalya, Türkiye.



Figure 5. Proposed framework for UCO collection system

5 A case study: Antalya, Türkiye

To demonstrate the application of the UCO WM system, Antalya, a city in Türkiye, is taken as a case study. Antalya is not only a crowded city with 2.688.004 inhabitants, but also a very touristic zone that receives more than 10 million foreigners per year. Therefore, a practical UCO SGB system will benefit the city tremendously. The proposed system will collect UCO from hotels, food service points, and especially from households.

5.1 The UCO waste management system

Antalya is composed of 17 municipalities spread over a large geographical area with significant distances (see Figure 6). These districts differ from each other in population and number of food service points. A summary of the data on municipalities can be seen in Table 3 (District Kale is also commonly known as Demre).



Figure 6. Antalya districts

District (of Antalya)	Population (2022)	Total Area (km ²)	Road Distance to Depot
Kepez	608 675	403.76	21.9
Muratpaşa	526 293	88.84	30.2
Alanya	364 180	1582	153
Manavgat	252 941	2283	94.9
Konyaaltı	204 795	562.4	24.2
Serik	139 545	1550	57.8
Döşemealtı	79 495	673.1	0
Aksu	77 623	440	34.7
Kumluca	73 496	1253	108
Kaş	62 866	2231	194
Korkuteli	56 285	2471	48.7
Gazipaşa	53 702	921	198
Finike	49 720	653	125
Kemer	49 383	471	57.5
Elmalı	40 774	1647	97.6
Demre	27 691	471.4	153
Akseki	10 477	2390	151
Gündoğmuş	7 188	1323	160
İbradı	2 875	1267	128

Table 3. Data on Antalya districts

5.2 UCO collection estimation

The annual UCO collection potential for Türkiye is estimated to be around 976,000 tons (EMRA, 2016), however, private conversation with an industry professional revealed that the current amount of UCO collected is around 35,000 tons per year. Therefore, the data on UCO collection potential for each municipality is unavailable.

To estimate the potential for UCO collection in each district of Antalya, we used a fuzzy inference system (FIS). The FIS relies on two main factors: population size and the number of food and beverage points in each district. These inputs help predict the amount of UCO that could be collected from each area. Additionally, we developed five different scenarios with varying probabilities to improve the accuracy of our predictions, allowing for more reliable estimates under different conditions.

An FIS is an expert system that is composed of input and output parameters, fuzzy rules, fuzzy sets and defuzzification schemes. Based on fuzzy sets and a fuzzy rule system, the fuzzy output function f1(p1, p2) is computed, and transformed into a crisp value. A Mamdani FIS is a straightforward way to include logical reasoning to inputs that are hard to relate with outputs. The FIS approach is particularly suitable for this application due to its ability to handle the inherent uncertainty and imprecision in such realworld data. The model is implemented on MATLAB, Fuzzy Logic Toolbox.

The probability of occurrence for each scenario is represented by P(x):

- No increase in UCO collection, P(1) = 0.10
- 50% increase in UCO collection, P(2) = 0.20
- 80% increase in UCO collection, P(3) = 0.30
- 200% increase in UCO collection, P(4) = 0.20
- 300% increase in UCO collection, P(5) = 0.20

While the input values for each scenario are the same, the output functions are created coherent with the UCO collection values. Note that the scenarios and the associated probabilities were decided after consulting with experts, industry professionals, and decision-makers.

Data on population and food service points are not uniform and have outliers. For this reason, we employ Kmeans clustering before using FIS. K-means clustering is an algorithm which iteratively assigns data points to the nearest cluster centroid and then recalculates the centroids based on the mean of the assigned points. It aims to minimize the variance within each cluster.

In this study, the data is clustered in both dimensions (population and food service points). The districts are divided into four clusters named Small Municipality (SM), Small Medium Municipality (SMM), Medium Municipality (MM), Large Municipality (LM) based on their populations. Also, four clusters are defined as: Small Municipality (SM), Small Medium Municipality (SMM), Medium Municipality (MM), Large Municipality (LM) based on the number of food service points. Separate triangular functions were

Table 4. Generated clusters of districts

created for each cluster. Table 4 presents the parameters used for the triangular functions of the FISs based on the clusters.

Figure 7 presents the FIS, build for scenario 1 and the associated fuzzy rules. The two input parameters "Population" and "Food and Beverage points" are transformed into triangular fuzzy membership functions based on the clusters mentioned above and combined into a UCO Collection Potential" output. In order to make this transformation, we have developed 16 fuzzy rules as given in Figure 7. The triangular fuzzy membership functions for each input parameter, as presented in Appendix 1 are defined based on the statistics computed from the clusters. The parameters for the outputs are defined by intuition and scenario estimations. The outputs of each scenario and the total estimation for UCO collection as calculated by multiplying the output with scenario probabilities is presented in Appendix 2.

Population Clusters	District	Population	F&B Clusters	District	Food and Beverage Points
	Kepez	608675		Gündoğmuş	0
$\mathbf{L}\mathbf{M}$	Muratpaşa	526293		İbradı	2
	Alanya	364180	SM	Akseki	3
	Manavgat	252941	5141	Döşemealtı	8
MM	Konyaaltı	204795		Aksu	8
	Serik	139545		Elmalı	13
	Döşemealtı	79495		Kumluca	26
	Aksu	77623	SMM	Gazipaşa	27
	Kumluca	73496		Korkuteli	28
	Kaş	62866		Finike	35
SMM	Korkuteli	56285		Konyaaltı	39
	Gazipaşa	53702		Demre	41
	Finike	49720		Muratpaşa	123
	Kemer	49383		Serik	128
	Elmalı	40774	MM	Kemer	178
	Demre	27691		Kepez	185
CD.C	Akseki	10477		Kaş	258
511	Gündoğmuş	7188	IM	Manavgat	414
	İbradı	2875	LM	Alanya	784



Figure 7. The FIS rules for scenario 1

5.3 Threshold level estimation

All UCO will be transported to the waste collector facility in Döşemealtı district, which is in the central zone. To simplify UCO collection and routing, the municipalities are grouped into three main clusters with respect to their locations: West region (Kaş, Demre, Elmalı, Finike, Kumluca, Kemer, Korkuteli), East region (Alanya, Aksu, Manavgat, Serik, İbradı, Akseki, Gündoğmuş, Gazipaşa), City center (Muratpaşa, Konyaaltı, Kepez, Döşemealtı). Each cluster is assigned vehicles to transport UCO from SGBs to the facility. The travel times between the waste collector facility and each SGB vary from minutes to 3hrs on average.

Even though real-time tracking and monitoring of the SGB is made available by the system, waste collection habits and travel times are probabilistic. Therefore, another rule is set on the collection time: the SGB must notify the waste collector 3 hours before the SGB gets full. This rule will give enough time for collection.

 Table 5 shows the calculated threshold levels for each
 SGB in different districts. Depending on the estimated daily

UCO collection, either a medium SGB with a capacity of 0.5 tons or a large SGB with a capacity of 1 ton is installed. The fill rates and threshold levels are determined based on the amount of UCO collected over a 3-hour period. We assume a constant hourly collection rate throughout the day, and the UCO collected in 3 hours is subtracted from the SGB capacity to calculate the threshold level. This threshold allows vehicles to collect UCO before the SGB reaches full capacity, providing more flexibility in scheduling collections.

We calculated the SGB threshold levels for different districts based on the assumption that each SGB should notify the collector 3 hours before its expected fill time. In Alanya, the collection rate per hour is 0.045, with a fill rate during transport of 0.14, resulting in a threshold level of 0.86. In contrast, Finike has a lower collection rate per hour of 0.009, a fill rate during transport of 0.05, and a higher threshold level of 0.95. These differences highlight the variability in SGB fill rates across districts, influencing the timing of notifications for collection.

District (of Antalya)	SGB Capacity (ton)	UCO Collection day	UCO collection/hour	UCO Collection during transport	Fill Rate during transport %	Threshold Level Required %
Kepez	1.0	0.797	0.033	0.100	10	90
Muratpaşa	1.0	0.704	0.029	0.088	9	91
Alanya	1.0	1.090	0.045	0.136	14	86
Manavgat	1.0	1.090	0.045	0.136	14	86
Konyaaltı	0.5	0.435	0.018	0.054	11	89
Serik	1.0	0.726	0.030	0.091	9	91
Döşemealtı	0.5	0.132	0.005	0.016	3	97
Aksu	0.5	0.132	0.005	0.016	3	97
Kumluca	0.5	0.270	0.011	0.034	7	93
Kaş	1.0	0.516	0.022	0.065	6	94
Korkuteli	0.5	0.132	0.005	0.016	3	97
Gazipaşa	0.5	0.132	0.005	0.016	3	97
Finike	0.5	0.213	0.009	0.027	5	95
Kemer	0.5	0.435	0.018	0.054	11	89
Elmalı	0.5	0.132	0.005	0.016	3	97
Demre	0.5	0.279	0.012	0.035	7	93
Akseki	0.5	0.031	0.001	0.004	1	99
Gündoğmuş	0.5	0.031	0.001	0.004	1	99
İbradı	0.5	0.031	0.001	0.004	1	99

6 Conclusions, limitations and future work

In conclusion, the increasing demand for sustainable energy sources makes UCO a vital resource for producing biofuels, which significantly contribute to reducing environmental impact and reliance on fossil fuels. Our study introduces an innovative blockchain-based smart UCO collection platform, designed to improve UCO recycling rates by leveraging advanced technologies such as machine learning, cryptocurrency micropayments, and real-time tracking. The platform incorporates gamification through NFTs and leaderboards, while also preventing fraud and enhancing security with a UCO detection module. A decision support system utilizing K-means clustering and FIS has been implemented to predict UCO collection potential and establish threshold levels for SGB units, as demonstrated in a case study conducted in Antalya.

However, several limitations have been identified in the study. The UCO data available for analysis was not specific to individual districts, and even the total amount for Turkey is uncertain. Furthermore, no comprehensive dataset on UCO specifications and characteristics existed to be used for UCO classification and detection. Consequently, the UCO collection potential was estimated based on limited and vague data, leading to a hypothetical scenario for predicting UCO collection outcomes.

Future work will focus on implementing machine learning algorithms for UCO detection and classification, using data from various UCO collectors to develop a highly accurate model. The full software implementation of the platform including the mobile application is crucial for realizing its potential benefits. Additionally, a key aspect of future development will also involve designing the hardware for the SGB units, ensuring that they are cost-effective, durable, and efficient in real-world conditions. Finally, the proposed platform can be extended to other regions in Turkey with different dynamics and could potentially be scaled into a national program through targeted advertising campaigns.

Conflict of interest

The authors declare that they have no conflicts of interest related to this work.

Similarity rate (iThenticate): 18%

References

- [1] US Environmental Protection Agency, Vegetable Oils and Animal Fats. https://archive.epa.gov/emergencies/ content/learning/web/html/vegoil.html#:~:text=Likep etroleumoils%2Cvegetableoils,supplies%2Cbreeding animals%2C and habitats.
- [2] S. Almasi, B. Ghobadian, G. Najafi, and M. D. Soufi, A review on bio-lubricant production from non-edible oil-bearing biomass resources in Iran: Recent progress and perspectives. J. Clean. Prod., 290, 125830, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.125830.
- [3] Vegetable oils: global consumption 2022/23 | Statista, Consumption of vegetable oils worldwide from

2013/14 to 2022/2023, by oil type, 2023. https://www .statista.com/statistics/263937/vegetable-oils-globalconsumption/ Accessed Apr. 14, 2023.

- [4] IEA, Renewables 2021, 2021. [Online]. Available: https://www.iea.org/reports/renewables-2021.
- [5] CE Delft, Used Cooking Oil (UCO) as biofuel feedstock in the EU, 2020. [Online]. Available: https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2021/04/ CE_Delft_200247_UCO_as_biofuel_feedstock_in_E U_FINAL-v5.pdf.
- [6] M. A. Raqeeb and R. Bhargavi, Biodiesel production from waste cooking oil. J. Chem. Pharm. Res., 7, 670– 681, 2015.
- Henkel, Fat Boxx. https://www.p-henkel.de/en/produ cts/fat-boxx.html?gclid=CjwKCAjw3ueiBhBmEiwA 4BhspAvuZhPPetM8T9yC1Z3B21imDRt4kKsOGVjb plsHHVJgIJxoqqL37xoCtkQQAvD_BwE (accessed May 16, 2023).
- [8] Bio Oil. https://bio-oil.biz/#handel-en Accessed May 16, 2023.
- [9] Neste, Neste to acquire used cooking oil collection and aggregation business from Crimson Renewable Energy in the United States to strengthen Neste's renewable raw materials sourcing platform | Neste, 2022. https://www.neste.com/releases-and-news/circular-ec onomy/neste-acquire-used-cooking-oil-collection-and -aggregation-business-crimson-renewable-energy-unit ed Accessed May 16, 2023.
- [10] ENI, Deal between Eni and RenOils to boost collection of used food oil and oil used for frying, 2019. https://www.eni.com/en-IT/media/press-release/2019/ 02/deal-between-eni-and-renoils-to-boost-collection-o f-used-food-oil-and-oil-used-for-frying.html.
- [11] SPAR International, Unique oil collection system at INTERSPAR Hypermarkets in Austria, 2019. https://spar-international.com/news/unique-oil-collect ion-system-at-interspar-hypermarkets-in-austria/ Accessed May 16, 2023.
- [12] S. Xie, Y. Gong, M. Kunc, Z. Wen, and S. Brown, The application of blockchain technology in the recycling chain: a state-of-the-art literature review and conceptual framework. Int. J. Prod. Res., 61, 8692-8718, 2022, doi: 10.1080/00207543.2022.2152506.
- [13] Winpol, InterregEurope, New smart collection system to optimise the Used Cooking Oil to biodiesel value chain | Interreg Europe - Sharing solutions for better policy, 2019. https://www.interregeurope.eu/good-pra ctices/new-smart-collection-system-to-optimise-the-u sed-cooking-oil-to-biodiesel-value-chain Accessed May 16, 2023.
- [14] Y. Sen Gupta, S. Mukherjee, R. Dutta, and S. Bhattacharya, A blockchain-based approach using smart contracts to develop a smart waste management system. Int. J. Environ. Sci. Technol., 19, 7833–7856, 2022, doi: 10.1007/s13762-021-03507-8.
- [15] M. A. Al Mamun, M. A. Hannan, A. Hussain, and H. Basri, Theoretical model and implementation of a real time intelligent bin status monitoring system using rule

based decision algorithms. Expert Syst. Appl., 48, 76–88, 2016, doi: 10.1016/j.eswa.2015.11.025.

- [16] C. J. Baby, H. Singh, A. Srivastava, R. Dhawan, and P. Mahalakshmi, Smart bin: An intelligent waste alert and prediction system using machine learning approach. 2017 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), pp. 771–774, 2017, doi: 10.1109/WiSP NET.2017.8299865.
- [17] M. Al-Jabi and M. Diab, IoT-enabled citizen attractive waste management system. 2017 2nd International Conference on the Applications of Information Technology in Developing Renewable Energy Processes & Systems (IT-DREPS), pp. 1–5, 2017, doi: 10.1109/IT-DREPS.2017.8277804.
- [18] A. Dua, A. Dutta, N. Zaman, and N. Kumar, Blockchain-based E-waste Management in 5G Smart Communities. IEEE INFOCOM 2020 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), pp. 195–200, 2020, doi: 10.1109/INFOCOMWKSHPS50562.2020.9162845.
- [19] A. S. L. França, J. Amato Neto, R. F. Gonçalves, and C. M. V. B. Almeida, Proposing the use of blockchain to improve the solid waste management in small municipalities. J. Clean. Prod., 244, 118529, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118529.
- [20] O. Akter, Blockchain leveraged incentive providing waste management system. 1, 429–437, 2021, 10.1007/978-981-15-9927-9_42.
- [21] T. R. P. Ramos, M. I. Gomes, and A. P. Barbosa-Póvoa, Planning waste cooking oil collection systems. Waste Manag., 33, 1691–1703, 2013, doi: 10.1016/j.wasman. 2013.04.005.
- [22] S. Nakamoto, Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. Decentralized Bus. Rev., 21260, 2008.
- [23] R. Casado-Vara, J. Prieto, F. De la Prieta, and J. M. Corchado, How blockchain improves the supply chain: case study alimentary supply chain. Procedia Comput. Sci., 134, 393–398, 2018, doi: 10.1016/j.procs.2018.07 .193.
- [24] J. Huang, D. He, M. S. Obaidat, P. Vijayakumar, M. Luo, and K.-K. R. Choo, The application of the blockchain technology in voting systems. ACM Comput. Surv., 54, 1–28, 2022, doi: 10.1145/3439725.
- [25] F. Ullah and F. Al-Turjman, A conceptual framework for blockchain smart contract adoption to manage real estate deals in smart cities. Neural Comput. Appl., 35, 5033–5054, 2023, doi: 10.1007/s00521-021-05800-6.
- [26] R. Adams, G. Parry, P. Godsiff, and P. Ward, The future of money and further applications of the blockchain. Strateg. Chang., 26, 417–422, 2017, doi: 10.1002/jsc.2141.
- [27] N. Radziwill, Blockchain revolution: How the technology behind bitcoin is changing money, Business, and the World. Qual. Manag. J., 25, 64–65, 2018, doi: 10.1080/10686967.2018.1404373.
- [28] P. Dunphy and F. A. P. Petitcolas, A first look at identity management schemes on the blockchain. IEEE Secur. Priv., 16, 20–29, 2018, doi: 10.1109/MSP.2018

.3111247.

- [29] C. Agbo, Q. Mahmoud, and J. Eklund, Blockchain technology in healthcare: A systematic review. Healthcare, 7, 56, 2019, doi: 10.3390/healthcare70200 56.
- [30] J. Xie et al., A survey of blockchain technology applied to smart cities: Research issues and challenges. IEEE Commun. Surv. Tutorials, 21, 2794–2830, 2019, doi: 10.1109/COMST.2019.2899617.
- [31] K. Biswas and V. Muthukkumarasamy, Securing Smart Cities Using Blockchain Technology. 2016 IEEE 18th International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 14th International Conference on Smart City; IEEE 2nd International Conference on Data Science and Systems (HPCC/SmartCity/DSS), pp. 1392–1393, 2016, doi: 10.1109/HPCC-SmartCity-DSS.2016.0198.
- [32] A. Upadhyay, S. Mukhuty, V. Kumar, and Y. Kazancoglu, Blockchain technology and the circular economy: Implications for sustainability and social responsibility. J. Clean. Prod., 293, 126130, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126130.
- [33] A. R. C. Bedin, W. Queiroz, M. Capretz, and S. Mir, A Blockchain Approach to Social Responsibility. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST, pp. 15–29, 2020.
- [34] N. Szabo, Formalizing and securing relationships on public networks. First Monday, 1997.
- [35] ethereum.org. https://ethereum.org/en/what-is-ethereu m/.
- [36] Q. Wang, R. Li, Q. Wang, and S. Chen, Non-Fungible Token (NFT): Overview, Evaluation, Opportunities and Challenges, May 2021. [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2105.07447.
- [37] L. Ante, The non-fungible token (NFT) market and its relationship with Bitcoin and Ethereum. SSRN Electron. J., 216–224, 2021, doi: 10.2139/ssrn.386110
 6.
- [38] M. Helmefalk and J. Rosenlund, Make Waste Fun Again! A Gamification Approach to Recycling. 2020.
- [39] I. Papamichael, G. Pappas, J. E. Siegel, and A. A. Zorpas, Unified waste metrics: A gamified tool in nextgeneration strategic planning. Sci. Total Environ., 833, 154835, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154835.
- [40] M. Magista, B. L. Dorra, and T. Y. Pean, A Review of the Applicability of Gamification and Game-based Learning to Improve Household-level Waste Management Practices among Schoolchildren. Int. J. Technol., 9, 2018, doi: 10.14716/ijtech.v9i7.264 4.
- [41] L. Knueven and S. C. Acevedo, Businessinsider, How much are wire transfer fees? https://www.businessinsi der.com/personal-finance/wire-transfer-fees.
- [42] T. DeJesus, Nasdaq, Bitcoin Transaction Fees: A Full Guide and How To Save, 2022. https://www.nasdaq. com/articles/bitcoin-transaction-fees%3A-a-fullguide-and-how-to-save.
- [43] F. Rezaeibagha and Y. Mu, Efficient Micropayment of Cryptocurrency from Blockchains. Comput. J., 62,

507-517, 2019, doi: 10.1093/comjnl/bxy105.

- [44] S. Matsuura, Asahi, Waste cooking oil prices soar on demand from airline industry, 2022. https://www.asa hi.com/ajw/articles/14704414.
- [45] T. D. Tsoutsos, S. Tournaki, O. Paraíba, and S. D. Kaminaris, The Used Cooking Oil-to-biodiesel chain in Europe assessment of best practices and environmental

performance. Renew. Sustain. Energy Rev., 54, 74–83, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.09.039.

[46] M. U. H. Suzihaque, H. Alwi, U. Kalthum Ibrahim, S. Abdullah, and N. Haron, Biodiesel production from waste cooking oil: A brief review. Mater. Today Proc., 63, S490–S495, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.5 27.



Appendix-1

	<u>Appendix 1: Triangular Fuzzy membership functions</u> <u>Population triangular function parameters</u>				F&B Triangular function parameters			
Population	SM	SMM	ММ	LM	SM2	SMM3	MM4	LM5
Mean	12058	60372	199094	499716	6	33	174	599
Standard Dev	9420	13001	46469	101568	4	6	49	185
Upper Limit	40317	99375	338500	804421	19	51	321	1154
Lower Limit	-16202	21368	59687	195011	-8	15	28	44

Appendix-2

istrict	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Total UCO Collection (ton/daily)
Probabilities(x)	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2	
Kepez	0.411	0.616	0.74	0.822	1.233	0.797
Muratpaşa	0.363	0.544	0.653	0.726	1.089	0.704
Alanya	0.562	0.843	1.012	1.124	1.686	1.09
Manavgat	0.562	0.843	1.012	1.124	1.686	1.09
Konyaaltı	0.224	0.336	0.403	0.448	0.672	0.435
Serik	0.374	0.561	0.673	0.748	1.122	0.726
Döşemealtı	0.068	0.102	0.122	0.136	0.204	0.132
Aksu	0.068	0.102	0.122	0.136	0.204	0.132
Kumluca	0.139	0.209	0.25	0.278	0.417	0.27
Kaş	0.266	0.399	0.479	0.532	0.798	0.516
Korkuteli	0.068	0.102	0.122	0.136	0.204	0.132
Gazipaşa	0.068	0.102	0.122	0.136	0.204	0.132
Finike	0.11	0.165	0.198	0.22	0.33	0.213
Kemer	0.224	0.336	0.403	0.448	0.672	0.435
Elmalı	0.068	0.102	0.122	0.136	0.204	0.132
Demre	0.144	0.216	0.259	0.288	0.432	0.279
Akseki	0.016	0.024	0.029	0.032	0.048	0.031
Gündoğmuş	0.016	0.024	0.029	0.032	0.049	0.031
İbradı	0.016	0.024	0.029	0.032	0.048	0.031



NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 458-472



Niğde Ömer Halisdemir Üni**ver**sitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araștırma makalesi / Research article

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



Experimental investigation of the parameters affecting the surface roughness of materials with different thicknesses by abrasive water jetting: Polymer, composite and elastomer materials

Aşındırıcı su jeti ile farklı kalınlıklardaki malzemelerin yüzey pürüzlülüğüne etki eden parametrelerin deneysel incelenmesi: Polimer, kompozit ve elastomer malzemeler

Celalettin Baykara^{1,*} 🝺

¹ Sakarya University of Applied Sciences, Technology Faculty, Department of Mechanical Engineering, 54187, Sakarya, Türkiye

Abstract

The surface quality of various industrial products is important for end users. For this reason, it plays an important role to obtain the desired quality of the product surface in optimum time without additional operation by applying various parameters during the production phase. In this study, it was aimed to investigate the surface quality of cast polyamide 6 (PA6 G), composite (CFRP) and ethylene propylene diene manomer rubber (EPDM) materials of different thicknesses after cutting at different feed rates in abrasive water jet (AWJ). In the experiments where a total of 99 cutting operations were carried out, the effect of material type, cutting speed and material thickness on surface quality was analysed. The test specimens were cut at low, medium and high speeds determined according to the physical properties of three different polymer, composite and elastomer based materials and the surface wear roughness was measured at three different points along the depth of cut. The results obtained were then compared with the optimum cutting speeds for different materials and thicknesses. As a result, it has been shown that the cutting speed has a significant effect on the surface quality of the surface wear and the presence of machining marks on different thicknesses and different material surfaces.

Keywords: Abrasive water jet, Polymer, Carbonfibre, Elastomer, Surface wear (roughness)

1 Introduction

In response to the rapidly developing material technology, it is imperative to transform these materials into higher quality products in production systems, to process products with complex geometries with precise dimensional tolerances and to develop production technology with proactive research and development operations and new production methods to be taken against the strong competitive environment taken place by many actors in the dünya çapında market. In general terms, wear is a tribological metaphor that weakens the mechanical properties of the material by removing chips from the

Öz

Çeşitli endüstriyel ürünlerin yüzey kalitesi son kullanıcılar yönünden önem taşımaktadır. Bu nedenle, üretim aşamasında çeşitli parametreler uygulanarak ürün yüzeyinin ilave operasyon uygulamadan uygun değer zaman içinde istenen kalitede elde edilmesi önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada, farklı kalınlıklarda dökme polimada 6 (PA6 G), kompozede (CFRP) ve etilen profilden dine manom er kauçuk(EPDM) malzemelerin aşındırıcı su jetinde (ASJ) farklı ilerleme hızlarında kesilmesi sonrasında malzeme kalınlığına bağlı yüzey kalitesi incelenmesi amaçlanmıştır. Toplam 99 adet kesim işleminin gerçekleştirildiği deneylerde malzeme türünün, kesme hızının ve malzeme kalınlıklarının yüzey kalitesine etkisi incelenmiştir. Polimer, kompozit ve elastomer tabanlı üç farklı malzemenin fiziksel özelliklerine göre belirlenen düsük, orta ve vüksek devirli hızlarda kesilen denev numuneleri, kesme derinliği boyunca farklı üç noktadan yüzey aşınma pürüzlüğü ölçülmüştür. Daha sonra elde dilen sonuçlar malzeme bazında ve kalınlıklarda en uygun kesme hızları karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, kesme hızının yüzey aşınmasının yüzey kalitesi ve farklı kalınlıklarda ve farklı malzeme yüzeylerinde işleme izlerinin varlığı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Aşındırıcı su jeti, Polimer, Karbonfiber, Elsatomer, Yüzey aşınması (pürüzlülüğü)

material [1]. However, the concept of abrasion can be used in industrial applications with different applications, such as surface roughening with chemical processes such as cataphoresis for industrial applications and in strengthenhancing preliminary preparations in bonding processes as positively [2-5]. Abrasive water jet (AWJ) abrasion of the workpiece, which is one of the non-traditional production methods, is one of the most intensively researched material cutting methods, although it is a different method. It is widely used in different industries today for cutting a wide diversity of materials such In response to the rapidly developing material technology, it is imperative to transform

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: cbaykara@subu.edu.tr (C. Baykara) Geliş / Received: 01.12.2024 Kabul / Accepted: 18.01.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngmuh.1594355

these materials into higher quality products in production systems, to process products with complex geometries with precise dimensional tolerances and to develop production technology with proactive research and development operations and new production methods to be taken against the strong competitive environment taken place by many actors in the global market. In general terms, wear is a tribological metaphor that weakens the mechanical properties of the material by removing chips from the material. However, the concept of abrasion can be used in industrial applications with different applications, such as surface roughening with chemical processes such as cataphoresis for industrial applications and in strengthenhancing preliminary preparations in bonding processes as positively. Abrasive water jet (AWJ) abrasion of the workpiece, which is one of the non-traditional production methods, is one of the most intensively researched material cutting methods, although it is a different method. It is widely used in different industries today for cutting a wide diversity of materials such as rubber, metal, fibreglass, wood, marble and plastics [6]. Basically, AWJ is the process in which the mass of the abrasive particles is given kinetic energy by the high water pressure of the abrasive particles and the momentum effect generated by a certain acceleration, through the nozzle, the abrasive particles hit the the workpiece surface to be processed with repeated impacts in jet form and the kinetic energy is converted into pressure energy. The interaction of water, abrasive and workpiece in the water jet process, under the constant impact of the water jet, part of the abrasive particules were sprayed onto the workpiece surface in jet form, and the launch θ angle of the jet diminished with the increase of the impact pit, and gradually water and abrasives accumulated at the bottom of the impact pit (Figure 1 a-d) [7]. The abrasive particules and accumulated water occured a cushioning effect for the subsequent jet, which absorbed part of the kinetic energy of the jet, leading to an increase in energy loss and hindering the subsequent material fracturing process [8]. Since the stress generated by the abrasive grain under the compressive force is higher than the yield stress of the workpiece, it starts to form cracks in the workpiece, which then propagate and wear the workpiece, causing material erosion (Figure 2) [7, 9-11]. AWJ has no geometrical and morphological distortion of the workpiece due to the absence of thermal deformation with low cutting forces [12-14]. Moreover, it exhibits strong cutting capabilities and can cut materials of any hardness with good cutting quality. Therefore, it is an ideal method for cutting glass and other brittle materials. It is easy to operate and suitable for machining complex structures with high machining efficiency. The end product properties produced by AWJ can be tested by analysing various parameters of performance such as depth of penetration, Kerf Taper Ratio (KTR), Material Removal Rate (MRR), surface roughness etc.[15]. Wear or roughness of surface occured by the impact of abrasive particles on the workpiece surface is one of the basic criterion to asses the quality of the cut surfaces obtained by AWJ cutting [16, 17]. Surface roughness is affected by parameters such as type and thickness of the

workpiece, abrasive flow rate, abrasive type, hardness, toughness and size [18, 19].

In this research, it is aspired to investigate the speed of cutting effect on the surface wearing depending on the thickness in AWJ operation of polymer materials. Therefore, it is critically important the relationship between surface wearing belong to product and the processing parameters.



Figure 1. Machining of workpiece in abrasive water jet with respect to time [7]



Figure 2. Chip formation on the workpiece [7]

In the manufacturing sector, manufacturing processes such as surface modification, hole drilling and cutting have been successfully applied with manufacturing methods that are unconventional from traditional methods in material cutting methods [20, 21]. Among these manufacturing methods, AWJ and Laser Beam (LB) methods have become popular in various fields of industry. The surface quality of workpieces in AWJ and laser methods is determined by various factors. In AWJ method, there is no thermal effect on the material. Water and abrasive particles erode and cut the material by erosion, whereas in the LB method, the material is exposed to a thermal load that melts and vaporises the material with high spot and high power laser beam output. Therefore, the AWJ method preserves the integrity of the material as there is no thermal degradation and no molten material residues in the cutting zone, high machining versatility and flexibility, minimum stresses, and is a more environmentally friendly production method as it does not contain a shielding gas as in the laser method. The LB
method has high repeatability, narrower kerf width and minimum material distortion rate. Surface topographies of various materials after cutting with different methods have been the focus of researchers. Krajcarz [22] tried to determine the most effective method by examining the surface roughness of metal cutting depending on the thickness of the workpiece using the parameters of abrasive mass velocity, travelling speed and depth of cut in different cutting methods: AWJ, laser beam and plasma. As a result, it was found that the AWJ method is the most suitable method in terms of surface roughness, although it is slower and more costly than other methods. Kartal et al. [23] investigated the surface roughness of 7068 alloy aluminium materials and Fico et al. [24] investigated the surface roughness of X5CrNi18-10 (1.4301) stainless steel materials after cutting at different three thicknesses at different parameters of traverse speed, depth of cut and mass flow rate in AWJ method. Theye used a feed-forward artificial neural network (ANN) to predict the surface roughness in the experimental results. By modifying the ANN input data. As a result, they showed that the AWJ method can be a tool to optimise surface roughness measurement. Zelenak et al. [25] investigated the surface topography after cutting hard materials such as titanium by AWJ and laser beam method. When the experimental results were compared, they concluded that a cleaner surface would be obtained if the AWJ method was used. Alsoufi et al. [26] investigated the effect of AWJ and laser beam method on surface roughness and microhardness of carbon steels after cutting. They found that AWJ gave better results in terms of surface roughness, while the surface hardness was almost the same. Perzel et al. [27] analysed the comparison of surface finish quality and costs of AWJ, laser beam, plasma and oxy-fuel cutting methods. They concluded that the AWJ method is slower but achieves better surface topography, and they stated that the oxy-fuel method is the cost. Dogankaya et al. [28] enhanced the effect of AWJ parameters by using particle swarm optimisation method to determine the trade-offs between surface roughness and dimensional error measurements in UHMPWPE materials. As a result, three different industrial scenarios were developed. Kahya et al. [29] investigated the surface roughness in AWJ machining of AFRP composite materials using analysis of variance and response surface methods and verified their results with ANOVA. As an alternative to AWJ method for cutting PLA materials, Kartal et al. [30] investigated to determine the most suitable cutting tool for cutting PLA materials prepared in 3D printer. As a result, they found that different diameter milling cutters were affected by the cutting process.



Figure 3. The properties of SiO₂ abrasive particule [31]. (Image is supplied GMA Garnet Group and reproduced with permission for this document only)

The cutting process of a material in the AWJM method is based on the principle of chip removal from the material after the abrasive particle hits the material surface. Abrasive particle properties such as hardness, toughness, density and angularity play an important role in the quality of the cutting surface (Figure 3) [31].

Type of abrasive particle: Depending on the production cost, material structure and thickness to be cut, various types of abrasive particles such as silicon dioxide (SiO₂), aluminium oxide (Al₂O₃), silicon carbide (SiC), boron carbide (B₄C), glass beads are used. Hardness of the abrasive particle: It must be higher than the hardness of the material to be machined. In industrial applications, SiO₂ and Al₂O₃ types, which are harder abrasive particles, are commonly used.

The density of the abrasive particle: An abrasive particle with a high density makes an effective impact on the surface of the material thanks to the momentum gained by the high pressure water reaching a high speed in the orifice inside the nozzle.

Toughness of the abrasive particle: When the abrasive particle hits the workpiece at high speed, it is desired that it does not disintegrate. When it disintegrates, the cutting effect is weakened.

Geometry of the abrasive particle: In order to take chips from the workpiece, the abrasive particle must have sharp corners.

Mesh size and AWJ components of the abrasive particle: Abrasive particles, whose sizes are classified as Mesh, should be selected from AWJ components in accordance with the diameter of the orifice and focusing tube. These parameters play an important role in cutting quality (Table 1).

Table 1. Surface of	quality	parameters
---------------------	---------	------------

Mesh no	Focusing tube diameter (mm)	Orifice diameter (mm)	Cutting quality
50, 80, 120	0.508-1.520	0.178-0.457	Excellent
60	1.070-1.270	0.305-0.356	Pro
80-120	0.508-1.070	0.178-0.356	Classic

The basic parameters of the AWJ method and the material properties used affect the surface roughness after cutting (Figure 4).

EPDM rubber material; Due to their low modulus of elasticity and viscoelastic behaviour, the processing of elastomers such as elostomer materials rubber by conventional methods causes problems such as low surface quality, These problems such as instability of dimensional, burrs and adiabatic shear band formation constitute the major obstacle for quality and economic processing. Furthermore, the machining selected method is a challenging and complex process as it is effected by the surface quality, rate of material removed, and the time required for completion. Therefore, one of the unconventional machining methods such as AWJ [32] is preferred for machining viscoelastic materials. Maurya et al. [33] researched all the unconventional processing ways that they operated to elastomers. As a result, they stated that AWJ is suitable for machining thick

elastomeric materials with improved surface quality and material removal. Hu et al. [34] studied ultra-high pressure AWJ on elastomer. As a result, they analysed the traverse speed effect (V_f) on the penetration depth during the AWJ method. They observed that at higher V_f speed, it leads to a deeper cut and the depth of cut is not maximised, while at slower V_f speed most of the energy is wasted. Cakmak et al. [35] found that the mechanical and rheological analyses of EPDM rubber with different compositions resulted in an increase in breaking stress and elongation, so the EPDM rubber obtained with the modified new formulation can be used in industry.



Figure 4. Parameters affecting surface quality

Carbon fibre as composite material; Li et al. [36] achieved close results in AWJ cutting of carbon fibre reinforced polymer. As a result, they observed edge rounding and a wavy slot in the upper kerf profiles, whereas, in the lower kerf profile, in addition this, they observed partial penetration, wavy edges, slits, and increased width at the endpoints of jet. Kumaran et al. [37] found that delamination of edge and deformation of corner are typical problems during AWJ cutting for carbon fibre reinforced polymer. Madhu and Balasubramaniam [38] while examining the challenges faced by fibre-reinforced polymer composites in the AWJ process, increasing the AWJ traverse speed resulted in greater stability of the nozzle. So, it obtained in a minimum ripple pattern and less surface wear. Irina et al. [39] suggested that the critical parameter to reduce KTR during AWJ machining of carbon fibre reinforced polymer hybrid composites is stand-off distance (SOD), followed by V_f. Shenglei et al. [40] investigated kerf quality in the machining of carbon fibre reinforced plastics by multiple passes of AWJ. The analysis of experimental shown that the multiple pass parameter with increased AWJ in pre-defined ranges reduced the KTR. They stated that with high AWJ multiple pass machining should generate a relatively low V_f in the first pass cutting operation and a high V_f in the second pass cutting operation to further decrease the KTR. Besides,

they observed that the delamination of the lower kerf profile that occurs in the machining of carbon fibre reinforced plastics is due to the material removal mechanism. Anand et al [41] studied thin hybrid polymer composites in AWJ method to specify the significant processing parameters. They determined that the abrasive flow rate greatly make effets the machining performance resulting from V_f. Karacor et al. [42] investigated the tensile strength and stiffness characteristics of different hybrid composite structures reinforced with Jute and carbon fibres for polyester and epoxy resin. As a result, it was observed that the use of epoxy resin resulted in a stronger structure in terms of mechanical properties and a harder structure in terms of microhardness. Sükür [43] investigated the sliding friction and wear properties of carbon fibre reinforced epoxy composites with calcium carbonate (CaCO₃) nano-reinforcements against metallic opposing surfaces.

PA6 G as a polymer material; High heat generation is inevitable during the engineering materials machining. The energy arising from the friction between the cutting tool, the workpiece and the separation of the atomic bonds atomic in deformation fo plastic are the major causes for the increase in temperature. Materials as metal are less affected by deformation of thermal because they have a high coefficient of thermal conductivity compared to ot her materials of engineering. Nevertheless, in polymer materials, undesirable production problems such as distortion, material plastering, increasing of surface roughness, edge build-up emerge due to high temperature [44-47]. These defects can be minimised by optimising the parameters of process in the processing of polymer materials [48]. However, optimising the parameters are not enough to enhance the quality of surface because a large amount of heat is generated in machining applications because of the load and high speed. It is important to use cutting fluids to remove heat from the workpiece. Nevertheless, the negative effects of mineral or semisynthetic cutting fluids on the human health and environment restrict their use [49]. The using of vegetable-based coolants in machining operations in their low thermo-oxidation resistance is restricted that their low tribological performance at high temperatures. Therefore, it is require to use a critic process without heat generation to enhance the machinability for polymer materials. AWJ process, in that cutting can be fulfilled without increasing the temperature, is very efficient for increasing the machinability of polymer materials and enhancing the quality of surface [50]. Kartal et al. [51] searched the optimum parameters for maximum MRR in turning and minimum roughness of surface (R_a) low density polyethylene material by statistical and experimental methods. In conclusion, they stated that the method of AWJ is an significant method for polymers of machining. By eliminating effects of thermal in AWJ machining of polymer materials, machinability can be important enhanced [52]. But, there are still significant problems associated with ergonomics and quality of surface. The roughness of surface is intensly effective in determining the materials fatigue life operating under dynamic loads. The quality of low surface in the AWJ process is based on the burst behaviour of the water jet after exit of nozzle. Because of the pressure change, the

water jet included of abrasive particules and water is dispersed on the workpiece. Due to this breakout behaviour, since the hardness and sharp form of the abrasive particles in the cutting jet are higher than the workpiece, when they hit the workpiece with high pressure, the surface quality of the material deforms and wear occurs. In addition this, the AWJ operating method generates problems as spatter and noise due to the high pressure. During high pressure AWJ, it generates unacceptable levels of noise (~110 dB) for the health of workers [53, 54]. To solve the surface quality and noise ergonomics problems, so the dispersion behaviour of the abrasive particles in the jet nozzle should be kept under control. Mindivan [55] investigated the effect of nanosized graphene particles used as fillers on the structural and thermo-mechanical properties of Polyamide 6/Graphene Nanolayer (PA6/GNP) composites. As a result, it was concluded that the thermo-mechanical properties of composites were improved thanks to their new and dominant crystal structures.

Since there are generally AWJ cutting studies focused on metal materials within the scope of the literature, in this research, it is aimed to examine the cutting processes of plastic, rubber and composite materials of different thicknesses other than metal materials at different traverse speeds in the AWJ method, which is an innovative aspect that will contribute to the literature.

2 Mathematical modelling of smoothed partical hydrodynamics (SPH) for abrasive water jet

2.1 SPH basic theory

The erosion phenomenon of abrasive particles causing roughening of the workpiece surface is analysed by repeated impacts of these particles with a water jet, whereas the investigate of the effect of a single abrasive particle can be beneficial in understanding the parameters such as particle shape, impact angle and impact velocity that are effective in material deformation and chip removal mechanisms such as cutting, cracking. Reducing the abrasion mechanism to single particle impact analysis provides applicability, numerical analysis techniques, robustness and validation of material models. Experimental research can be verified by numerical analysis with SPH method. Therefore, the wear mechanism can be explained by mathematical modelling of the abrasive particles on a single abrasive particle. SPH method, which does not have a mesh structure (without mesh), provides an advantage in the simulation of particle impacts since it does not include deformable elements in the SPH structure, as opposed to analysis methods with gridbased mesh structure encountered in large deformation problems such as mesh entanglement and element distortion [65]. The method of SPH is based upon the algorithm that distributes the fluid and abrasive particles into a series of particles that simulate the flow of the fluid by interacting with each other. The continuous phase in the SPH analysis domain is decomposed into finite particles carrying field and material variables (Figure 5) [66] shows the support field in the SPH method, when particle b is in the region Ω , which is the support field of particle a, the two particles interact and gain acceleration with respect to the equations of motion.

Since each SPH particle has its own acceleration, the SPH method is suitable for deformation. Another advantage of the method of SPH lies in its conceptual simplicity and simple implementation, which facilitates the introduction of new physical quantities [57].



Figure 5. Support domain and smoothing function for the particle of interest, i [58]

SPH is defined by Equation (1), which expresses the integral approximation or kernel approximation of the field function f by the function $\langle f \rangle$ [59].

$$\langle f(x) \rangle = \int_{\Omega} f(x')W(x-x',h)dx'$$
 (1)

where

< f(x) > is the mean value of the function f at point r in the domain Ω , the continuous field function of the particle x in the domain,

 Ω : the distance of an arbitrary point from the origin

W: Correction kernel function with central peak

h: The length of the correction between the DTH particles. h indicates the size of the support area around the particle at point r.

x': The vector describing the position of all points in the domain.

The continuous integral indicate stated in Equation (1) can be transformed into discretized sums over all arbitrarily distributed particles in the domain.

This process is generally referred to as 'approximation of particle' in domain functions.

Given a correction function W for particle xi, for a number of particles N at position xi in the domain, the approximation of particle for $\langle f(x) \rangle$ can be stated as in Equation (2) [59].

$$\langle f(x_i) \rangle = \sum_{j=1}^{N} \frac{m_i}{\rho_j} f(x_i) \cdot W(x_i - x_j, h)$$
 (2)

where,

 m_i : Particle mass

 ρ_j : Particle density

In the production operations with abrasive water jet, water can be defined as a plastic material when it hits the workpiece that is more rigid than itself. So, the pressure and volumetric strain increase are expressed by the slope of the linear relationship between Us and Up with an equation of state (Equation (3)).

$$\boldsymbol{U}_{\boldsymbol{s}} = \boldsymbol{c}_{\boldsymbol{0}} + \boldsymbol{s}\boldsymbol{U}_{\boldsymbol{p}} \tag{3}$$

where

 c_0 : Mass speed of sound for pure water medium

s: Slope of linear Us-Up Hugoniot form in equation of state

Therefore, the Mie-Grüneisen equation of state (Equation (4)) can be used to describe the pressure

$$P = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \left(1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2} \right) + \Gamma_0 \rho_0 E_m \tag{4}$$

P: Pressure

ρ₀: reference density

 $\eta = 1 - \rho_0 \rho^{-1}$ is nominal volumetric compressive stress c_0^2 : elastic bulk modulus for small nominal stresses Γ_0 : Grüneisen ratio E_m : internal energy per unit mass

2.2 Abrasive particules and surface roughness

The abrasive particles used in the abrasive water jet are applied to the workpiece one after another, removing chips from the workpiece surface and causing erosion, and the surface becomes rough. For a good surface erosion process, the hardness, toughness, angularity and density of the abrasive particles must be at the highest level. Each abrasive grain hits the surface at high speed one after another and removes the chip (Figure 6 a-d) [60]. As a result of these grains multiplying and hitting the workpiece, roughness occurs on the surface. The surface quality obtained after the process plays a critical role in reducing the operation cost.



Figure 6. Simulation of chip detachment from the surface of workpiece [71]

3 Materials

Three types of ductile materials of different thicknesses were used during the experiment to investigate the quality of surface for the workpiece with abrasive grains in the AJM structure. These materials were cut by AJM method at different traverse speeds and their surface qualities were analyzed.

Cast polyamide (PA6 G) as Polymer material (Figure 7); It is an engineering polymer material produced by anionic polymerization casting process that is resistant to physical, mechanical and chemical effects such as abrasion, impact, fatigue and corrosion, as well as high dimensional stability, lighter and economical than metals due to its easy to process and low density. By changing the polymerization conditions, the material properties of PA6 G (Table 2) [61] can be modified according to specific applications, which can be improved by adding various additives, fillers, lubricants and dyes to improve the molecular structure, properties and performance [62, 63]. It is used in a diversity of industrial applications, including rotary and sliding moving parts in shafts, slides and bushings, gears etc. [64, 65].



Figure 7. PA6 G as polymer material

Table 2. Material	properties of PA6 G	[61]
--------------------------	---------------------	------

Material Properties	Unit	Value
Density	g cm ⁻³	1.15
Tensile strength	N mm ⁻²	60-70
Yield strength	N mm ⁻²	80
Allowable mean pressure deformation 1%	N mm ⁻²	26.00
Allowable mean pressure deformation 2%	N mm ⁻²	51.00
Allowable mean pressure deformation 5%	N mm ⁻²	92.00
PV limit	MPa. mms ⁻¹	0.13
Flexural strength	$N \text{ mm}^{-2}$	140
Elongation	%	> 50
Flexural modülüs	$N \text{ mm}^{-2}$	3200
Tensile modülüs	N mm ⁻²	3500
Friction coefficient		0.35
Ball hardness	N mm ⁻²	165
Sliding wear	µm.km⁻¹	0.10
Abrasive wear		150
Notch impact resistance	Kj m ^{−2}	4-25
Elastic modulus	N mm ⁻²	3000
Hardness (shore D)	-	84
Application Temperature	°C	-40-110
Melting Temperature	°C	220
Thermal conductivity	W.Km ⁻¹	0.29
Electrical strength	kV.mm ⁻¹	25
Water absorption	%	6.5

PA6 chemical composition is formed by the polymerization of 6-amino hexanoic acid, a 6 carbon containing compound (Figure 8). The starting material of PA6 is ε -caprolactum. Lactum is dissolved by hydrolysis.



Figure 8. Chemical composition of PA 6 [63]

Carbon fiber as composite material (Figure 9); Carbon fiber is a long, thin fibrous material with about 5-10 µm. diameter and consisting mostly (93-95%) of carbon atoms. Carbon fiber (diameter 1 µm) has a tensile strength of 20 GPa, a tensile modulus of 700 GPa and a tensile modulus of 1.5×106 . It has an electrical conductivity of S m⁻¹ [66]. Carbon fibers are mostly formed by carbonization of materials such as rayon, polyacrylonitrile (C₃H₃N)_n and pitch. Therefore, the two main components of the chemical structure of carbon fibre are carbon and polyacrylonitrile. Thousands of carbon fibers come together to form carbon fibers that are five times stronger and twice as hard as steel. It has high chemical resistance, tensile strength, hardness, weight/strength ratio. It is tolerant to extreme heat and has low thermal expansion. It is used in many industries such as aerospace, defense and automotive [67]. Carbon fibre type is classified under two groups as pitch based and Polyacrylonitrile based according to the by-products and chemical methods used. Both groups are classified in terms of strength. In this section, the mechanical properties of carbon fibre composite material from standard modulus polyacrylonite (Table 3) and low modulus pitch (Table 4) groups are shown.



Figure 9. Carbon fibre as composite material

Table 3. Mechanical properties of polyacrylonitrile based carbon fibre [67]

Properties	Unit	Value
Strain modulus	GPa	228
Strain strength	MPa	380
Elongation	%	1.6
Electrical resistivity	μΩ. cm	1650
Thermal conductivity	$W.mK^{-1}$	20
Density	g.cm ⁻³	1.8
Carbon content	%	95
Leaf diameter	μm	6-8

Table 4. Mechanical properties of pitch based carbon fiber

 [67]

Properties	Unit	Value
Strain modulus	GPa	170-241
Strain strength	MPa	1380-3100
Elongation	%	0.9
Electrical resistivity	μΩ. cm	1300
Thermal conductivity	W.mK ⁻¹	-
Density	g.cm ⁻³	1.9
Carbon content	%	97
Leaf diameter	μm	11

The average chemical composition of polyacrylonitrile based carbon fibre is shown in Figure 10. Carbon fibres are materials containing more than 90% carbon and varying amounts of nitrogen, oxygen and hydrogen in their chemical structure. Their composition varies depending on oxidation conditions, temperature and time [68, 69].



Figure 10. Representation of the chemical structure of Carbon Fibre

EPDM rubber as elastomer material (Figure 11), Elastomer is a polymeric material with both viscous properties and elastic (Table 5) and (Table 6). Elastomers are held together by longer polymeric chains driven by weak intermolecular forces (Figure 12). Once released from the applied force/tension, it recovers its original shape. When stretched, weakly held forces cause them to elongate greatly and become flexible and sticky [70, 71]. Elastomers can be used in different climatic conditions as they are resistant to temperature changes. They can maintain their form in challenging conditions by showing high resistance to impacts and chemicals. They are resistant to chemicals. In addition, their waterproof feature provides an advantage. Elastomers are used in diversity industries such as renewable energy, automobile, oil and gas, and biomedical [72, 73].



Figure 11. EPDM rubber material

Fable 5. Mechanical	pro	perties	of	EPD	РM	rubber	[70]	
---------------------	-----	---------	----	-----	----	--------	------	--

Physical Properties	Unit	Value
Density	g.cm ⁻³	0.860
Hardness	Shore A	40-90
Ultimate tensile strength	$N mm^{-2}$	17.0
Ultimate tensile strain	%	195
Elongation	%	600
Glass Transition Temp.	°C	-54

Table 6. Chemical composition of EPDM rubber [70]

Value
0.5
5.0
1.0
30
1.0
2.0
1.5



Figure 12. Representation of the chemical structure of EPDM [71]

4 Experimental studies

In this research work, cestamide, rubber, carbon fibre materials were considered during cutting with AJM during the experiment. Preliminary preparation was made with respect to the changes in the feed rate and material thickness values to be applied in their cutting. The experiments were executed in Omax 5555 abrasive water jet machine with Servotron 40.37/40.45 ultra high pressure pump, which can provide maximum 400 MPa water pressure, 37-45kW (50-60 HP) driving power, 3.8-4.6 feed rate (Figure 13). Experiments of cutting were performed at three different cutting speeds on the materials cestamide (PA6 G) (Table 7), carbon fibre (Table 8) and EPDM rubber (Table 9) with thicknesses of 10, 20, 25 and 30 mm.



Figure 13. Representation of the cutting prosses

Table 7. PA6 G thicknesses and traverse	e speeds
---	----------

Material Thickness (mm)	Traverse Speed (mm/min.)
	V ₁ =390
10	V ₂ =500
	V ₃ =700
	V ₁ =230
15	V ₂ =300
	V ₃ =420
	V ₁ =170
20	V ₂ =220
	V ₃ =310
	V ₁ =110
30	V ₂ =150
	V ₃ =210

T	able	e 8.	Carbon	fiber	thickness	and	traverse speeds	,
---	------	------	--------	-------	-----------	-----	-----------------	---

Material Thickness (mm)	Traverse Speed (mm/min.)
	V ₁ =630
10	$V_2 = 680$
	V ₃ =950
	V ₁ =230
15	V ₂ =300
	V ₃ =420
	V ₁ =200
20	$V_2 = 270$
	V ₃ =400
	V ₁ =150
30	V ₂ =200
	V ₃ =270

Table 9	9.	EP.	DM	rut	ber	thi	cknesses	and	traverse speeds	
									Traverse Speed	

Material Thickness (mm)	Traverse Speed
Material Theorems (min)	(mm/min.)
	$V_1 = 1000$
10	V ₂ =1500
	V ₃ =2000
	V ₁ =650
15	V ₂ =900
	V ₃ =1000
	V ₁ =450
20	V ₂ =600
	V ₃ =900

Afterwards, cutting processes were performed at a constant values (Table 10), feed rates (V_1 : Low rotational speed; V_2 : Medium rotational speed; V_3 : High rotational speed) and material thicknesses were changed. A total of 99 cutting operations were made at three different traverse speeds on the basis of three different materials with different thicknesses. The cutting speed was determined according to the thickness of the material, mechanical properties and mesh number of the abrasive particle, within the framework of AWJ fixed parameters.

 Table 10. Constant parameter values in AWJ machine according to 50 HP pump

Constant parameters	Value
Orifice diameter (mm)	0.40
Focusing tube diameter (mm)	1.06
Water jet pressure (MPa)	380
Abrasive mass flow rate (gr min ⁻¹)	544,310
Stand off distance (mm)	2.0

The chemical composition (Table 11), physical properties (Table 12) and mesh sizes (Table 13) of silicon dioxide used as abrasive in the experiments are given as average [74].

 Table 11. Average chemical composition of silicon dioxide

 (SiO₂) [87]

Chemical matter	Rate (%)
SiO2	35.0
Fe2O3	33.0
AlO3	23.0
MgO	7.00
MnO	1.00
CaO	1.00

Table 12. Physical	properties of silicon	dioxide (SiO ₂) [87]
--------------------	-----------------------	----------------------------------

Properties	Unit	Value
Hardness	(mohs)	ca. 7.5-8.0
Abrasive size	(mesh)	80
Grain shape	-	Angular
Melting point	(°C)	1300
Spesifc gravity	(g/cm^3)	approx. 3.5-4.3
Bulk density*	(g/cm^3)	approx. 1.9-2.2

* Depending on granular size

Table 13. The mesh of Silisyum dioksit (SiO₂) for high-pressure water jet cutting [87]

Mesh	Average grain size (mm)	
80	0.180-0.400	
120	0.125-0.250	
150	0.106-2.212	
180	0.090-0.180	
200	0.075-0.150	
220	0.063-0.125	
240	0.053-0.106	
350	0.045-0.090	

In the AWJ method, pure water was used as a fluid, the properties of the water used (Table 14) [7].

 Table 14. Pure water parameters [7]

Density(kg m ⁻³)	Velocity of Sound (m	Viscosity of Dynamic
	s ⁻¹)	(Pa·s)
1000	1450	0.001

PA6 G (Table 15) and (Figure 14), carbon fibre (Table 16) and (Figure 15) and elastomer (Table 17) and (Figure 16) were cut at different traverse speeds according to their thicknesses and surface roughness values (Rz) were measured at three different points by surface profilometry in accordance with ISO 4287 standard. Then, average values of surface roughness were taken at different speeds according to PA6 G (Table 18), carbon fibre (Table 19) and elastomer (Table 20) thicknesses.

Table 15. Surface roughness values of PA6 G material at three different points at three different speeds

Sample Thickness (mm)	No. of Samples	V ₁ (Low speed) Roughness values R _Z	V ₂ (Medium speed) Roughness values R _Z	V ₃ (High speed) Roughness values R _Z
	1	53.80	53.80	53.80
10	2	53.81	64.59	72.97
	3	59.6	68.24	66.49
	1	51.59	52.59	63.78
15	2	50.37	56.55	60.30
	3	50.49	53.78	61.28
	1	45.40	54.07	65.21
20	2	48.07	55.73	61.75
	3	46.44	49.18	58.41
	1	48.67	55.30	68.64
30	2	44.94	49.16	57.30
	3	43.28	54.47	58.61



Figure 14. PA6 G Thickness-Speed-Surface Roughness (Rz)

Table 16. Surface	e roughness v	alues of c	arbon fi	iber r	naterial
at three different	points at three	e different	t speeds		

Sample Thickness (mm)	No. of Samples	V ₁ (Low speed) Roughness values R _Z	V ₂ (Medium speed) Roughness values R _Z	V ₃ (High speed) Roughness values R _Z
	1	64.50	53.28	67.15
10	2	39.75	49.12	53.77
	3	45.00	46.93	59.70
	1	59.92	63.02	59.34
15	2	58.01	60.55	86.61
	3	45.42	61.22	75.22
	1	76.20	72.60	79.83
20	2	69.47	70.97	77.94
	3	65.00	77.76	71.02
	1	44.77	58.65	57.56
30	2	44.05	64.23	60.33
	3	48.32	49.36	79.28



Figure 15. Carbonfibre Thickness-Speed-Surface Roughness (Rz)

Table 17. Surface roughness values of elastomer material at three different points at three different speeds

Sample Thickness (mm)	No. of Samples	V ₁ (Low speed) Roughness values R _Z	V ₂ (Medium speed) Roughness values R _Z	V ₃ (High speed) Roughness values R _Z
	1	52.07	50.27	56.55
10	2	49.64	55.34	65.41
	3	51.97	55.48	65.45
	1	47.10	54.22	64.66
15	2	52.12	50.99	98.93
	3	52.70	58.85	62.01
	1	70.74	88.59	87.89
20	2	50.76	62.84	98.27
	3	52.08	66.36	73.24



Figure 16. EPDM rubber Thickness-Speed-Surface Roughness (Rz)

Table	18.	Average	surface	roughness	values	of	PA6	G
materia	al at	three diffe	erent spe	eds				

	V ₁ (Low speed)	V ₂ (Medium speed)	V ₃ (High speed)
Material	Roughness	Roughness	Roughness
Thickness (mm)	values	values	values
	Rz	Rz	Rz
10	55.74	62.21	63.40
15	50.82	55.16	61.79
20	46.63	52.10	61.80
30	45.63	51.80	61.52

Table 19. Average surface roughness values of carbonfibre material at three different speeds

	-		
Material Thickness (mm)	V ₁ (Low speed)	V ₂ (Medium speed)	V ₃ (High speed)
	Roughness	Roughness	Roughness
	values	values	values
	R _Z	R _Z	R _Z
10	42.37	49.78	60.20
15	54.45	61.60	80.92
20	67.24	73.78	78.89
30	45.71	54.01	65.72

Table 20. Average surface roughness values of EPDM rubber at three different speeds

	-		
Material	V ₁ (Low	V2 (Medium	V ₃ (High
	speed)	speed)	speed)
	Roughness	Roughness	Roughness
Thickness (mm)	values	values	values
	Rz	R _Z	Rz
10	51.23	55.41	62.47
15	50.64	56.54	63.34
20	51.42	72.60	86.47

4.1 ANOVA analysis of data and discussion of results

The following material-based results were obtained in the analysis of variance by ANOVA in MiniTab programme. The accuracy rate of the variance analysis for PA6 G is 97.8%. The P probability values of 'Material Thickness' and 'Traverse Speed' are less than 0.05. This shows that these two parameters have significant effects on surface roughness. According to this analysis, the most important parameter on surface roughness is 'Traverse Speed'. As 'Traverse Speed' increases, surface roughness increases. This effect is more pronounced in thin materials (Figure 17)

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	437,244	97,80%	437,244	87,449	53,26	0,0001
Linear	2	301,35	67,40%	198,918	99,459	60,57	0,0001
Material Thickness	1	71,342	15,96%	52,089	52,089	31,72	0,0013
Traverse Speed	1	230,009	51,45%	96,097	96,097	58,53	0,0003
Square	2	127,71	28,56%	32,633	16,316	9,94	0,0125
Material Thickness*Material Thickness	1	11,263	2,52%	3,189	3,189	1,94	0,2129
Traverse Speed*Traverse Speed	1	116,448	26,05%	4,333	4,333	2,64	0,1554
2-Way Interaction	1	8,183	1,83%	8,183	8,183	4,98	0,067
Material Thickness*Traverse Speed	1	8,183	1,83%	8,183	8,183	4,98	0,067
Error	6	9,852	2,20%	9,852	1,642		
Total	11	447,096	100,00%				

Figure 17. Analysis of ANOVA for PA6 G

The accuracy rate of the analysis of variance for carbon fibre is 90,72%. According to this analysis, the P probability value of both parameters is less than 0.05. Accordingly, both parameters have a significant effect on surface roughness (Figure 18).

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	1092,15	90,72%	1092,15	218,43	11,73	0,005
Linear	2	34,34	2,85%	158,44	79,218	4,26	0,071
Material Thickness	1	6,46	0,54%	150,61	150,61	8,09	0,029
Traverse Speed	1	27,88	2,32%	158,41	158,41	8,51	0,027
Square	2	1033,86	85,88%	317,9	158,95	8,54	0,018
Material Thickness*Material Thicknes	1	977,85	81,23%	193,59	193,593	10,4	0,018
Traverse Speed*Traverse Speed	1	56,01	4,65%	0,22	0,22	0,01	0,917
2-Way Interaction	1	23,95	1,99%	23,95	23,949	1,29	0,3
Material Thickness*Traverse Speed	1	23,95	1,99%	23,95	23,949	1,29	0,3
Error	6	111,68	9,28%	111,68	18,614		
Total	11	1203,83	100.00%				

Figure 18. Analysis of ANOVA for carbon fibre

The accuracy rate of the variance analysis for the variance analysis for elastomer is 86.70%. According to this variance analysis, the effect rate of 'Material Thickness' is 32,37%. As the 'Material Thickness' increases, the surface roughness increases significantly (Figure 19).

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	1098,25	86,70%	1098,25	219,651	3,91	0,145
Linear	2	816,38	64,45%	546,2	273,099	4,86	0,114
Material Thickness	1	410,03	32,37%	501,62	501,62	8,93	0,058
Traverse Speed	1	406,35	32,08%	342,23	342,231	6,09	0,09
Square	2	239,51	18,91%	53,16	26,58	0,47	0,663
Material Thickness*Material Thickness	1	3,72	0,29%	32,73	32,727	0,58	0,501
Traverse Speed*Traverse Speed	1	235,79	18,61%	0,28	0,276	0	0,948
2-Way Interaction	1	42,37	3,34%	42,37	42,373	0,75	0,449
Material Thickness*Traverse Speed	1	42,37	3,34%	42,37	42,373	0,75	0,449
Error	3	168,5	13,30%	168,5	56,166		
Total	8	1266,75	100,00%				

Figure 19. Analysis of ANOVA for EPDM rubber

4.2 Confident interval (CI) analysis results

When the confidence intervals (CI) containing the group averages on the basis of material made through Minitab are examined, it is seen that there is no problem in the experimental results since PA6 G (Table 21) and (Figure 20), Carbonfibre (Table 22) and (Figure 21) and EPDM rubber (Table 23) and (Figure 22) contain 95% confidence level.



Figure 20. Confidental interval (CI) analizi for PA6 G

Material Thickness (mm)	N	Mean	StDev	95% CI
10	3	60.45	4.12	(51.75; 69.15)
15	3	55.92	5.52	(47.23; 64.62)
20	3	53.51	7.68	(44.81; 62.21)
30	3	52.98	8.01	(44.29; 61.68)

Table 21. Confidental Interval (CI) analizi for PA6 G



Figure 21. Confidental Interval (CI) analizi for Carbon fibre

Table 22. Confidental Interval (CI) analizi for Carbon fibre

Material Thickness (mm)	N	Mean	StDev	95% CI
10	3	50.78	8.96	(37.42; 64.15)
15	3	65.66	13.69	(52.29; 79.02)
20	3	73.30	5.84	(59.94; 86.67)
30	3	55.15	10.05	(41.78; 68.51)



Figure 22. Confidental Interval (CI) analizi for EPDM rubber

Table 23. Confidental Interval (CI) analizi for EPDM rubber

Material Thickness (mm)	Ν	Mean	St.Dev	95% CI
10	3	56.37	5.68	(40.38; 72.36)
15	3	56.84	6.36	(40.85; 72.83)
20	3	70.2	17.7	(54.2; 86.2)

5 Results and discussion

In this research, the main factors affecting the surface quality due to surface roughness after cutting of non-metal such as polyamide, carbon fibre and elastomer materials of different thicknesses at different speeds in AWJ method were determined.

One of the main factors is abrasive particles. The geometrical structure, density, toughness, hardness of abrasive particless play an important role in the quality of the workpiece surface. In addition, they should not stick to the cutting surface, especially the ductile materials used in this research. For this reason, among the different types of abrasives, due to its compatibility with the material and its affordable cost Silicon dioxide (SiO₂) has been selected. Al₂O₃ can be used in harder materials. Abrasive particles are scaled in mesh units. Generally, an abrasive particle with a scale of 80 mesh is ideal for many processes. For high precision cutting, a 120 mesh abrasive will provide a better quality cut.

Another important factor is the parameters used in the AWJ machining method. In this research, different traverse speeds were used as variable parameters. It was found that the surface quality increased as the traverse speed increased. However, the parameters used in the AWJ method. Different parameters such as stand off distance, pressure, mass flow rate, focusing tube diameter and length, orifice diameter can be developed by using them as variable parameters for these materials. Among these parameters, especially the pressure of the pumped water has a very high value such as 150-620 MPa. However, using the ideal pressure 350-450 MPa ensures the long life of AJM equipment, otherwise, operating with higher pressure by using a condenser in addition to the high pressure pump shortens the service life of AJM equipment and causes more frequent failures and slows down the production process.

The last important factor is the suitability of the parameters of the material properties. In addition to the chemical and physical properties of the material, its thickness is also an important parameter. As the workpiece thickens, it increases the depth of cut and accordingly, the change in the amount of chips causes fluctuations on the surface. As a result, it causes roughness on the surface. For this reason, it is necessary to increase the kerf tapering by widening the wear zone on the workpiece surface by increasing the stand off distance from AWJ parameters, reducing the traverse speed and increasing the amount of abrasive in the water.

When AWJ method compared with cutting methods such as Laser Beam, Plasma, CNC method etc. It is understood that it is a production method with the least surface roughness. In addition, it does not cause thermal damage on the machined surfaces such as laser beam method. The absence of cutting tool costs such as CNC methods gives this method an advantage.

6 Conclusions

Although the cutting parameters and effects of various metal materials have been investigated in the AWJ method in the literature, in this study, ductile materials with different thicknesses such as PA6 G, carbon fibre and rubber have been cut using the AWJ method under different traverse speeds in the AWJ method and an innovative research result has been added to the literature. In the experimental phase, a total of 99 cutting operations were performed. The surface quality of ductile materials with different thicknesses of traverse speed was investigated. After the cutting process, surface roughnesses were measured at three different points from the material surfaces. As a result, the effects of cutting speed and material thickness on surface quality were analysed and recommendations were made in order to shed light on future research to obtain quality surfaces in water jet cutting processes performed in industrial applications. The results obtained in this research are explained as follows.

Analysis of the effect of material type on surface quality; As a result of the abrasion mechanism that occurs with the impact effect of abrasive particles in the cutting process of the material cut with AWJ, it was observed that the surface quality decreased as the cutting speed increased in all materials used in the experiment. Therefore, roughness values increased on the material surfaces. It was determined that carbon fibre had the highest roughness value and PA6 G had the lowest roughness value in materials cut under equal conditions.

Analysis of the material thicknes effect on the quality of surface; In the PA6 G material used in the experiment, it was observed that the roughness of surface decreased as the thickness increased. In carbon fiber and rubber materials, the roughness of surface increased as the thickness increased.

Analysis of the traverse speed effect on the quality of surface; While cutting three materials with different thicknesses under equal conditions, the traverse speed was gradually increased at low, medium and high speeds. As a result, it was observed that as the speed increased, the surface roughness increased and the surface quality decreased in all materials used. It was arrived the result that the reason for this was that the materials used in the experiment did not have a rigid structure like metal materials.

Acknowledgement

The author would like to thank Prof. Dr. Ahmet DEMİRER, Mrs. Ferhande BEDIR, Mrs. Sema Nur SUEL, Mr. Çağatay YALÇIN and the personnel at Kaya Çelik Sac ve Demir Tic and Noksel Çelik Boru factories for their support in conducting the experiments during this study.

Conflict of interest

The author declares that there are no conflicts of interest.

Similarity rate (iThenticate): %12

References

- C. Baykara and E. Atik, The effect of surface roughness and carburized depth on wear resistance in 16MnCr5 case hardening steel. Industrial Lubrication and Tribology, 77 (1), 81-92, 2025. https://doi.org/10.1108/ILT-05-2024-0152
- [2] C. Baykara, Effects of single-lap joint at different adhesive thicknesses on fatigue strength of metals with different surface coatings. Proceedings of the

Institution Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 237 (17), 1-18, 2023. https://doi.org/10.1177/09544062231152995

- [3] C. Baykara, I.T. Teke and A.H. Ertaş, Effects of the single-lap joint on fatigue strength of metals with different surface coatings: a numerical simulation. E3S Web of Conferences, 402, 11011, 2023. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340211011
- [4] C. Baykara, The effect of adhesive strength on thinwalled metal surfaces coated with cataphoresis application according to adhesive thickness. 7th International Conference on Structural Adhesive Bonding 2023, Lucas F. M. da Silva and Robert D. Adams (eds.). Springer, Porto, pp.27-39. 2024
- [5] C. Baykara, Farklı kimyasal yöntemlerle kaplanmış çelik plakaların farklı yapıştırma kalınlıklarda tek bindirmeli birlestirme yöntemiyle birleştirilen numunelerin yorulma analizleri sonuçlarının wöhler eğrilerinde karsılastırılması. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 24 (1),176-188. 2024. https://doi.org/10.35414/akufemubid.1288047
- [6] P. Löchner, J. Krzysztof and P. Niesłony. Investigation of the effect of cutting speed on surface quality in abrasive water jet cutting of 316L stainless steel. Procedia Engineering, 149, 276–282, 2016. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.667
- Y. Hu, F. Wang, F. Jiang, L. Hu and G. Huang. Simulation analysis of damage and energy consumption of rocks during abrasive water jet impacts based on SPH-FDEM method. Powder Technology, 449, 120418, 2025. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.120418
- [8] F. Huang, J. Mi, D. Li, R. Wang and Z. Zhao, Comparative investigation of the damage of coal subjected to pure water jets, ice abrasive water jets and conventional abrasive water jets, Powder Technology, 394, 909–925, 2021. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.08.079
- [9] M. Dua, K. Zhanga, Y. Liub, L. Fenga and C. Fana, Experimental and simulation study on the influence factorsof abrasive water jet machining ductile materials. Energy Reports, 8, 11840-11857, 2022. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.035
- [10] Y. Natarajan, P.K. Murugesan, M. Mohan, and S. A. Y. A. Khan, Abrasive water jet machining process: a state of art of review. Journal of Manufacturing Processes, 49, 271–322, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.11.030
- [11] A. Ibrahim and M. Papini, Controlled depth microabrasive waterjet milling of aluminum oxide to fabricate micro-molds containing intersecting freestanding structures. Precision Engineering, 75, 24–36, 2022.

https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2022.01.007

[12] A. Nouhi, J. K. Spelt and M. Papini, Abrasive jet turning of glass and PMMA rods and the micromachining of helical channels. Precision Engineering, 53, 151–62, 2018. https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.03.010

- [13] F.C. Campbell, Light Weight Materials: Understanding Basics. ASM International, Cleveland, 2012.
- [14] J. Zhang, C. Han and Z. Liang, Physics of failure analysis of power section assembly for positive displacement motor, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 44, 414-423, 2016. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.10.020
- [15] C. Shi, X. Wan, X. Zhu and K. Chen, A study on mechanical properties of equal wall thickness rubber bushing of positive displacement motor based on hydroge- nated nitrile butadiene rubber ageing test, Petroleum, 8 (3), 403-413, 2021. https://doi.org/10.1016/j.petlm.2021.04.008
- [16] D. Begic-Hajdarevic, A. Cekic, M. Mehmedovic and A. Djelmic, Experimental study on surface roughness in abrasive water jet cutting. Procedia Engineering, 100, 394–399, 2015. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.383
- [17] Z. Ćojbašić, D. Petković, S. Shamshirband. C.W. Tong, Ch, Sudheer, P. Janković, D. Predrag, B. Nedeljko and J. Baralić. Surface roughness prediction by extreme learning machine constructed with abrasive water jet. Precision Engineering, 43, 86-92, 2015. https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.06.013
- [18] K. C. Lee, S. J. Ho and S. Y. Ho, Accurate estimation of surface roughness from texture features of the surface image using an adaptive neuro-fuzzy inference system. Precision Engineering, 29, 95–100, 2005. https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2004.05.002
- [19] A. Akkurt, M. K. Kulekci, U. Seker and F. Ercan, Effect of feed rate on surface rough- ness in abrasive water jet cutting applications. Jorunal of Materials Processing Technology, 147, 389–396, 2004. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.01.013
- [20] R. M. Manohar, CO₂ laser beam cutting of steels: Material issues. Journal of Lasers Applications, 18, 101-12, 2006. https://doi.org/10.2351/1.2193173
- [21] J. Foldyna, L. Sitek, B. Švehla, and Š. Švehla, Utilization of ultrasound to enhance high-speed water jet effects. Ultrasonics Sonochemistry, 11 (3-4), 131-137. 2004.

https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2004.01.008

- [22] D. Krajcarz, Comparison metal water jet cutting with laser and plasma cutting, Procedia Engineering, 69, 838–843, 2014. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.061.
- [23] F. Kartal and A. Kaptan. Artificial neural network and multiple regression analysis for predicting abrasive water jet cutting of Al 7068 aerospace alloy. Sigma Journal of Engineering Natural Sciences, 42 (2), 516–528, 2024

https://doi.org/10.14744/sigma.2023.00102

[24] M. Ficko, D. Begic-Hajdarevic, H.M. Cohodar, L. Berus, A. Cekic and S. Klancnik, Prediction of surface roughness of an abrasive water jet cut using an artificial neural network, Materials, 14 (11), 3108, 2021. https://doi.org/10.3390/ma14113108

- [25] M. Zelen'a'k, J. Valícek, J. Klich and P. Z'idkova', Comparison of surface roughness quality created by abrasive water jet and CO2 laser beam cutting, Tehnicki Vjesnik, 19 (3), 481–485, 2011.
- [26] M. S. Alsoufi, D. K. Suker, A. S. Alsabban and S. Azam, Experimental study of surface roughness and micro-hardness obtained by cutting carbon steel with abrasive waterjet and laser beam technologies, American Journal of Mechanical Engineering, 4 (5), 173–181, 2016. https://doi.org/10.12691/ajme-4-5-2
- [27] V. Perzel, S. Hloch, H. Tozan, M. Yagimli and P. Hreha, Comparative analysis of abrasive waterjet (AWJ) technology with selected unconventional manufacturing processes. International Journal of Physical Sciences, 6 (24), 5587–5593, 2011. https://doi.org/10.5897/IJPS11.460
- [28] E. Dogankaya, M. Kahya and H. Özgür Ünver, H. Abrasive water jet machining of UHMWPE and tradeoff optimization. Materials and Manufacturing Processes, 35(12), 1339–1351, 2020. https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1772486
- [29] M. Kahya E. Doğankaya O. Çaylan Z.G. Büke and H.O. Ünver, Secondary processing of aramid with AWJ and optimization with NSGA-III. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 236 (5), 2164-2175, 2022.

https://doi.org/10.1177/09544089221085325

- [30] F. Kartal and A. Kaptan, Experimental Determination Of The Optimum Cutting Tool For Cnc Milling Of 3D Printed Pla Parts. International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 7 (2), 150-160, 2023. https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1247636
- [31] GMA Garnet Pty Ltd. https://gmagarnet.com/en/americas/waterjet-garnet, Accessed 08 January 2025
- [32] K. Kowsari, J. Schwartzentruber, J.K. Spelt and M. Papini, Erosive smoothing of abrasive slurry-jet micromachined channels in glass, PMMA, and sintered ceramics: experiments and roughness model. Precision Engineering, 49, 332-343, 2017. https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.03.003
- [33] P. Maurya, G.S. Vijay, K.C Raghavendra and B. Shivamurthy, Cryogenic machining of elastomers: a review. Machining Science and Technology 25 (3), 477-525, 2021. https://doi.org/10.1080/10910344.2021.1903923
- [34] Y. Hu, Y. Kang, X.C. Wang, X.H. Li, X.P. Long, G.Y. Zhai and M. Huang, Mechanism and experimental investigation of ultra-high-pressure water jet on rubber cutting. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 15, 1973-1978, 2014. https://doi.org/10.1007/s12541-014-0553-0
- [35] N. Çakmak and Y. E. Engin, Synthesis and characterization of ethylene propylene diene monomer (EPDM) Rubber Mixture. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8 (2), 1299-1306, 2019. https://doi.org/10.28948/ngumuh.479347

- [36] M. Li, X. Lin, X. Yang, H. Wu and X. Meng, Study on kerf characteristics and surface integrity based on physical energy model during abrasive waterjet cutting of thick CFRP laminates. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 113, 73-85, 2021. https://doi.org/10.1007/s00170-021-06590-w
- [37] S. T. Kumaran, T. J. Ko, M. Uthayakumar and M. M. Islam, Prediction of surface roughness in abrasive water jet machining of CFRP composites using regression analysis. Journal of Alloys and Compounds, 724, 1037-1045, 2017. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.07.108
- [38] S. Madhu and M. Balasubramanian, Challenges in abrasive jet machining of fibre-reinforced polymeric composites - a review. World Journal of Engineering, 18 (2), 251-268, 2020. https://doi.org/10.1108/wje-05-2020-0190
- [39] M. M. Irina Wong, A. I. Azmi, C. C. Lee and A. F. Mansor, Kerf taper and delamination damage minimization of FRP hybrid composites under abrasive waterjet machining. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 94, 1727-1744, 2018. https://doi.org/10.1007/s00170-016-9669-y
- [40] X. Shenglei, W. Peng, G. Hang and S. Damien, A study of abrasive waterjet multi- pass cutting on kerf quality of carbon fibre-reinforced plastics. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 105, 4527-4537, 2019. https://doi.org/10.1007/s00170-018-3177-1
- [41] G. Anand, S.V. Perumal, N. Yuvaraj and K. Palanikumar, Influence of abrasive water jet machining parameters on hybrid polymer composite. Journal of the Institution Engineers (India): Series C, 102 (3), 713-722, 2021. https://doi.org/10.1007/s40032-021-00672-0
- [42] B. Karacor, and M. Özcanlı, The effect of use of different types of matrix material on mechanical characteristics in jute/carbon fiber reinforced hybrid composites. Nigde Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences, 11 (2), 439-448, 2022. https://doi.org/10.28948/ngumuh.1080540
- [43] E.F. Şükür. Dry sliding friction and wear properties of CACO₃ nanoparticle filled epoxy/carbon fiber composites. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9 (2), 1108-1117, 2020. https://doi.org/10.28948/ngumuh.725631
- [44] H. Takeyama and N. Lijima, Machinability of glassfiber reinforced plastics and application of ultrasonic machining. CIRP Annals, 37, 93–96, 1988. https://doi.org/10.17951/pjss/2017.50.2.155
- [45] K. Weinert and C. Kempmann, Cutting temperatures and their effects on the machining behaviour in drilling reinforced plastic composites. Advanced Engineering Materials, 6, 684–689, 2004. https://doi.org/10.1002/adem.200400025
- [46] W. König and P. Grass, Quality definition and assessment in drilling of fibre reinforced thermosets. CIRP Annals, 38, 119–124, 1989. https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62665-1

- [47] W. C. Chen, Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber- reinforced plastic (CFRP) composite laminates. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 37, 1097–1108, 1997. https://doi.org/10.1016/S0890-6955(96)00095-8
- [48] J. Kechagias, G. Petropoulos, V. Iakovakis and S. Maropoulos, An investigation of surface texture parameters during turning of a reinforced polymer composite using design of experiments and analysis. International Journal of Experimental Design and Process Optimisation, 1 (2-3), 164-167, 2009. https://doi.org/10.1504/ijedpo.2009.030317
- [49] L. M. Hlavác, I. M. Hlavácová, L. Gembalová, J. Kalicinsky, S. Fabian, J. Meštánek, J. Kmec and V. Mádr, Experimental method for the investigation of the abrasive water jet cutting quality. Journal of Materials Processing Technology, 209, 6190–6195, 2009. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.04.011
- [50] C. Ma and R. T. Deam, A correlation for predicting the kerf profile from abrasive water jet cutting. Experimental Thermal and Fluid Science, 30, 337–343, 2006.

https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2005.08.003

- [51] F. Kartal, M. H. Çetin, H. Gökkaya and Z. Yerlikaya, Optimization of abrasive water jet turning parameters for machining of low density polyethylene material based on experimental design method. International Polymer Processing, 29, 535–544, 2014. https://doi.org/10.3139/217.2925
- [52] F. Kartal and Z. Yerlikaya, Investigation of surface roughness and MRR for engineering polymers with the abrasive water jet turning process. International Polymer Processing, 31, 336–345, 2016. https://doi.org/10.3139/217.3185
- [53] D. K. Kalla, B. Zhang, R. Asmatulu and P. S. Dhanasekaran, Current research trends in abrasive waterjet machining of fiber reinforced composites. Material Science Forum, 713, 37–42, 2012.https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF. 713.37
- [54] A. Radvanská, T. Ergic', Z'. Ivandic', S. Hloch, J. Valicek and J. Mullerova, Technical possibilities of noise reduction in material cutting by abrasive waterjet. Strojarstvo, 51, 347–354, 2009.
- [55] F. Mindivan, Poliamid 6/Grafen nano tabakalı (PA6/GNP) kompozitlerin termo-mekanik özelliklerinin karekterizasyonu. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7 (1), 443-450. 2018. https://doi.org/10.28948/ngumuh.368631
- [56] M. Takaffoli and M. Papini, Finite element analysis of single impacts of angular particles on ductile targets, Wear, 267, 144–151, 2009. https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.10.004
- [57] M. Bagheri, M. Masoud and M. Riazi, A review of smoothed particle hydrodynamics, Computational Particle Mechanics, 11(3), 1163-1219, 2023. https://doi.org/10.1007/s40571-023-00679-7

- [58] Z. Mao, G.R. Liu and X. Dong. A comprehensive study on the parameters setting in smoothed particle hydrodynamics (SPH) method applied to hydrodynamics problems. Computers and Geotechnics, 92, 77-95, 2017. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.07.024
- [59] G.R. Liu and M.B. Liu, Smoothed particle hydrodynamics: a mesh- free particle method. World Scientific, Singapore, 2003.
- [60] M. Takaffoli and M. Papini. Material deformation and removal due to single particle impacts on ductile materials using smoothed particle hydrodynamics. Wear, 274-275, 50–59, 2012. https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.08.012
- [61] TechPlasty data sheet. https://www.techplasty.com/node/232/pdf, Accessed 08 January 2025
- [62] Mega Polimer. https://megapolimer.com/dokumpolyamid-pa6g/, Accessed 03 November 2024
- [63] Hakan Metal. https://www.hakanmetal.com.tr/urunler/pa-6-gdokum-polyamid-kestamit, Accessed 03 November 2024.
- [64] Aydınlar Makine-Metal San. Ve Tic. Ltd. Şti. https://aydinlarmakinametal.com.tr/urunler/muhendisli k-plastikleri/cast-polyamid-pa6-g/, Accessed 03 November 2024.
- [65] S. Satheeskumar and G. Kanagaraj. Experimental investigation on tribological behaviours of PA6, PA6reinforced Al2O3and PA6-reinforced graphite polymer composites. Bulletin of Materials Science, 39(6), 1467–1481, 2016. https://doi.org/10.1007/s12034-016-1296-6
- [66] A. Kausar and R. Taherian. Electrical Conductivity in Polymer Composite Filled With Carbon Microfillers. Electrical Conductivity in Polymer-Based Composites. William Andrew, Norwich, pp.41-72, 2019.

- [67] Avdeso drone. https://avdesodrone.com/karbon-fibernedir-havaciliktaki-onemi-nelerdir/, Accessed 03 November 2024.
- [68] Morgan, P. Carbon Fiber and Their Composites, CRC Press, Boca Raton, 2005.
- [69] S. M. Saufi and A. F. Ismail, Development and characterization of polyacrylonitrile (PAN) based carbon hallow fiber membrane, Songklanakarin Journal of Science and Technology, 24, 843-854, 2002.
- [70] J. Parameswaranpillai, C. D. Midhun Dominic, S. Mavinkere Rangappa, S. Siengchin and T. Ozbakkaloglu, Introduction to Elastombers, Elastomer Blends and Composites, pp.1-9, 2022.
- [71] P. Jagadeesh, S. Mavinkere Rangappa, S. Siengchin, M. Puttegowda, S.M.K. Thiagamani, G. Rajeshkumar, M. Hemath Kumar, O.P. Oladijo, V. Fiore and M. Moure Cuadrado, Sustainable recycling technologies for thermoplastic polymers and their composites: a review of the state of the art. Polymer Composites, 43 (9), 5831-5862, 2022. https://doi.org/10.1002/pc.27000
- J. Karger-Kocsis, A. Mousa, Z. Major and N. Békési. Dry friction and sliding wear of EPDM rubbers against steel as a function of carbon black content. Wear, 264 (3-4), 359–367, 2008. https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.03.021
- [73] B. Zirnstein, D. Schulze and B. Schartel, Mechanical and fire properties of multicomponent flame retardant EPDM rubbers using aluminum trihydroxide, ammonium polyphosphate, and polyaniline. Materials, 12 (12), 1932, 2019. https://doi.org/10.3390/ma12121932
- [74] Kuhmichel abrassive GmbH. Technique data sheet. https://www.kuhmichel.com/en/products/garnet-sand/, Accessed 10 January 2025.





NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 473-481 Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araștırma makalesi / Research article

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



Superior adsorption performance of high temperature solvothermal synthesized zirconium metal-organic framework nanoparticles in dye removal

Yüksek sıcaklıkta solvotermal sentezlenen zirkonyum metal-organik kafes nanopartiküllerinin boya giderimindeki üstün adsorpsiyon performansı

Nergiz Kanmaz ^{1,*}

¹ Chemical Engineering Department, Engineering Faculty, Yalova University, Yalova, Türkiye.

Abstract

In the present study, a zirconium-based metal-organic framework (UiO-66) nanoparticle was synthesized by solvothermal technique and characterized by FT-IR, XRD, SEM, BET analyses and zeta potential measurements. The effectiveness of UiO-66 nanoparticles for crystal violet (CV) adsorption was examined. CV removal process reached equilibrium in 30 min and the system was consistent with the pseudo-second-order model, which involves chemical reactions. The equilibrium results were compatible with the Dubinin-Raduskevich isotherm model. The maximum monolayer adsorption capacity was calculated as 998.18 mg g-1. It was deduced that CV removal rate was low when the solution pH was acidic, and surface charge was dominant in adsorption. In thermodynamic analysis, CV adsorption process is exothermic and spontaneous. The reusability of UiO-66 was investigated and 80.04% CV removal was obtained even after 5 successful cycles. According to the results, UiO-66 nanoparticles have a promising potential for rapid and efficient removal of CV dye.

Keywords: UiO-66, Adsorption, Desorption, Crystal violet.

1 Introduction

Human activities increased with the progress of industrialization, and organic pollutants from manufacturing processes have resulted in serious water pollution issues [1]. Every year, more than 10000 tons of dyes are released into marine environments worldwide, particularly in developing nations with essentially non-existent environmental protection standards [2]. In addition, dyes are not biodegradable when released into the environment; they affect the appearance of water, reduce oxygen solubility and prevent light from penetrating water [3]. Crystal violet (CV) is used for various purposes in areas such as textile, paper, indicator, fertilizer and detergent [4]. It is a frequently employed triphenylmethane organic dye that is hazardous to water life and human health due to its high toxicity and persistence in the environment. About 10% of CV production volume is discharged into ecosystems, which has a significant negative impact on environment. Concerns

Öz

Bu çalışmada, zirkonyum esaslı metal-organik kafes (UiO-66) nanopartikülü solvotermal teknikle sentezlenmiş ve FT-IR, XRD, SEM, BET analizleri ve zeta potansiyeli karakterize ölcümleri ile edilmiştir. **UiO-66** nanopartiküllerinin kristal viyole (CV) adsorpsiyonu için etkinliği incelenmiştir. CV giderme işlemi 30 dakikada dengeye ulaşmıştır ve sistem kimyasal reaksiyonları içeren valancı-ikinci dereceden modelle tutarlıdır. Denge Dubinin-Raduskevich sonuçları izoterm modeliyle uyumludur. Maksimum tek katmanlı adsorpsiyon kapasitesi 998.18 mg g⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Çözelti pH'ı asidik olduğunda CV giderme oranının düşük olduğu ve adsorpsiyonda yüzey yükünün baskın olduğu sonucuna varılmıştır. Termodinamik analizde CV adsorpsiyon işlemi ekzotermik ve kendiliğinden gerçekleşmektedir. UiO-66'nın tekrar kullanılabilirliği araştırılmış ve 5 başarılı çevrimden sonra bile %80.04 CV giderimi elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, UiO-66 nanopartikülleri CV boyasının hızlı ve etkili bir şekilde giderilmesi için ümit verici bir potansiyele sahiptir.

Anahtar kelimeler: UiO-66, Adsorpsiyon, Desorpsiyon, Krsital viyole.

about the long-term negative effects of CV are raised by its capacity for bioaccumulation within ecosystems [5]. Obviously, it is crucial to eliminate CV from water mediums to protect the health of living organisms.

Numerous techniques are chosen to remove toxic organic dyes from wastewater. These techniques have been studied as photo-Fenton process [6], membrane separation [7], photocatalysis [8,9] and biodegradation [10]. Adsorption is a popular technique that is thought to be among the most competitive, easy to use, and produces no hazardous byproducts. It also accounts for its low cost and broad variety of applications [11]. A wide variety of materials are used as adsorbents in wastewater treatment. Commonly favored adsorbent materials in industrial water remediation are reported as clays [12], activated carbons [13], zeolites [14] and hydrogels [15]. Besides these, researchers are exploring and proposing novel and high performance advanced materials to be considered as adsorbents [16].

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail:nergizkanmaz@gmail.com (N. Kanmaz) Geliş / Received: 06.12.2024 Kabul / Accepted: 20.01.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngumuh.1597274

Novel crystalline organic-inorganic porous hybrid materials designated metal-organic frameworks (MOFs) have garnered a lot of interest because of their high surface area, impressive tunability, and noteworthy adsorption properties [17] for the adsorption of various hazardous chemicals MOFs are involved in the removal of organic pollutants through various adsorption mechanisms such as hydrophobic interactions, π - π bonding, hydrogen bonding, and electrostatic forces [18,19]. Zirconium-based MOFs are characterized by their large surface areas and remarkable chemical stability in both acidic and alkaline environments [20]. The strong interactions between Zr-O clusters and ligands also impart notable robustness to this class of MOFs [20]. Moreover, UiO-66 (Universitetet i Oslo) has effective adsorption ability for various metals [21], antibiotics [1,19] and dye pollutants [22]. Zhao et al. used UiO-66-NH2 modified with guanidino chelating agent as an adsorbent for the removal of methylene blue, copper and lead from the aquatic environment. The surface area of UiO-66-Gd was determined as 574.94 m2 g-1 and it was reported that it removed the studied pollutants by reaching high adsorption capacities [23]. Lan et al. reported that Co-doped UiO-66 synthesized by them reached adsorption capacities of 628.93 mg g-1 and 1106.22 mg g-1 for malachite green and rhodamine B removal, respectively [24].

Inspired by previous research, the adsorption performance of UiO-66 on crystal violet, a cationic and toxic textile dye, should be investigated. In this study, CV was used as a target pollutant to measure the performance of UiO-66 prepared by solvothermal technique in wastewater treatment. The prepared UiO-66 was characterized by FT-IR, XRD, SEM, BET and zeta potential measurement analyses. In physicochemical investigations, CV concentration effect, isotherm model analysis, time effect, kinetic model analysis, pH effect and temperature effect were examined. This paper contributed a beneficial insight of the application of zirconium-based MOF nanoparticles with superior adsorption properties in water treatment.

2 Materials and method

2.1 Materials

Zirconium tetrachloride (ZrCl₄), terephthalic acid (H₂BDC), crystal violet (hexamethylpararosaniline chloride, $C_{25}H_{30}N_3Cl$) were purchased from Sigma Aldrich, HCl (37%), sodium hydroxide (NaOH), N,N-dimethyl formamide (DMF) and ethanol (100%) were obtained from Merck Chemicals.

2.2 UiO-66 synthesis

0.77 g ZrCl₄ and 0.5 g terephthalic acid were weighed into a beaker, 50 mL dimethylformamide (DMF) was added and stirred vigorously with a magnetic stirrer until completely dissolved. After complete dissolution, it is transferred to a Teflon container, placed in a hydrothermal reactor and kept at 220 °C for 24 hours (Figure 1). The solvothermal synthesized UiO-66 was washed with DMF 3 times to remove the unreacted materials and dried in a vacuum oven at 100 °C for 24 hours.



Figure 1. Solvothermal procedure of UiO-66 synthesis.

2.3 Characterization techniques

The surface morphology of zirconium-based MOF was obtained from scanning electron microscopy (SEM, Carl Zeiss 300VP). The functional groups of the sample were carried out by Fourier Transform-Infrared Spectroscopy (FT-IR, Perkin Elmer Spectrum 100) in the range of 4000-500 cm-1 wavenumber. X-Ray diffractometer (PANalytical X-Pert3 Powder) was utilized to determine crystalline structures. Micromeritics Gemini VII analyzer was utilized to determine the BET specific surface area of sample. Zeta potential measurements (Malvern Nano ZS) were obtained from different pH-adjusted suspensions.

2.4 Batch studies

The effect of solution pH was evaluated by adjusting of 10 mL 15 mg L⁻¹ CV solutions between pH 2-10. Kinetic studies were performed for 5-90 min with 5 mg UiO-66 and 10 mL 15 mg L⁻¹. In the adsorption isotherm studies, 10 mL of CV solutions at concentrations of 15-300 mg L⁻¹ (pH is around 5.2-5.7) were added onto the adsorbents, and the suspensions were shaken in a rotator for 24 hours at 15 rpm. The mixture was filtered with a syringe with a pore diameter of 0.45 μ m and absorbance values were measured at 590 nm via UV-Vis Spectrophotometer. То explore the thermodynamic parameters of the adsorption process, the suspensions were shaken at 308-318 K in a water bath. In reusability experiments, after each adsorption cycle, the adsorbents were collected and washed, then regenerated by shaking with 5 mL of ethanol for 30 min. The adsorption capacity and adsorption ratio were calculated as in Equations 1 and 2.

$$q_e = \frac{(C_o - C_e) \times V}{m} \tag{1}$$

Adsorption (%) =
$$\frac{(C_o - C_e)}{C_o} x100$$
 (2)

Where q_e , C_o , Ce, V and m represent the adsorption capacity of CV at equilibrium (mg g⁻¹), initial CV concentration, CV concentration in equilibrium (mg L⁻¹), the volume of CV solution (L) and the UiO-66 mass (g), respectively.

3 Results and discussion

3.1 Characterization

FT-IR analysis was carried out to determine the functional groups in UiO-66 and the spectrum was provided

in Figure 1. Horti et al. reported that they obtained a sharp peak around 500 cm⁻¹ corresponding to the stretching vibration of Zr-O [25]. The peak in this region in the spectrum can be attributed to inorganic structures arising from zirconium. The broad absorption band originating from both symmetric stretching of terephthalic acid and O-C-O asymmetry was noticed at 1400 cm⁻¹ and 1537 cm⁻¹, respectively [26]. The peak at 1690 cm⁻¹ is attributed to the N-H stretching absorption due to dimethylformamide which could not be rinsed from the adsorbent surface [27]. The peaks obtained in the range of 3500-4000 cm⁻¹ indicate the presence of -OH and -NH₂ vibrations [28,29].



Figure 2. FT-IR spectrum of UiO-66 nanoparticle

To evaluate the crystallinity and phase purity of UiO-66, X-ray diffraction (XRD) analysis was performed as shown in Figure3. UiO-66 exhibits dominant peaks at 2θ =15.98°, 17.53°, 26.25°, 28.12°, 39.77° [30]. Based on the XRD pattern, the peaks obtained confirm the cubic crystal structure of UiO-66 [31]. The resulting diffractogram shows a pure and perfectly crystallized UiO-66 structure [32]. The intensity and sharpness of the peaks indicate that the synthesis was successful and that characteristic crystalline phases are located. Finally, it is clearly seen that no amorphous structure or other phase was formed during the synthesis step.



Figure 3. XRD pattern of UiO-66 sorbent

SEM analysis was performed to characterize the surface morphology and grain structure of the UiO-66 nanoparticles. Figure4 reveals that the UiO-66 particles were composed of cube-shaped nanocrystals resembling uniform spherical structures. It was clearly observed that no agglomeration occurs, the particles are independent of each other. It was found that the tiny particles were obtained in the range of 96.81 nm-103.24 nm. These results support that UiO-66 MOF was successfully synthesized by solvothermal technique. Chen et al. reported that UiO-66 consisted of cube-shaped crystals in the solvothermal synthesis carried out at 120 °C for 24 h. Moreover, it is seen from the SEM images that they obtained particles above 100 nm [33]. In this respect, it is concluded that temperature and reaction time significantly affect the particle structure of the obtained product in solvothermal synthesis. Han et al. reported that the particle size and structural morphology of UiO-66 can be controlled by utilizing hydrogen fluoride (HF). The particles obtained were between 150 nm and 7 μm in the HF-added system. They also reported that by adjusting the concentration of ZrCl₄ and H₂BDC, the structural morphology of MOF turned from a truncated cube to a cuboctahedron [31]. According to the results in the literature, it can be deduced that MOF structures are controllable, tunable and can be obtained in the desired crystal structure.



Figure 4. SEM images of UiO-66 (Magnification rates: x30000(left) and x50000(right))



Figure 5. (a) Solution pH effects on CV adsorption and (b) isoelectric point of UiO-66

The large surface area of adsorbent materials is favorable for the interaction of adsorbate molecules with enough active sites. According to the BET analysis, the specific surface area of the synthesized UiO-66 was found as 1107 m² g⁻¹. UiO-66 specific surface areas measured in various reports in the literature can be listed as follows; 1204 m² g⁻¹ [1], 666.5 m² g⁻¹ [34], 485.9 m² g⁻¹ [35], 274.2 m² g⁻¹ [36], 1198 m² g⁻¹ [29], 854 m² g⁻¹ [37]. As the prepared UiO-66 particles are nanoscale and have a large surface area, it supports them to be used in adsorption processes and to exhibit superior adsorption performance.

3.2 pH effect

The removal efficiency of the adsorbent is highly dependent on the ambient pH when the surface charge changes. The CV adsorption performance of UiO-66 nanoparticles was investigated at pH values in the range 2.82-10.27. The results were presented in Figure 5 (a). To adjust the pH of the CV solutions, 0.1 M NaOH or HCl solution was added. When the CV pH ranged from 2.82 to 4.76, a sharp increase in the adsorption rate of UiO-66 was obtained. The excess of H⁺ ions in the solution decreased CV adsorption at low pHs. The zeta potential measurement results of the UiO-66 sorbent are presented in Figure 5 (b) and the isoelectric point (IEP) was found as 4.23. The sorbent surface was positively charged at pHs below the IEP and negatively charged at pHs above the IEP. In the experimental results, CV removal was extremely low at pH values below 4.23. At pH 2.82, 10.41% and at pH 3.73, 51.96% were achieved. However, when the pH was increased to 4.76, the CV removal reached 91.68%, therefore, it can be assumed that a significant electrostatic repulsion occurs as both the adsorbent surface and the components in the solution phase are positively charged. At pH 7.38, there were no H⁺ ions in the solution phase and the removal percentage of cationic CV dye was 93.85%. The increase in the adsorption ratio from 91.68% to 93.85% at neutral pH proves the competitive adsorption of H⁺ and cationic CV dye on the adsorbent surface in the acidic region. After pH 7.38, CV removal maintained a nearly constant. H⁺ ion concentrations dropped as pH rose, but OH- ion concentrations rose. All of the carboxylic groups on the adsorbent underwent a

deprotonation process, which resulted in the binding sites of UiO-66 becoming negatively charged [38]. This is most likely what caused the increased adsorption capacity in basic pH dye solutions. As a result, the cationic CV molecules and the polyanionic adsorbent had robust and efficient electrostatic interactions. Furthermore, a high CV adsorption percentage results from the mutual repulsion of OH⁻ ions and anionic functions [39].

3.3 Adsorption kinetics

Experiments were conducted at various times to establish the minimum necessary adsorption time and to accomplish an economical and effective adsorption process. The interactions between the adsorbent and the adsorbate molecules in the solution were also examined, and the model equations were applied to the data that had been gathered. Experimental data were evaluated using pseudo-first-order (PFO), pseudo-second-order (PSO), Elovich and intraparticle diffusion (IPD) model equations (available in Equation (S4-7) in the supporting information file).

Figure 6 shows the fitting curves of the kinetic models to the experimental results. In the experiments performed between 5-90 min, it was observed that equilibrium was reached after 30 min and CV adsorption capacity did not increase between 30-90 min. At the end of 30 min, q_t value was 28.38 mg g⁻¹, while at the end of 90 min q_t values were calculated to be around 28.63 mg g⁻¹. In Figure 4, the curve that follows the experimental points most closely belongs to the PSO model.



Figure 6. The fitting curves of kinetic models

Table 1 lists the kinetic model parameters, correlation (R²) and chi-square (χ^2) coefficients. When R² and χ^2 values were compared, it was concluded that the PSO model was the best fitting model. The PSO model suggests that chemical interactions are dominant during adsorption processes. The q_e value calculated from the PFO model was found to be 28.10 mg g⁻¹, which is below the experimentally available adsorption capacity, while the q_e value calculated from the PSO model was found to be 29.78 mg g⁻¹. The α value was found to be 10⁴ times greater than the β value, which proves the high affinity of the CV molecules to the UiO-66 surface and the rapidity of the adsorption process.

Table 1	I. Kinetic	model	coefficients	of	UiO-66.
---------	------------	-------	--------------	----	---------

Models	Coefficients	Value
PFO	k_1 (L min ⁻¹)	0.24
	qe (mg g^{-1})	28.10
	\mathbb{R}^2	0.92
	χ^2	0.81
PSO	k_2 (g (mg min) ⁻¹)	0.01
	$q_e (mg g^{-1})$	29.78
	\mathbf{R}^2	0.98
	χ^2	0.21
Elovich	α (g (mg min) ⁻¹)	2.41×10^3
	$\beta (mg g^{-1})$	0.38
	\mathbf{R}^2	0.79
	χ^2	2.07
IPD	ki (g mg ⁻¹ min ^{-1/2})	0.93
	C	21.24
	\mathbb{R}^2	0.60
	χ^2	4.11

3.4 Adsorption isotherm

10 mL of a 15-300 mg L⁻¹ CV solution and 5 mg of adsorbent were used in isotherm experiments. The amount of CV adsorbed on UiO-66 as a function of CV equilibrium concentration is displayed in Figure 7. The experimental equilibrium results were subjected to the Langmuir, Freundlich, Temkin, and Dubinin-Radushkevich models, which are shown in Equation (S1-3). Although the Freundlich approach proposes that adsorption takes place in multilayer and non-equivalent energy adsorption sites, the Langmuir model hypothesizes that a monolayer adsorption consists on the sorbent in adsorption sites of equal energy. According to the Temkin model, when adsorbate molecules bind to the surface, the adsorption heat falls off linearly. The Dubinin-Radushkevich model is employed to show that adsorption on a heterogeneous sorbent surface takes place via a Gaussian energy dispersion mechanism.

The isotherm model parameters and compatibility coefficients are listed in Table 2. The calculated maximum monolayer adsorption capacity of CV on UiO-66 is calculated as 998.18 mg g⁻¹. The "1/n" Freundlich parameter ranges from 0 to 1, indicating that CV adsorption is favorable. The Dubinin Radushkevich isotherm model accurately describes UiO-66 based on correlation (R²) and chi square (χ^2) coefficients. The calculated energy (E) was pointed out that the separation process has dominant physical interactions. The analyzed results also demonstrated that UiO-66 is an effective adsorbent for organic dye adsorption.



Figure 7. CV adsorption isotherm model fitting curves

 Table 2. CV adsorption isotherm parameters.

Models	Coefficients	Value
	q _{max} (mg g ⁻¹)	998.18
Lonomuin Loothorm	$K_L(L m g^{-1})$	5.3x10 ⁻³
Langmun Isomerni	\mathbb{R}^2	0.95
	χ^2	978.76
	$K_{\rm F}({\rm L}~{\rm g}^{-1})$	11.20
Freundlich	n	0.74
Isotherm	\mathbb{R}^2	0.93
	χ^2	1.2×10^{3}
	$K_T(L mol^{-1})$	1.18
Tombin Lothows	b _T (J mol ⁻¹)	40.93
Temkin Isotherm	\mathbb{R}^2	0.63
	χ^2	6.8x10 ³
	$q_{max}(mg g^{-1})$	403.32
Dubinin-	E (J mol ⁻¹)	26.37
Radushkevich	$\beta (mol^2 J^2)$	1.4×10^{3}
Isotherm	\mathbb{R}^2	0.98
	χ^2	418.67

3.5 Adsorption thermodynamic

The system temperature affects the adsorption processes obviously. Accordingly, the temperature effect on CV adsorption was investigated in the range of 308- 328 K. The thermodynamic parameters were calculated by using Eqs. (S9-12) and listed in Table 3. A decrease in K_d values was observed with increasing temperature and this was due to the increase in the amount of CV remaining in the solution when the temperature of the adsorption system increased. Negative ΔG° values are indicated to spontaneous nature of CV removal. Additionally, the negative ΔH° value means that CV adsorption is an exothermic character, furthermore ΔS° gives insight into the irregularity of adsorbate-adsorbent interactions. Sadoq et al. reported that they obtained a spontaneous and exothermic process in CV adsorption with raw chitin [40].

Table 3. Thermodynamic parameters of UiO-66.

T(K)	K_{d}	$\Delta G^{\circ} (kJ mol^{-1})$	ΔH^{o} (kJ mol ⁻	$\Delta S^{\circ} (J \pmod{K})^{-1}$
308	20.23	-7.70		
318	10.18	-6.13	-46.30	-128.92
328	6.57	-5.13		

3.6 Reusability

The length of the useful life of adsorbent materials is of great importance from an economic perspective. In this framework, adsorption/desorption studies were carried out to analyze how many batches of UiO-66 could be used. 5 mg adsorbent was shaken with 10 mL of 15 mg L⁻¹ CV solution for 30 min, collected at the end of the time, washed with distilled water and regenerated by shaking with 5 mL ethanol for 30 min and then applied to adsorption with CV again. The results are shown in Figure 8 with spent UiO-66 sorbent. While CV removal was 94.83% in the first cycle, it decreased to 80.04% at the end of the fifth cycle. After the first adsorption process, the recovered CV amount was 81.23%, whereas only 33.27% of CV could be desorbed after the last batch. It is clearly seen that relatively high removal rate can be achieved even at the end of the fifth cycle. Nevertheless, the present rate of decrease can be attributed to the fact that some CV molecules are not perfectly desorbed from the surface and various bonds are affected by chemical interactions (pseudo-second order compatibility) and break down. It can provide higher desorption efficiencies by using solvent mixtures instead of a single solvent.





(b)

Figure 8. (a) Reusability of UiO-66 and (b) spent UiO-66 sorbent.

In addition, operating desorption for longer periods of time or applying different temperatures can improve

desorption performance. On the other hand, SEM analysis was performed to examine whether there were morphological changes on the surface of the adsorbent particles after five cycles (Figure 8(b)). The fact that the surface does not change clearly before and after the adsorption/desorption cycles shows that UiO-66 is robust against dye molecules and organic solvent.

3.7 Comparison with other studies

Adsorbents from different classes were compared with their maximum CV adsorption capacities and surface areas and the results are presented in Table 4. CV adsorption capacities were obtained as 77.66 mg g⁻¹ for chitosan and ionic liquid doped sulfonated PEEK (Ch-IL@SPEEK), 84.7 mg g⁻¹ for titania nanoparticle doped carbon spheres (TNTs@Cs) and 469.55 mg g⁻¹ for activated carbon obtained from Moroccan Moringa oleifera biomass (MMO-AC). When an evaluation is made for nanoparticle and/or metalorganic lattice adsorbents, it is clearly seen that MOF systems multiply the adsorption potential. It was reported that there were 109.23 mg g⁻¹ for green tea nanoparticles (GTNP), 6750.58 mg g⁻¹ for Ti-MOF-doped biomass (CMC/MIL-125@CS) and 827.54 mg g⁻¹ for ZIF-8-doped lignosulfonate/diethylenetriaminepentaacetic acid (SLS/DTPA@ZIF-8). In this study, 998.18 mg g⁻¹ CV adsorption capacity of UiO-66 nanoparticles with 1107 m² g⁻ ¹ surface area is excellent compared to other adsorbents with longer and stepwise production processes in the literature. Although it is not an inexpensive material, UiO-66, which has a shorter operating process (30 min) and higher adsorption capacity, carries a preferable profile in terms of its superior performance and the possibility of reuse.

T 1 1 4	OT I	1	. •	• .	•
Table 4.	CV.	adsori	otion	capacity	comparison

Adsorbent	$S_{BET} (m^2 g^{-1})$	$q_{max} (mg g^{-1})$	References
Ch-IL@SPEEK	-	77.66	[15]
TNTs@Cs	79.042	84.7	[41]
MMO-AC	1394.89	469.55	[42]
GTNP	15.925	109.23	[43]
CMC/MIL-125@CS	4.962	6750.58	[17]
SLS/DTPA@ZIF-8	-	827.54	[45]
UiO-66	1107	998.18	This study

4 Conclusion

In summary, solvothermally synthesized UiO-66 nanoparticles were employed as an adsorbent for CV removal. FT-IR, XRD, SEM, BET, and zeta potential measurements were conducted, whereas the structure of the prepared MOF was investigated. The equilibrium time of CV adsorption was determined to be 30 min, and the adsorption processes were confirmed to be consistent with the PSO kinetic model. In the isotherm analysis, the CV adsorption model was found to be compatible with the Dubinin-Raduskevich isotherm, and the maximum monolayer adsorption capacity calculated using the Langmuir model was 998.18 mg g⁻¹. CV adsorption was found to be low at acidic pH, and surface charge proved to be the major adsorption mechanism. By examining the influence of temperature, it was discovered that the CV adsorption

process was exothermic and spontaneous. The findings showed that zirconium-based MOFs are nanoparticles with a high adsorption capacity and the ability to rapidly achieve the equilibrium of CV dye. Future research could focus on increasing the reusability of UiO-66 nanoparticles by exploring different regeneration techniques to improve desorption efficiency. Furthermore, performance studies on real wastewater samples will further demonstrate its practical applicability in environmental remediation.

Acknowledgment

The author is grateful to Sally Kareem Abdulrazzaq and Hülya Sena Erdinç for their kind supports.

Conflict of interest

The author reported no possible conflicts of interest.

Similarity rate (iThenticate): 17%

References

- [1] Y. Zhang, Q. Ruan, Y. Peng, G. Han, H. Huang, C. Zhong, Synthesis of hierarchical-pore metal-organic framework on liter scale for large organic pollutants capture in wastewater, J. Colloid Interface Sci. 525, 39–47, 2018. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.04.063.
- G. Crini, Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal : A review, Bioresour. Technol. 97, 1061– 1085, 2006. https://doi.org/10.1016/j.biortech. 2005.05.001.
- [3] D. Iqbal, R. Ullah, M. Ilyas, R. Zhao, X. Ning, Fabrication and adsorption characteristics of cuprammonium cellulose-based membranes for removing anionic and cationic dyes, Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp. 705, 135692, 2005. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.135692.
- [4] A. Naifar, M. Bouzid, Physics statistical analysis of crystal violet adsorption onto activated bamboo fiber powder : Insights from thermodynamic functions, Mater. Chem. Phys. 329, 130110, 2025. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.130110.
- [5] G. Tang, H. Mo, L. Gao, Y. Chen, X. Zhou, Adsorption of crystal violet from wastewater using alkalinemodified pomelo peel-derived biochar, J. Water Process Eng. 68, 106334, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106334.
- [6] N. Kanmaz, M. Buğdaycı, Promoting photo-fenton catalytic performance of novel NiZrO3-type perovskite: Optimization with response surface methodology, J. Mol. Struct. 1295, 2024. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2023.136718.
- [7] M. Wasim, A. Sabir, M. Shafiq, R.U. Khan, Mussel inspired surface functionalization of polyamide membranes for the removal and adsorption of crystal violet dye, Dye. Pigment. 206, 110606, 2022. https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2022.110606.
- [8] N. Kanmaz, M. Buğdaycı, P. Demircivi, Exploring photocatalytic tetracycline removal performance under simulated sunlight irradiation : Milling time effect on metallic reduction of MnO / ZrO 2 mixed oxide, Ceram. Int. 50, 44598–44608, 2024. https://doi.org/10.1016/j. ceramint.2024.08.308.

- [9] Ö. Tuna, E. Bilgin Simsek, Promoted peroxymonosulfate activation into ferrite sites over perovskite for sunset yellow degradation: Optimization parameters by response surface methodology, Opt. Mater. 142, 2023. https://doi.org/10.1016/j. optmat.2023.114122.
- [10] M. Zahmatkesh, S. Nourbakhsh, A. Toolabi, Z. Bonyadi, Biodegradation of crystal violet dye by Saccharomyces cerevisiae in aqueous medium, Heliyon. 9, e19460, 2023. https://doi.org/10.1016/j. heliyon.2023.e19460.
- [11] F. Atmani, M. Mehdi, I. Akkari, N. Yeddou-mezenner, Adsorption ability of sugar scum as industrial waste for crystal violet elimination : Experimental and advanced statistical physics modeling, Surfaces and Interfaces. 54, 105166, 2024. https://doi.org/10.1016/j.surfin. 2024.105166.
- [12] N. Kanmaz, P. Demircivi, Superstable cellulosesupported clay-based methylene blue hybrid pigment encapsulated with porous TiO2: Processing by adsorption strategy, Dye. Pigment. 220, 111764, 2023. https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2023.111764.
- [13] Ş. Karadirek, H. Okkay, Statistical modeling of activated carbon production from spent mushroom compost, J. Ind. Eng. Chem. 63, 340–347, 2018. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.02.034.
- [14] N. Kanmaz, M. Buğdaycı, P. Demirçivi, Investigation on structural and adsorptive features of BaO modified zeolite powders prepared by ball milling technique: Removal of tetracycline and various organic contaminants, Microporous Mesoporous Mater. 354, 2023.https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2023.11256 6.
- [15] M. Yılmazoğlu, N. Kanmaz, P. Demircivi, Constructing the synergistic effects of chitosan and ionic liquid on SPEEK polymer for efficient adsorption of crystal violet dye, Int. J. Biol. Macromol. 271, 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132638.
- [16] B. Yardımcı, N. Kanmaz, M. Buğdaycı, P. Demircivi, Synthesis of CuBDC metal-organic framework supported zinc oxide via ball-milling technique for enhanced adsorption of Orange-II, Surfaces and Interfaces. 46, 2024. https://doi.org/10.1016/j.surfin. 2024.104122.
- [17] N. Kanmaz, B. Yardimci, P. Demircivi, In situ synthesis of MIL-125 on cinnamon stick and improved via carboxymethyl cellulose : A sustainable approach for super-high crystal violet adsorption, J. Colloid Interface Sci. 678, 366–377, 2025. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2024.09.035.
- [18] J. Canivet, A. Fateeva, Y. Guo, B. Coasne, D. Farrusseng, Water adsorption in MOFs: fundamentals and applications, Chem. Soc. Rev. 43, 5594–5617, 2014. https://doi.org/10.1039/c4cs00078a.
- [19] N. Kanmaz, P. Demircivi, Adsorption of tetracycline using one-pot synthesis zirconium metal-organic framework (UiO-66) decorated hydroxyapatite, J. Mol. Liq. 397, 124171, 2024. https://doi.org/10.1016/ j.molliq.2024.124171.

- [20] C. Zhang, L. Ma, X. Xi, Z. Nie, Separation of molybdenum and tungsten using selective adsorption with zirconium based metal organic framework, J. Taiwan Inst. Chem. Eng. 165, 105802, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105802.
- [21] C. Zhang, L. Ma, X. Xi, Z. Nie, Adsorption and separation performance of tungsten and molybdenum on modified zirconium based metal organic frameworks UiO-66-CTAB, J. Environ. Chem. Eng. 12, 113401, 2024. https://doi.org/10. 1016/j.jece.2024.113401.
- [22] A. Assafi, Y. Aoulad, E. Hadj, R.S. Almufarij, L. Hejji, N. Raza, P. Luis, B. Souhail, Ultrasound-assisted adsorption of organic dyes in real water samples using zirconium(IV) -based metal-organic frameworks UiO-66-NH2 as an adsorbent, Heliyon. 9, 1–18, 2023. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22001.
- [23] H. Zhao, X. Huang, D. Jiang, P. Ren, R. Wang, Z. Liu, G. Li, S. Pu, Post-synthetic modification of zirconiumbased metal-organic frameworks for enhanced simultaneous adsorption of heavy metal ions and organic dyes, J. Solid State Chem. 339 (2024) 124987. https://doi.org/10.1016/j.jssc.2024.124987.
- [24] D. Lan, H. Zhu, J. Zhang, F. Wang, Y. Zheng, One step synthesis of a novel Co-doped UiO-66 adsorbent for superior adsorption of organic dyes from wastewater, Process Saf. Environ. Prot. 188, 1058–1068, 2024. https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.05.122.
- [25] N.C. Horti, M.D. Kamatagi, S.K. Nataraj, M.N. Wari, S.R. Inamdar, Structural and optical properties of zirconium oxide (ZrO2) nanoparticles: effect of calcination temperature, Nano Express. 1, 010022, 2020. https://doi.org/10.1088/2632-959X/ab8684.
- [26] H. Dadashi, R. Halladj, A. Karimi, K. Sharifi, Enhancing oxidative desulfurization catalytic performance of metal – organic frameworks UiO-66 (Zr) by post-synthetic with the creation of active sites, Inorg. Chem. Commun. 170, 113340, 2024. https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113340.
- [27] X. Fang, S. Wu, Y. Wu, W. Yang, Y. Li, J. He, P. Hong, High-efficiency adsorption of norfloxacin using octahedral UiO-66-NH2 nanomaterials : Dynamics , thermodynamics , and mechanisms, Appl. Surf. Sci. 518, 146226, 2021. https://doi.org/10.1016/j. apsusc.2020.146226.
- [28] R. Heu, M.A. Ibrahim, U. States, E. Protection, C. Yoshimura, Photocatalytic nanofiltration membrane using Zr-MOF/GO nanocomposite photocatalytic nanofiltration membrane using Zr-MOF/GO nanocomposite with high-flux and anti-fouling properties, Catalysts. 10, 2020. https://doi.org/10.3390/catal10060711.
- [29] Y.L. Wang, S. Zhang, Y.F. Zhao, J. Bedia, J.J. Rodriguez, C. Belver, UiO-66-based metal organic frameworks for the photodegradation of acetaminophen under simulated solar irradiation, J. Environ. Chem. Eng. 9, 106087, 2023. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106087.
- [30] A. Naeem, T. Saeed, M. Sayed, B. Ahmad, T.

Mahmood, M. Farooq, F. Perveen, Chitosan decorated zirconium metal-organic framework for collaborative adsorption and photocatalytic degradation of methylene blue and methyl orange, Process Saf. Environ. Prot. 176, 115–130, 2023. https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.06.012.

- [31] Y. Han, M. Liu, K. Li, Y. Zuo, Y. Wei, S. Xu, G. Zhang, C. Song, Z. Zhang, X. Guo, Facile synthesis of morphology and size-controlled zirconium metal– organic framework UiO-66: the role of hydrofluoric acid in crystallization, CrystEngComm. 17, 6434– 6440, 2015. https://doi.org/10.1039/C5CE00729A.
- [32] A. Farid, H. Nageh, T.S. Soliman, A. Khalid, N.M. M., M. Taha, Explore the physical properties of the synthesized UiO-66, Zn-BiOBr, and Zn-BiOBr/UiO-66 heterostructures for optical applications, J. Alloys Compd. 1010, 177467, 2025. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.177467.
- [33] C. Chen, D. Chen, S. Xie, H. Quan, X. Luo, L. Guo, Adsorption behaviors of organic micropollutants on zirconium metal-organic framework UiO-66 : Analysis of surface interactions, ACS Appl. Mater. Interfaces. 9, 41043–41054, 2017. https://doi.org/10.1021/acsami.7b13443.
- [34] A. Zhang, B. Liu, M. Liu, Z. Xie, D. Wang, G. Feng, The adsorption properties of defect controlled metalorganic frameworks of UiO-66, Sep. Purif. Technol. 270, 118842, 2011. https://doi.org/10.1016/j. seppur.2021.118842.
- [35] X. He, F. Deng, T. Shen, L. Yang, D. Chen, J. Luo, X. Luo, X. Min, F. Wang, Exceptional adsorption of arsenic by zirconium metal-organic frameworks: Engineering exploration and mechanism insight, J. Colloid Interface Sci. 539, 223–234, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.12.065.
- [36] S. Zhuang, C. Rong, J. Wang, Adsorption of diclofenac from aqueous solution using UiO-66-type metalorganic frameworks, Chem. Eng. J., 2018. https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.150.
- [37] J. Yu, X. Wang, Y. Wang, X. Xie, H. Xie, N. Vorayos, J. Sun, Heating-induced adsorption promoting the efficient removal of toluene by the metal-organic framework UiO-66 (Zr) under visible light, J. Colloid Interface Sci. 653, 1478–1487, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.09.164.
- [38] Q. Tan, X. Jia, R. Dai, H. Chang, M. Wai, H. Chen, Synthesis of a novel magnetically recyclable starchbased adsorbent for efficient adsorption of crystal violet dye, Sep. Purif. Technol. 320, 124157, 2023. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124157.
- [39] A. Rahmatpour, B. Shoghinia, A.H. Alizadeh, A selfassembling hydrogel nanocomposite based on xanthan gum modified with SiO2 NPs and HPAM for improved adsorption of crystal violet cationic dye from aqueous solution, Carbohydr. Polym. 330, 121819, 2024. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.121819.
- [40] M. Sadoq, H. Atlas, S. Imame, A. Kali, A. Amar, I. Loulidi, M. Jabri, B. Sadoq, M. Ouchabi, P. Sannasi, F. Boukhlifi, Elimination of crystal violet from aqueous

solution by adsorption on naturel polysaccharide: Kinetic, isotherm, thermodynamic studies and mechanism analysis, Arab. J. Chem. 17, 105453, 2024. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.105453.

- [41] A.M.E. Mohammed, A. Kotb, M.M.S. Sanad, M. Abdel-Hakim, A.S.A. Ahmed, Enhanced adsorption of carbon sphere by doping with titania nanotubes for crystal violet removal: isotherm, kinetics, and thermodynamic studies, RSC Adv. 14, 31332–31347, 2024. https://doi.org/10.1039/d4ra04889j.
- [42] Y. Raji, A. Nadi, I. Mechnou, M. Saadouni, O. Cherkaoui, S. Zyade, High adsorption capacities of crystal violet dye by low-cost activated carbon prepared from Moroccan Moringa oleifera wastes: Characterization, adsorption and mechanism study,

Diam. Relat. Mater. 135, 109834, 2023. https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.109834.

- [43] B. Yardımcı, N. Kanmaz, Ecosafe-design of carboxymethyl cellulose encapsulated polyphenolic bio-nanocomposite valorized for sustainable industrial textile dye removal, J. Environ. Chem. Eng., 115321, 2025. https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.115321.
- [44] L. Yang, L. Bao, Y. Zhong, C. Hao, J. Chen, J. Wu, X. Wang, Fa[brication of in situ metal-organic framework grown on sodium lignosulphonate hydrogel for removal of Pb2+, methylene blue and crystal violet from aqueous solution, J. Clean. Prod. 434, 139831, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139831.



NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 482-489



Niğde Ömer Halisdemir Üni**ver**sitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araștırma makalesi / Research article

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



Si₃N₄ katkılı Al7075 matrisli kompozitlerin mikroyapısının ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi

Investigation of microstructure and tribological properties of Si₃N₄ reinforced Al7075 matrix composites

Aleyna Taşkın¹ (¹), Elif Işık² (¹), Mahmut Can Şenel^{3*} (¹)

^{1.3} Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 55020, Samsun Türkiye
² Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 58010, Sivas, Türkiye

Öz

Yapılan bu çalışmada toz metalürjisi ve sıcak presleme yöntemleriyle Al7075 matrise ağırlıkça %1, 3, 6, 9 ve 12 katkı oranlarında Si $_3N_4$ ilave edilerek kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretilen kompozitlere yoğunluk, Vickers sertliği, aşınma ve sürtünme testleri uygulanmıştır. Ayrıca kompozitlerin mikroyapılarını incelemek amacıyla XRD, SEM ve SEM-EDX analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak en yüksek deneysel yoğunluk (2.65 g/cm³), en yüksek Vickers sertliği (205 HV), en düşük aşınma oranı (0.00018 mm³/(Nm)), en düşük kütle kaybı (0.0025 g) ve en düşük sürtünme katsayısı (0.38) değerleri Al7075-%9 Si₃N₄ kompozitte elde edilmiştir. Ancak ağırlıkça %12 Si₃N₄ katkı oranında takviye partiküllerinin topaklanmasından dolayı kompozitin tribolojik özellikleri kötüleşmiştir. Sonuç olarak Al7075 matrise %9 Si₃N₄ katkısının kompozitin tribolojik özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmistir.

Anahtar kelimeler: Al7075 alaşımı, Si₃N₄, Kompozit, Toz Metalürjisi

1 Giriş

Uçak ve uzay sanayi başta olmak üzere ticari uygulamalarda hafif ve yüksek dayanımlı malzemelere olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Bu ihtiyaç doğrultusunda kompozit malzemeler üretilmeye başlanmıştır. Kompozitler, daha iyi özelliklere sahip yeni malzeme elde etmek amacıyla farklı malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşmaktadır. Kompozit malzemeler; metal matrisli kompozitler (MMK), seramik matrisli kompozitler (SMK) ve polimer matrisli kompozitler (PMK) olmak üzere temelde üç gruba ayrılmaktadır. MMK matris malzemesi metal veya metal alaşımı olan kompozitlerdir. 1970'lerden beri uygulamalarda kullanılan MMK yapılar düşük yoğunluk, yüksek dayanım ve gelişmiş tribolojik özellikleri ile dikkat çekmektedir. İnşaat, denizcilik, otomotiv, elektrik-elektronik, uçak ve uzay sanayinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [1], [2]. MMK yapılarda matris malzemesi olarak genellikle alüminyum (Al), titanyum (Ti), magnezyum (Mg) ve alaşımları tercih edilmektedir. Alüminyum ve alaşımları hafif olmaları, kolay şekillendirilebilmeleri, yüksek korozyon direnci ve düşük yoğunluğa sahip olmaları gibi

Abstract

In this study, composite materials were fabricated by Si₃N₄ reinforcement (1, 3, 6, 9, and 12wt.%) to the Al7075 matrix using the powder metallurgy and hot-pressing methods. Density, Vickers hardness, wear, and friction tests were applied to the fabricated composites. In addition, XRD, SEM, and SEM-EDX analyses were performed to examine the microstructures of the composites. As a result, the highest experimental density (2.65 g/cm³), the highest Vickers hardness (205 HV), the lowest wear rate (0.00018 mm3/(Nm)), the lowest mass loss (0.0025 g), and the lowest friction coefficient (0.38) values were obtained in the Al7075-9% Si₃N₄ composite. However, the tribological properties of the composite deteriorated due to the agglomeration of the reinforcement particles at the 12wt.% Si₃N₄ content. As a result, it was determined that 9% Si₃N₄ addition to the Al7075 matrix improved the tribological properties of the composite.

Keywords: Al7075 alloy, Si₃N₄, Composite, Powder Metallurgy

nedenlerden dolayı metal matrisli kompozitlerde sıklıkla matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Geliştirilmiş şekillendirme yöntemleri, düşük üretim maliyeti ve gelişmiş tribolojik özellikleri alüminyum matrisli kompozitlere olan ilgiyi artırmıştır [3]. Alüminyum alaşımları arasında 7075 serisi yüksek ağırlık/yoğunluk oranı, yüksek mukavemeti ve yüksek ağınıma dayanımından dolayı dikkat çekmektedir. Bu özelliklerinden dolayı Al7075 alaşımı; uçakların gövde ve kanatlarında, otomobillerde, spor malzemelerinde ve denizcilik sektöründe yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [4].

Al7075 matrisli kompozitlerde; dayanımın, sertliğin ve aşınma direncinin artması takviye elemanının özelliklerine bağlıdır. Silisyum nitrür (Si₃N₄), bor karbür (B₄C), alümina (Al₂O₃) ve zirkonya (ZrO₂) seramik malzemeleri Al7075 matris için sıklıkla tercih edilen takviye elemanlarıdır. Özellikle Si₃N₄; yüksek sertliği, yüksek aşınma direnci ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi özellikleri ile dikkat çekmektedir [5].

Kullanım alanı oldukça geniş olan kompozit malzemeler farklı yöntemler (karıştırmalı döküm, sıvı infiltrasyon, toz

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mahmutcan.senel@omu.edu.tr (M. C. Şenel) Geliş / Received: 11.10.2024 Kabul / Accepted: 22.01.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngumuh.1559381

metalürjisi, ekstrüzyon vb.) ile üretilebilmektedir. Bu yöntemler arasından toz metalürjisi (TM); yüksek yüzey kalitesinde, yüksek mukavemetli ve karmaşık yapılı parça üretimi gibi avantajlara sahiptir. Toz metalürjisi yönteminde toz halindeki malzemeler karıştırılarak uygun basınç altında şekillendirme amacıyla sıkıştırılmaktadır. Sıkıştırılan tozlara belirli sıcaklık ve basınç altında sinterleme işlemi uygulanarak dayanım kazandırılır. Sonrasında ikincil işlemler yapılarak yüksek kalitede parça üretimi gerçekleştirilmiş olur [6].

Literatürde Al matrisli Si₃N₄ takviyeli kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelendiği birçok çalışma bulunmaktadır. Mistry ve Gohil tarafından yapılan çalışmada, Al7075 matrisli Si₃N₄ takviyeli kompozitler elektromanyetik karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilmiştir. Al7075 matrise ağırlıkça %4, 8 ve 12 katkı oranlarında Si₃N₄ ilave edilmiştir. Yürütülen testler sonucunda, en yüksek sertlik değeri 203 HV olarak Al7075-%12 Si₃N₄ kompozitte elde edilmiştir. Bunun sebebinin takviye elemanının yapıdaki deformasyonu azaltması olabileceği belirtilmiştir. En yüksek çekme dayanımına (329 MPa) ise Al7075-%8 Si₃N₄ kompozitte ulaşılmıştır. Ancak ağırlıkça %8 katkı oranından sonra takviye partiküllerinin topaklanmasından dolayı çekme dayanımı 312 MPa'a düşmüştür. Kütle kaybının ağırlıkça %4, 8 ve 12 katkı oranlarında sırasıyla %11.6, %24.6 ve %37.2 oranında azaldığı belirtilmiştir [7]. Kumar vd., karıştırmalı döküm yöntemini kullanarak Al6063 alasımına farklı oranlarda (ağırlıkça %2, 4, 6, 8 ve 10) Si₃N₄ takvive ederek kompozit vapılar üretmislerdir. Üretilen kompozitlere mekanik testler uygulanmıştır. Yapılan testler sonucunda en yüksek değerler %10Si₃N₄ katkı oranında elde edilmiştir. Al6063-%10Si₃N₄ kompozitte sertlik, yoğunluk ve çekme dayanımı Al6063 alaşımına kıyasla sırasıyla %86, %1.7 ve %77 oranında artmıştır. Bunun sebebi; Si₃N₄ partiküllerinin yüksek sertliğine, yüksek yoğunluğuna ve matris içerisindeki dağılımına bağlanmıştır. Aşınma test sonuçlarına göre takviye oranının artmasıyla aşınmaya karşı direncin artarak kütle kaybının azaldığı tespit edilmiştir [8]. çalışmalarında karıştırmalı Mohanavel vd. döküm metoduyla Al6351 matrisli Si₃N₄ takviyeli (ağırlıkça %1, 2 ve 3 katkı oranında) kompozitlerin üretimini gerçekleştirmişlerdir. Kompozitlerin mikroyapıları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. SEM, XRD ve EDX analizi sonuçlarına göre Si3N4 takviyesinin matris içerisindeki varlığı doğrulanmış ve katkı malzemelerinin homojen dağıldığı tespit edilmiştir. Yapılan mekanik testlerin sonuçlarına göre en yüksek mikro sertlik (94 HV) ve cekme dayanımı (13 MPa) Al6351-%3 Si₃N₄ kompozit yapıda elde edilmiştir. 15, 25 ve 35 N yüklemede yapılan aşınma testlerinde, en düşük aşınma oranı ağırlıkça %3 Si₃N₄ takviyesinde elde edilmiştir. Sonuç olarak takviye oranının artmasının kompozitin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine olumlu etkisi olduğu belirtilmiştir [9]. Ramu vd. çalışmalarında, karıştırmalı döküm yöntemiyle Al6061 alaşımına farklı oranlarda (ağırlıkça %1, 2, 3 ve 4) Si₃N₄ takviyesi yaparak kompozit üretimi gerçekleştirmişlerdir. Üretilen kompozit yapılara 3 geçişli eş kanallı açısal presleme işlemi (EKAP) uygulayarak mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. En yüksek yoğunluk (2.84

g/cm³) ve sertlik değeri (85 HB) %4 Si₃N₄ katkılı kompozit yapıda EKAP işlemi sonrası elde edilmiştir. EKAP işlemi sonrası boşlukların ve kusurların en aza indirilmesinden dolayı yoğunluk ve sertlik değerlerinin arttığı belirtilmiştir. Yapılan aşınma testlerine göre EKAP işlemi tekrar sayısının ve takviye oranının artmasıyla kompozitlerin aşınma direncinin arttığı tespit edilmistir. Sonuc olarak EKAP isleminin ve artan katkı oranının üretilen kompozitlerin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine olumlu etkisi olduğu belirlenmiştir [10]. Smart vd., Al7075 matrisli TaC (ağırlıkça %0.25, 0.5, 0.75 ve 1 katkı oranlarında), Si₃N₄ (ağırlıkça % 2, 4, 6 ve 8 katkı oranlarında) ve Ti (ağırlıkça %0.5, 1, 1.5 ve 2 katkı oranlarında) takviyeli kompozitleri karıştırmalı döküm yöntemiyle üretmişlerdir. Takviye oranının kompozitlerin mikroyapısı, mekanik özellikleri ve aşınma davranışları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kompozitlerin SEM analizlerine göre, TaC/Si₃N₄/Ti takviyelerinin Al7075 matris içerisinde homojen dağıldığı tespit edilmiştir. Yapılan testler sonucunda, en yüksek yoğunluk (3.09 g/cm3), en yüksek basma dayanımı (394 MPa), en yüksek korozyon direnci ve en düşük aşınma oranı (20 N yüklemede, 3 m/s kayma hızında, 120°C sıcaklıkta) Al7075-1TaC-8Si₃N₄-2Ti kompozit yapıda elde edilmiştir. Sonuç olarak, takviye oranı arttıkça kompozitlerin mekanik özelliklerinde ve aşınma davranışlarında iyileşme olduğu belirtilmiştir [11].

Literatür çalışmaları incelendiğinde, toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme işlemleri kullanılarak üretilen yüksek aşınma dayanımına ve gelişmiş tribolojik özelliklere sahip Al7075-Si₃N₄ kompozitlerin üretimi ile ilgili herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Yapılan bu çalışmada ise, Al7075 matrisli Si₃N₄ takviyeli (ağırlıkça %1, 3, 6, 9 ve 12 katkı oranlarında) kompozit yapılar toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme işlemi ile üretilmiştir. Kompozitlerin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerinde Si₃N₄ katkı oranının ve sıcak presleme işleminin etkisi incelenmiştir. Böylece üretilen kompozitlerin deneysel yoğunluğu, sertliği, kütle kaybı, aşınma oranı ve sürtünme katsayısı belirlenmiştir.

2 Materyal ve metot

2.1 Materyal

Yapılan bu çalışmada matris malzemesi olarak Al7075 alaşımı, takviye elemanı olarak ise Si_3N_4 tozları kullanılmıştır.

Tablo 1. Al7075 alaşımının ve Si_3N_4 'ün belirli özellikleri [12]

Özellik	A17075	Si_3N_4
Sertlik (HV)	68	1450
Yoğunluk (g/cm ³)	2.81	3.17
Elastisite Modülü (GPa)	7.7	310
Ergime Sıcaklığı (°C)	635	1800
Termal İletkenlik (W/(m°K))	167	29

Al7075 alüminyum alaşımı ve Si₃N₄ tozları sırasıyla Nanografi Teknoloji (Türkiye) ve Ube Industry (Japonya) firmasından temin edilmiştir. Al7075 alaşım tozu ~10 µm tanecik boyutuna ve 2.81 g/cm³ teorik yoğunluğa, Si₃N₄ tozu ise 0.8 µm partikül boyutuna ve 3.25 g/cm³ teorik yoğunluğa sahiptir. Al7075 alaşımının ve Si₃N₄'ün belirli özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

2.2 Yöntem

Yapılan bu çalışmada, Al7075-Si $_3N_4$ kompozitleri toz metalürjisi ve sıcak presleme yöntemleriyle üretilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. A17075-Si $_3N_4$ kompozit malzemelerin üretim aşamaları

Al7075 alaşım tozu manyetik karıştırıcıda etanol içinde karıştırılmış (400 dev/dk hızda, 20 dk süresince) ve eş zamanlı olarak Si₃N₄ tozu yüksek enerjili bilyeli değirmende paslanmaz çelik hazne içerisinde ve zirkon bilyeler ile birlikte öğütülmüstür (1200 dev/dk hızda, 60 dk süresince). Daha sonra, Si₃N₄-etanol karısımı Al7075-etanol karısımına eklenmiş ve manyetik karıştırıcıda 20 dk süresince karıştırılmıştır. Karışım, etanolün uzaklaştırılarak katı partiküllerin kalması amacıyla filtrelenmiştir. Filtrelenen toz karışım, nemin uzaklaştırılması için etüv fırında (45°C sıcaklıkta, 16 saat süresince) sürekli vakum altında kurutulmuştur. Ardından, tozlar şekillendirmek amacıyla hidrolik pres makinesinde 800 MPa basınç altında sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan tozlara mukavemet kazandırmak amacıyla sinterleme (600°C sıcaklıkta, 60 dk süresince) ve indüksiyonla sıcak presleme (500°C sıcaklıkta, 30 sn bekleme süresince) işlemi uygulanmıştır. Numuneler farklı (600, 1200 ve 2500) grit boyutlarına sahip SiC su zımparaları

ile zımparalanarak yüzeylerindeki pürüzler giderilmiştir. Son olarak, numunelerin yüzeyi elmas solüsyon ile parlatılarak mikroyapı analizleri ve testler gerçekleştirilmiştir.

2.3 Mikroyapı analizleri

Çalışmada kullanılan Al7075 ve Si₃N₄ tozların yüzey morfolojisini, numunelerin kırık yüzey görüntülerini ve element dağılım haritalarını incelemek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz için Jeol marka JSM-7001F model SEM cihazı kullanılmıştır. Si₃N₄ partiküllerinin Al7075 içerisindeki dağılımını görüntüleyebilmek için SEM cihazı kullanılarak enerji dağıtıcı X-ışını (EDX) analizi yapılmıştır. Ayrıca kullanılan tozların ve üretilen kompozitlerin faz analizlerini belirlemek amacıyla Rigaku marka Smartlab model X-ışını kırınım (XRD) cihazı kullanılmıştır.

2.4 Yürütülen testler

Üretilen numunelerin deneysel yoğunlukları (ρ_D) Arşimet prensibine göre hesaplanmıştır (Denklem (1)). Her numuneden en az 5 ölçüm alınmış ve ortalaması hesaplanarak deneysel yoğunluk değeri belirlenmiştir. İlk olarak numunelerin sudaki asılı kütlesi (m_A), suya doymuş kütlesi (m_D) ve kuru kütleleri (m_K) ölçülmüştür. Suyun yoğunluğu ise 1 g/cm³ alınarak numunelerin deneysel yoğunlukları hesaplanmıştır.

$$\rho_D = [m_K / (m_D - m_A)] \rho_{su} \tag{1}$$

Numunelerin teorik yoğunluğu (ρ_T) Denklem (2) kullanılarak hesaplanmıştır. Denklemdeki ρ_M ve ρ_{TK} sırasıyla Al7075 (2.81 g/cm³) ve Si₃N₄'ün (3.25 g/cm³) teorik yoğunluklarını ifade etmektedir. %*M* ve %*TK* ise sırasıyla Al7075 ve Si₃N₄'ün ağırlıkça katkı oranıdır [12], [13].

$$\rho_T = (\% M \times \rho_M) + (\% T K \times \rho_{TK}) \tag{2}$$

Üretilen numunelerin sertlik değerleri Vickers sertlik ölçme yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Zımparalanıp parlatılan numunelerin yüzeyine Mikro Vickers sertlik ölçüm cihazı (HV1000B) kullanılarak 1.961 N yük (15 s süresince) uygulanmıştır. Numune yüzeyinde oluşan kare tabanlı piramitin köşegen uzunlukları ölçülmüştür ve Denklem (3) kullanılarak kompozitlerin Vickers sertlik değerleri belirlenmiştir. Burada P numune yüzeyine uygulanan yük, d ise ortalama köşegen uzunluğunu ifade etmektedir.

$$HV = 1.8544 \times (F/d^2)$$
 (3)

Kompozitlerin tribolojik özellikleri GUNT marka TM260 model pin-on disk aşınma test cihazıyla belirlenmiştir. Test düzeneğindeki aşındırıcı disk malzemesi AISI 304 paslanmaz çelik olup 50 HRC sertliğe sahiptir. Aşınma testleri 5-10 N yüklemede, 200 dev/dk kayma hızında ve 1000 m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin aşınma oranı (W) Denklem (4) ile hesaplanmaktadır. Denklemde ΔV aşınma hacmini, F uygulanan yükü, L ise kayma mesafesini ifade etmektedir. Aşınma oranı (W), aşınma hacminin uygulanan yüke ve kayma mesafesine bölünmesiyle elde edilmektedir.

$$W = \Delta V / (F \times L) \tag{4}$$

Aşınma hacmi, Denklem (5) ile belirlenmektedir. Bu denklemde m_i aşınma öncesi numune kütlesi, m_s aşınma sonrası numune kütlesi, ρ_D ise deneysel yoğunluktur.

$$\Delta V = (m_i - m_s)/\rho_D \tag{5}$$

Kayma mesafesi ise Denklem (6) kullanılarak hesaplanmaktadır. Denklemde R aşındırıcı diskin yarıçapı (20 mm), n diskin dönme hızı (200 dev/dk), t ise test süresidir (40 dk). Bu denkleme göre kayma mesafesi 1000 m olarak belirlenmiştir [14].

$$L = 2\pi \times r \times n \times t \tag{6}$$

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Tozların mikroyapı analizleri

Şekil 2'de Al7075 alaşımının ve Si₃N₄ tozlarının SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 2a incelendiğinde, Al7075 tozunun (JCPDS kart no:89-4184) yaklaşık 10 μ m tanecik boyutuna ve küresel bir morfolojiye sahip olduğu görülmektedir. Öte yandan, Şekil 2b, Si₃N₄ partiküllerinin (JCPDS Card No. 73-1210) küresel olmayan düzensiz bir yapıya ve yaklaşık 0.8 μ m tanecik boyutuna sahip olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 2. Al
7075 alaşım (a) ve $\mathrm{Si}_3\mathrm{N}_4$ (b) tozlarına a
it SEM görüntüleri



Şekil 3. Al7075 alaşım ve Si₃N₄ tozlarının XRD analizi

Şekil 3'te Al7075 alaşımı ve Si₃N₄ tozlarının XRD örgü desenleri sunulmuştur. Şekil üzerinde yapılan incelemelerde, Al7075 alaşımının difraksiyon açılarının $2\theta = -38^{\circ}$, 45° , 66° ve 78° olarak belirlendiği gözlemlenmiştir. Si₃N₄ takviye malzemesinin difraksiyon açılarının ise $2\theta = -26^{\circ}$, 35° , 38° , 43° , 53° , 57° , 61° , 67° , 69° , 77° olduğu saptanmıştır. Bu analiz, üretilen kompozit numunelerin XRD faz yapılarının analizi açısından önem arz etmektedir.

3.2 Yoğunluk ve sertlik ölçüm sonuçları

Al7075 alaşımı ve Al7075-Si₃N₄ kompozitlerin takviye oranına bağlı olarak deneysel yoğunluk değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Tabloya göre en düşük yoğunluk 2.59 g/cm³ olarak Al7075 alaşımında belirlenmiştir. En yüksek voğunluk değeri (2.65 g/cm³) ise Al7075-%9 Si₃N₄ kompozitte elde edilmiştir. Al7075-%9 Si₃N₄ kompozitte voğunluk değeri Al7075 alasımına kıvasla %2.3 oranında artış göstermiştir. Bu artışın, uygulanan sıcak presleme işlemindeki sıcaklık ve basıncın etkisiyle yapıdaki gözeneklilik oranının azalmasından kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Ancak takviye elemanının kümeleşmesinden dolayı Al7075-%12 Si₃N₄ kompozitte yoğunluk değerinin 2.61 g/cm3'e düştüğü belirlenmiştir. Bu düşüş, Si₃N₄ ve alüminyumun termal genleşme katsayılarının çok farklı olmasından ve bu farkın gözenekliliğe yol açmasından kaynaklanmaktadır.

Tablo 2. Al7075 alaşımı ve Al7075-Si₃N4kompozitlerin deneysel yoğunlukları

Malzeme	Deneysel Yoğunluk (g/cm ³)
A17075	2.59
Al7075-1Si ₃ N ₄	2.60
Al7075-3Si ₃ N ₄	2.62
Al7075-6Si ₃ N ₄	2.63
Al7075-9Si ₃ N ₄	2.65
Al7075-12Si ₃ N ₄	2.61

Al7075 alaşımı ve Al7075-Si $_3N_4$ kompozitlerin Si $_3N_4$ katkı oranına bağlı olarak Vickers sertlik değerleri Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Al7075 alaşımıyla Al7075-Si $_3N_4$ kompozitlerin Vickers sertlik değerleri

Şekil incelendiğinde, en yüksek sertlik değeri (205 HV) %9 Si₃N₄ katkı oranında elde edilmiştir. Takviye partiküllerinin yüksek sertliğinden dolayı katkı oranının artmasıyla kompozitlerin sertlik değerinin arttığı tespit edilmiştir. Ancak %12 Si₃N₄ katkı oranında partiküllerin farklı bölgelerde bir araya gelerek muhtemel topaklanmasından dolayı sertlik değerinde azalma tespit edilmiştir [7, 15-16].

3.3 Kompozitlerin mikroyapı analizleri

kompozitlerin Üretilen mikroyapısını incelemek amacıvla XRD, SEM SEM-EDX analizleri ve gerçekleştirilmiştir. Al7075 alaşımına ve Al7075-%12 Si₃N₄ kompozite ait XRD örgü desenleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekil üzerindeki □ sembolü alüminyumu, o sembolü ise α-Si₃N₄'ü temsil etmektedir. Şekil incelendiğinde Al ve α -Si₃N₄ pikleri görülmektedir. Si₃N₄; 1420°C sıcaklığın altında α -Si₃N₄ yapıdadır [17]. Üretilen kompozit numunelere 600°C sıcaklıkta sinterleme ve 500°C sıcaklıkta sıcak presleme işlemi uygulandığından dolayı XRD analizinde Al ve α-Si₃N₄ yapı tespit edilmiştir. Ayrıca XRD analizinde herhangi bir ikincil faz oluşumuna rastlanılmamıştır.



Şekil 5. Al7075 alaşımına ve Al7075-%12 Si_3N_4 kompozitlere ait XRD örgü desenleri

Şekil 6'da Al7075 alaşımı, Al7075-%3 Si₃N₄, Al7075-%9 Si₃N₄ ve Al7075-%12 Si₃N₄ kompozitlerin kırık yüzey SEM görüntüleri sunulmuştur. Şekil incelendiğinde en yoğun mikroyapının Al7075-9Si₃N₄ kompozit yapıya ait olduğu görülmektedir. Aynı zamanda bu kompozitte takviye partikülleri homojene yakın bir dağılım sergilemiştir [7, 9]. Si₃N₄ partiküllerinin tane sınırlarına yerleştiği ve böylece tane büyümesine engel olduğu belirlenmiştir [18]. Bu nedenle deneysel yoğunluk ve sertlik sonuçlarında en iyi değerler Al7075-%9 Si₃N₄ kompozitte elde edilmiştir. Ancak Si₃N₄ katkı oranı %12 olduğunda partiküllerin topaklandığı gözlenmiştir. Bu nedenle sertlik değeri Al7075-%12 Si₃N₄ kompozit yapıda azalmıştır. Böylelikle test sonuçları SEM görüntüleri ile doğrulanabilmiştir.

Şekil 7'de Al7075-12Si₃N₄ kompozitin kırık yüzeyine ait SEM-EDX görüntüleri verilmiştir. Burada Al, O, Mg, Zn, Cu ve Fe elementleri Al7075 alaşımının varlığını doğrulamaktadır. Si ve N elementleri ise Si_3N_4 'ün yapı içerisindeki varlığını göstermektedir. Şekil incelendiğinde açık mavi renkteki Si (Şekil 7d) elementinin topaklandığı rahatlıkla görülebilmektedir. Bu durumun kompozitin özelliklerini olumsuz yönde etkilediği düşünülmektedir.



Şekil 6. Al7075 alaşımına (a), Al7075-%3 Si₃N₄ (b), Al7075-%9 Si₃N₄ (c) ve Al7075-%12 Si₃N₄ (d) kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri



Şekil 7. Al7075-%12 Si $_3N_4$ kompozite ait kırık yüzey SEM görüntüsü (a), SEM-EDX analizi (b) ve element dağılım haritası (c-j)

3.4 Tribolojik test sonuçları

Al7075 alaşımı ve Al7075-Si₃N₄ kompozitlerin uygulanan yüke göre aşınma oranı ve kütle kaybı değerleri Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, uygulanan yükün artmasıyla birlikte aşınma oranı ve kütle kaybı değerlerinin artış gösterdiği belirlenmiştir. Bu artışın sebebi, kompozit ile aşındırıcı disk arasındaki temas alanının artarak yumuşak matris bölgesinin daha fazla aşınmasıdır. Si_3N_4 katkı oranının artmasıyla aşındırıcı disk, yüksek sertliğe sahip olan takviye partikülleri ile temas eder ve aşınma oranı azalır [19]. En düşük aşınma oranı (0.00018 mm³/(Nm)) ve kütle kaybı (0.0025 g) Al7075-%9 Si₃N₄ kompozitte 5 N yüklemede elde edilmiştir.



Şekil 8. Al7075 alaşımı ve Al7075-Si $_3N_4$ kompozitlerin aşınma oranı (a) ve kütle kaybı (b) değerleri

Kompozit malzemedeki aşınma oranı ve sertlik arasındaki ilişki Archard eşitliği ile açıklanabilir (Denklem (7)). Bu denkleme göre, sertliği yüksek olan malzemenin aşınma oranı düşüktür. Denklemde μ sürtünme katsayısını, *H* ise malzemenin sertliğini ifade etmektedir. Yapılan bu çalışmada en yüksek sertlik (205 HV) Al7075-%9 Si₃N₄ kompozitte elde edilmiştir. Bu nedenle en düşük aşınma oranına da (0.00018 mm³/(Nm)) Al7075-%9 Si₃N₄ kompozitte ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar Archard eşitliği ile doğrulanmaktadır [20].

$$\Delta V = F \times \mu \times L/H \tag{7}$$

Şekil 9'da Al7075 alaşımı ve Al7075-Si₃N₄ kompozitlere ait sürtünme katsayısı değerleri ile sürtünme katsayısıkayma mesafesi eğrileri verilmiştir. Şekil incelendiğinde, Al7075 matrise Si₃N₄ ilave edilmesiyle sürtünme katsayısı değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu düşüşün literatürle de uyumlu olduğu görülmüştür [21]. En yüksek ortalama sürtünme katsayısı 0.5 olarak Al7075 alaşımında belirlenmiştir. En düşük ortalama sürtünme katsayısı (0.38) ise paslanmaz çelik diskle Al7075-%9 Si₃N₄ kompozit yüzey çifti arasında elde edilmiştir. Bu durum en iyi tribolojik özelliklerin Al7075-%9 Si₃N₄ kompozit yapıda elde edildiğini doğrulamaktadır.



Şekil 9. Al7075-Si₃N₄ kompozitlere ait sürtünme katsayısı değerleri (a) ve sürtünme katsayısı-kayma mesafesi eğrileri (b)

3.5 Numunelerin aşınmış yüzey görüntüleri

A17075, A17075-%9 Si₃N₄ ve A17075-%12 Si₃N₄ kompozit yapılara ait P=5 N yük altındaki aşınma izlerinin SEM görüntüleri Şekil 10'da verilmiştir. Sekil incelendiğinde, numune yüzeylerinde aşınmadan dolayı oluklar ve çukurlar tespit edilmiştir [22]. Bu aşınma izlerinin kayma yönüne paralel olduğu görülmektedir. Ayrıca numune yüzeylerinde abrasif aşınma ve adhezyon mekanizmalarının etkili olduğu belirlenmiştir. En derin izler Şekil 10a'da gösterilen Al7075 alaşımında tespit edilmiştir. Çünkü aşındırıcı disk ile temas eden matris bölgesinde aşırı plastik deformasyon meydana gelmektedir. Ancak takviye miktarının artması ile sert partiküller aşındırıcı diske karşı bariyer görevi görür ve plastik deformasyon azalır. Böylelikle kompozitin aşınma direnci artmaktadır. Bu nedenle en küçük izler Al7075-%9 Si₃N₄ kompozit yapıda meydana gelmiştir. Sonuç olarak, numunelerin aşınmış yüzeylerinin SEM görüntüleri aşınma oranı ve kütle kaybı sonuçlarını doğrulamaktadır.



Şekil 10. Al7075 alaşımına (a), Al7075-%3 Si₃N₄ (b), Al7075-%9 Si₃N₄ (c) ve Al7075-%12 Si₃N₄ (d) kompozitlere ait aşınma görüntüleri (P=5 N yük altında)

4 Sonuçlar

Yapılan çalışmada toz metalürjisi ve sıcak presleme yöntemleriyle Al7075 matrisli Si₃N₄ takviyeli kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompzoitlerin mikroyapısı incelenerek deneysel yoğunluk, Vickers sertliği, aşınma oranı ve kütle kaybı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

• Yürütülen testler sonucunda, en yüksek deneysel yoğunluk 2.65 g/cm³ olarak Al7075-%9 Si₃N₄ kompozitte belirlenmiştir. Al7075-%9 Si₃N₄ kompozitin deneysel yoğunluğu Al7075 alaşımına kıyasla %2.3 oranında artmıştır. Si₃N₄ partiküllerinin yüksek sertliği ve uygulanan ısıl işlemlerin etkisinden dolayı katkı oranının artmasıyla kompozitlerin sertliği artmıştır. En yüksek sertlik değeri (205 HV) Al7075-%9 Si₃N₄ kompozitte elde edilmiştir. Ancak Al7075-%12 Si₃N₄ kompozitte partiküllerin topaklanmasından dolayı sertlik değeri azalmıştır.

•Mikroyapı analizlerine göre, Al7075-%9 Si₃N₄ kompozit yapıda takviye partiküllerinin homojene yakın dağıldığı ve tane sınırlarına yerleştiği gözlemlenmiştir. Al7075-%12 Si₃N₄ kompozit yapıda ise Si₃N₄ partiküllerinin farklı bölgelerde bir araya gelerek kümelendiği tespit edilmiştir.

•Al7075-Si₃N₄ kompozitlere uygulanan aşınma test sonuçlarına göre en düşük aşınma oranı (0.00018 mm³/(Nm)), kütle kaybı (0.0025 g), sürtünme katsayısı (0.38) 5 N yükte Al7075-%9 Si₃N₄ kompozit yapıda elde edilmiştir. Si₃N₄ partiküllerinin yüksek sertliğinden dolayı katkı oranının artmasıyla aşınma direnci artmıştır.

•Al7075 alaşımı ile Al7075-Si₃N₄ kompozit yapıların aşınma izlerine ait SEM görüntüleri incelendiğinde; en zayıf izler Al7075-%9 Si₃N₄ kompozitte elde edilmiştir. Al7075 matrise Si₃N₄ partiküllerinin takviye edilmesi ile aşınma izlerinin küçüldüğü belirlenmiştir. Sonuç olarak Al7075 matrise belirli oranda (ağırlıkça %9) Si₃N₄ takviye edildiğinde kompozitin tribolojik özelliklerinin iyileştiği belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada üretilen yüksek aşınma dayanımına sahip Al7075-Si₃N₄ kompozitler, havacılık ve otomotiv başta olmak üzere birçok alanda kullanılan hafif ve gelişmiş tribolojik özelliklere sahip malzeme ihtiyacını karşılamaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- S. A. Kumar, J. H. Vignesh, and S. P. Joshua, Investigating the effect of porosity on aluminium 7075 alloy reinforced with silicon nitride (Si₃N₄) metal matrix composites through STIR casting process. Materials Today: Proceedings, 39, 414–419, 2020. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.690.
- [2] V. V. B. Gurrappa, I., and Prasad, Corrosion characteristics of aluminium based metal matrix composites, Journal of Materials Science & Technology, 22, 115–122, 2006.
- [3] N. Ramadoss, K. Pazhanivel, A. Ganeshkumar, and M. Arivanandhan, Microstructural, mechanical and corrosion behaviour of B₄C/BN-reinforced Al7075 matrix hybrid composites. International Journal of Metalcasting, 17(1), 499–514, 2023. https://doi.org/ 10.1007/s40962-022-00791-z.
- [4] S. Devaganesh, P. K. D. Kumar, N. Venkatesh, and R. Balaji, Study on the mechanical and tribological performances of hybrid SiC-Al7075 metal matrix composites. Journal of Materials Research and Technology, 9(3), 3759–3766, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.002.
- [5] S. Manghnani, D. Shekhawat, C. Goswami, T. K. Patnaik, and T. Singh, Mechanical and tribological characteristics of Si₃N₄ reinforced aluminium matrix composites: A short review. Materials Today: Proceedings, 44, 4059–4064, 2020. https://doi.org/ 10.1016/j.matpr.2020.10.440.
- [6] N. H. Alharthi, S. M. Almotairy, and A. M. Almutairi, Frictional Behavior and Mechanical Performance of Al Reinforced with SiC via Novel Flake Powder Metallurgy. Metals (Basel), 12(2), 2022. https://doi.org/10.3390/met12020323.
- J. M. Mistry and P. P. Gohil, Experimental investigations on wear and friction behaviour of Si₃N 4p reinforced heat-treated aluminium matrix composites produced using electromagnetic stir casting process. Composites Part B: Engineering, 161, 190–204, 2019. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.20 18.10.074.
- [8] G. B. V. Kumar, P. Prasad, N. Suresh, R. Pramod, and C. S. P. Rao, Assessment of mechanical and tribological characteristics of Silicon Nitride reinforced aluminum metal matrix composites. Composites Part B: Engineering, 175, 107138, 2019. https://doi .org/10.1016/j.compositesb.2019.107138.

- [9] V. Mohanavel, K. S. A. Ali, S. Prasath, T. Sathish, and M. Ravichandran, Microstructural and tribological characteristics of AA6351/Si₃N₄ composites manufactured by stir casting. Journal of Materials Research and Technology, 9(6), 14662–14672, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.128.
- [10] P. Ramu, R. H. K. Reddy, B. K. Kumar, T. Padmanathan, and M. V Phanibhushana, Materials Today: Proceedings Investigation of wear characteristics of Al6061-Si₃N₄ composites subjected to strain hardening through Equal Channel Angular Pressing. Materials Today: Proceedings, 46, 790–794, 2021. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.765.
- [11] D. S. R. Smart, J. P. Kumar, and C. Periasamy, Materials Today: Proceedings Microstructural, mechanical and wear characteristics of AA7075/TaC/Si₃N₄/Ti based hybrid metal matrix composite material. Materials Today: Proceedings, 43, 784–794, 2021. https://doi.org/10.1016/j.matpr. 2020.06.169.
- [13] S. Bai, N. Perevoshchikova, Y. Sha, and X. Wu, Applied sciences the effects of selective laser melting process parameters on relative density of the AlSi10Mg parts and suitable procedures of the archimedes method. 2019, https://doi.org/10.3390/app9030583.
- [14] M. C. Şenel and M. Üstün, Dry sliding wear and friction behavior of graphene/ZrO₂ binary nanoparticles reinforced aluminum hybrid composites. Arabian Journal for Science and Engineering, 47(7), 9253–9269, 2022. https://doi.org/10.1007/s13369-022-06661-4.
- [15] M. C. Şenel, M. Gürbüz, E, Koç, Fabrication and

characterization of SiC and Si_3N_4 reinforced aluminum matrix composites. Universal Journal of Materials Science, 5(4), 95, 2017.

- [16] Z. Ahmad, S. Khan, S, S. Hasan, Microstructural characterization and evaluation of mechanical properties of silicon nitride reinforced LM 25 composite. Journal of Materials Research and Technology, 9(4), 9129-9135, 2020.
- [17] V. V. Zakorzhevskii, I. P. Borovinskaya, Combustion synthesis of silicon nitride using ultrafine silicon powders. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 48, 375-380, 2009.
- [18] G. Anbuchezhiyan, B. Mohan, N. Senthilkumar, R. Pugazhenthi, Synthesis and characterization of silicon nitride reinforced Al–Mg–Zn alloy composites. Metals and Materials International, 27, 3058-3069, 2021.
- [19] R. K. Arya, R. Kumar, A. Telang, Influence of microstructure on tribological behaviors of Al6061 metal matrix composite reinforced with silicon nitride (Si₃N₄) and silicon carbide (SiC) micro particles. Silicon, 15(9), 3987-4001, 2023.
- [20] W. Zhai, X. Shi, J. Yao, A. M. M. Ibrahim, Z. Xu, Q. Zhu, Y. Xiao, L. Chen, Q. Zhang, Investigation of mechanical and tribological behaviors of multilayer graphene reinforced Ni₃Al matrix composites. Composites Part B: Engineering, 70, 149-155, 2015.
- [21] P. P. Venkat, P. C. Naidu, L. P. Kumar, K. V. Babu, M. K. Prasad, M. V. Rao, Effect of Al₂O₃ particles on mechanical, microstructural and tribological characteristics of Al5052 metal matrix composite reinforced with Si₃N₄ particles. Materials Today: Proceedings, *91*, 158-166, 2023.
- [22] D. Bhuvanesh, N. Radhika, A. V. Vidyapeetham, Experimental investigation on tribological characteristics of silicon nitride reinforced aluminium metal matrix composites. Journal of Engineering Science and Technology, *12*(5), 1295-1306, 2017.





NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 490-503 Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araștırma makalesi / Research article

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



Optimizing carbon emission reduction in hybrid microgrids: A case study integrating photovoltaics and hydrogen energy systems

Hibrit mikro şebekelerde karbon emisyonunun azaltılması: Fotovoltaik ve hidrojen enerji sistemlerinin entegrasyonu üzerine bir vaka çalışması

Hüsnügül Tekin^{1, *}, Heybet Kılıç², Cem Haydaroğlu³, Mehmet Emin Asker⁴

^{1,3} Dicle University Electrical and Electronics Engineering, 21280, Diyarbakır, Türkiye ^{2,4} Dicle University Department of Electric Power and Energy System, 21280, Diyarbakır, Türkiye

Abstract

The reliance on fossil fuels for energy consumption in Diyarbakır leads to environmental pollution and high costs, making the transition to renewable energy imperative. However, the challenges associated with the continuous generation of energy from these sources require sustainable solutions. The simulation results indicate that through the use of hydrogen and renewable energy technologies, 0.0254% of Türkiye's targeted 695 Mt CO₂ reduction by 2030 can be achieved solely through the efforts undertaken within this project. Failure to address this issue will result in increased dependence on fossil fuels and escalating environmental damages. In this study, the integration of hydrogen production and renewable energy was simulated in a neighborhood close to a water source in Diyarbakır using the Homer Pro analysis software. Proximity to the water source facilitates the supply of water required for hydrogen production, making the production processes more economical and sustainable. It also enhances efficiency in the electrolysis process, with the cost of hydrogen production calculated at \$4.50/kg and energy cost at \$0.08301/kWh. These results demonstrate that the integration of hydrogen and renewable energy offers a sustainable solution economically both and environmentally.

Keywords: Microgrid, HOMER pro, Hydrogen energy, Energy storage

1 Introduction

The Paris Climate Agreement is the first comprehensive climate agreement accepted on a global scale, signed by 175 countries that collectively produce more than 55% of global greenhouse gas emissions. The agreement aims to raise awareness of climate change and encourage countries to develop climate resilience strategies. In this context, the European Union adopted the 'Green Deal' strategy in 2019, targeting a 50% reduction in greenhouse gas emissions by 2030 and carbon neutrality by 2050 (set at 41% for Türkiye. The long-term goal of the Paris Agreement is to keep the global temperature increase below 2°C above pre-industrial levels, aiming to limit it to 1.5°C if possible. Achieving this target necessitates a gradual reduction in the use of fossil

Öz

Diyarbakır'da enerji tüketiminin fosil yakıtlara dayanması, çevre kirliliğine ve yüksek maliyetlere neden olmakta, yenilenebilir enerjiye geçişi zorunlu kılmaktadır. Ancak, bu kaynakların kesintisiz enerji üretimindeki zorlukları sürdürülebilir çözümler gerektirmektedir. Simülasyon sonuçları, hidrojen ve yenilenebilir enerji teknolojilerinin kullanımıyla Türkiye'nin 2030 yılına kadar hedeflediği 695 Mt CO2 azaltım hedefinin %0.0254'ünün yalnızca bu proje çalışmalarla kapsamında gerçekleştirilecek sağlanabileceğini ortaya koymaktadır. Sorunun çözülememesi durumunda, fosil yakıtlara bağımlılık ve çevresel zararlar artmaya devam edecektir. Bu çalışmada, Diyarbakır'ın su kaynağına yakın bir mahallesinde, hidrojen üretimi ve yenilenebilir enerji entegrasyonu Homer Pro analiz yazılımında simüle edilmiştir. Su kaynağına yakın olmak, hidrojen üretimi için gerekli olan suyun teminini kolaylastırarak, üretim süreclerini daha ekonomik ve sürdürülebilir hale getirir. Aynı zamanda elektroliz sürecinde verimlilik sağlanmış ve sistemde üretilen hidrojen maliyeti 4.50 \$/kg, enerji maliyeti ise 0.08301 \$/kWh olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, hidrojen ve yenilenebilir enerji entegrasyonunun ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Mikro şebeke, HOMER Pro, Hidrojen enerjisi, Enerji depolama

fuels (oil and coal) and a transition to renewable energy sources [1]. The effective use of renewable energy sources and their integration into energy production processes is crucial for a sustainable future. Converting natural resources like solar and wind into energy aims to reduce dependence on fossil fuels and minimize environmental impacts. In this regard, local energy systems known as microgrids promise significant changes to the traditional energy production model. Although the integration of renewable energy sources into energy systems is a critical step, the intermittent nature of these sources creates stability issues within energy systems [2-4].

Electrical storage systems are widely used to address these stability issues; however, they have some

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: tekin.husnugul@gmail.com (H.Tekin) Geliş / Received: 14.10.2024 Kabul / Accepted: 25.01.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngumuh.1567257

disadvantages. Traditional battery storage systems face limitations such as high cost, limited lifespan, and environmental concerns related to battery disposal [5]. Furthermore, batteries have relatively low energy density, making it difficult to store large amounts of energy over extended periods.

Nevertheless, hydrogen storage offers an alternative solution to these challenges [6]. Hydrogen produced through electrolysis provides efficient storage for renewable energy while also increasing demand flexibility [7]. Unlike battery storage, hydrogen can store large quantities of energy over long periods without loss and is a scalable solution. Hydrogen storage balances the intermittency of renewable energy, creating a more stable infrastructure and supporting the transition to sustainable energy systems.

This study aims to evaluate hydrogen technology's potential to meet growing energy demand and support sustainable systems in Türkiye's rural areas with limited energy access and high renewable potential. In this study, a rural area in Diyarbakır province has been selected as an ideal site for a hydrogen-based microgrid due to its proximity to the Tigris River and the availability of water resources. A significant portion of the neighborhood's energy needs is currently met by fossil fuels, leading to both environmental issues and rising energy costs. A simulation model for a neighborhood-scale energy system has been developed using hydrogen technologies. Different scenarios related to the production, storage, and use of hydrogen have been evaluated within this model. The results provide valuable insights into the potential of hydrogen technologies to meet the energy needs of the residents, their environmental impacts, and economic benefits. This study will serve as a reference point for other regions in Türkiye with similar geographical and socioeconomic characteristics.

Recent years have seen a rapid increase in research on hydrogen energy. Particularly, numerous studies have focused on the integration of renewable energy sources and energy storage systems. Studies by Xu et al. [8] and Zainal B.S. et al. [9] indicate that recent advancements in electrolyzer technologies have significantly reduced the cost of hydrogen production. J.J. Brey [10] emphasizes that hydrogen is a suitable solution for seasonal energy storage and can help mitigate fluctuations in renewable energy production. A comprehensive review by Ishaq H. et al. [11] analyzes the potential applications of hydrogen across different sectors and the technical challenges in these areas in detail. Notably, Neuwirth M. et al. [12] have highlighted the critical role hydrogen can play in reducing carbon emissions in energy-intensive sectors like steel production. Guilbert and Vitale [13] suggest that hydrogen, when combined with fuel cell technologies, could be utilized to develop zero-emission transportation systems. Modeling studies by Egeland-Eriksen T. et al. [14] and Ge et al. [15] demonstrate that integrating hydrogen into energy systems enhances system flexibility and reliability. Research by Alzoubi [16] and Mijndert van der Spek et al. [17] underscores the importance of infrastructure investments necessary for the development of the hydrogen economy. H. Kılıç [18] emphasizes the significance of using hydrogen and

renewable energy technologies in microgrid-based Powerto-X (P2X) systems, showing that this method outperforms traditional algorithms and increases hydrogen production. H. Kılıç et al. [19] analyze the impact of integrating hydrogen fuel cells and D-STATCOM systems on improving power quality by reducing voltage fluctuations in power systems. Integrating hydrogen improves energy access and boosts economic development in rural areas.

Türkiye has set ambitious targets for green hydrogen. As outlined in the Turkish Hydrogen Technologies Strategy and Roadmap, the country aims to reach an electrolyzer capacity of 5 GW by 2035 and 70 GW by 2053. These goals demonstrate the need to develop a comprehensive strategy for the domestic production, storage, and utilization of green hydrogen. Additionally, the report forecasts that the cost of producing green hydrogen will decrease to \$2.4 per kilogram by 2035 and to \$1.2 per kilogram by 2053 [20]. As of 2024, the cost of producing green hydrogen is estimated to be between \$5 and \$6 per kilogram, reflecting current production technologies and market conditions. In comparison, the cost of gray hydrogen production in 2024 remains relatively stable, ranging between \$1 and \$2 per kilogram, primarily due to the use of fossil fuels in its production process. The Development Plan has identified green hydrogen production as a strategic goal to accelerate energy transition. The plan focuses on areas such as the development of domestic electrolyzer technologies, the establishment of necessary infrastructure for transporting and storing green hydrogen, and the widespread implementation of smart grid technologies. Enhancing energy efficiency through the widespread use of smart meters and the development of SCADA systems will ensure grid reliability [21].

In this study, a rural neighborhood in Diyarbakır province was modeled as a microgrid using Homer Pro software. The model addressed a typical example of energy issues commonly encountered in rural areas, considering the neighborhood's current energy consumption profile, regionspecific renewable energy potential, and different configurations of hydrogen production and storage systems. Various scenarios were created to examine the impact of hydrogen on system performance. Notably, the ability of hydrogen to store and transport energy has helped stabilize the system by reducing the effects of fluctuations in renewable energy production. Economic analyses have demonstrated the long-term cost-effectiveness of hydrogen technologies. However, there are challenges to the widespread adoption of hydrogen technologies in rural areas, including limited infrastructure investments, high initial capital costs, and a lack of awareness. To overcome these challenges, it is crucial for local governments and the national government to develop supportive policies, create financing mechanisms, and conduct awareness-raising activities for the local community. Moreover, investing in research and development in hydrogen technologies is essential to make these technologies more efficient and costeffective.

2 Materials and methods

Microgrids offer a flexible and efficient solution to energy production, providing an alternative to traditional energy systems [22]. These systems are classified into three main categories based on their topological structures:

<u>Alternating Current (AC) Microgrids:</u> The most commonly used type, where DC sources such as solar panels (PV) and batteries are connected to the AC grid through AC inverters. This structure ensures compatibility with existing electrical grids.

<u>Direct Current (DC) Microgrids:</u> These systems operate entirely on direct current, with DC sources connected directly to the DC bus. This setup reduces AC/DC conversions, thereby minimizing energy losses. However, the limited availability of DC loads and the lack of widespread adoption of DC distribution systems restrict the use of these microgrids.

<u>Hybrid Microgrids:</u> These systems integrate both AC and DC components, creating a more complex but flexible structure. This configuration allows for the combination of different types of loads and energy sources within a single system.

In this study, a hybrid microgrid design was developed and analyzed using the Homer Pro software.

2.1 Homer Pro software

HOMER Pro is a powerful software used for the design and analysis of hybrid energy systems. It is widely utilized for modeling and optimizing systems that combine renewable energy sources like solar, wind, and biomass with traditional energy sources. This software helps determine the most suitable solution by evaluating the system's performance under different scenarios. By considering factors such as energy cost, environmental impacts, and reliability, it enables users to make the best decisions for their energy systems. HOMER Pro offers innovative solutions for meeting energy needs, particularly in remote areas, islands, and developing countries.

Studies conducted by Vendoti et al. [23], Dawood et al. [24], and Xia et al. [25] demonstrate the use of this software to meet energy needs in remote and isolated regions, while research by Çetinbaş et al. [26], Güven et al. [27], and Suresh et al. [28] provide significant findings on the integration of renewable energy sources. Bhattacharjee et al. [29] have focused on the optimization of hybrid systems for regions with different climatic conditions. Basheer et al. [30] have made important contributions to the design and evaluation of hybrid energy systems for industrial areas. These studies highlight the flexibility and broad range of applications of HOMER Pro. In the study conducted by Jahangir and Cheraghi, an economic and environmental assessment of a hybrid renewable energy system consisting of solar, wind, and biomass was carried out to meet the energy needs of a rural settlement. The study highlights the feasibility of such systems in rural areas while providing a comparative analysis of economic costs and environmental impacts. This approach serves as an important reference for developing sustainable energy solutions for settlements [31]. In the study conducted by Amupolo et al., the techno-economic

feasibility of off-grid renewable energy electrification schemes was assessed for an informal settlement in Namibia. The research provides a comprehensive analysis of the applicability of renewable energy sources in such settlements from both economic and technical perspectives. This work offers valuable insights into the development of sustainable energy solutions for underserved communities [32]. In the study conducted by Palanichamy et al. the development of a microgrid for the secluded Paana Theertham Kani settlement in India was explored. The research focuses on integrating renewable energy sources to enhance energy access and meet the sustainable energy needs of the community. This study provides valuable insights into the feasibility of microgrid solutions for rural and isolated settlements [33]. In the study conducted by El Hassani et al., the techno-economic feasibility and performance of an islanded hybrid renewable energy system with hydrogen storage were analyzed for a specific settlement in Morocco. The research highlights the integration of renewable energy sources with hydrogen storage to provide sustainable and reliable energy solutions for isolated communities. This study offers significant insights into the development of renewable energy systems tailored to meet the unique energy needs of such settlements [34]. Although previous research has generally focused on specific geographical regions or energy sources, this study adopts a more comprehensive approach aimed at addressing common energy challenges encountered in rural areas of Türkiye.

This study introduces a comprehensive approach that significantly contributes to the literature by integrating hydrogen technologies with renewable energy systems. Unlike many existing studies that focus on individual renewable energy sources or limited technologies, this work provides a holistic analysis of a hybrid system design, emphasizing the synergy between hydrogen technologies and renewable resources like solar energy.

The methodology employed in this research optimizes hydrogen production in proximity to water sources, considering both economic and environmental aspects. Utilizing HOMER Pro software, the study conducts detailed simulations to evaluate energy production, storage, and cost dynamics while also calculating the potential for carbon emissions reduction. These features make the study stand out as it combines technological feasibility with concrete environmental and economic metrics.

Moreover, the proposed method not only enhances energy access but also reduces energy costs for local communities while promoting environmental sustainability. The findings of this study address a significant gap in the literature regarding the application of hydrogen-based hybrid systems in rural settlements and are expected to serve as a valuable reference for future research in the field.

2.2 Site selection and data collection

2.2.1 Site selection

A rural settlement, known by various names and located in one of the central districts of Diyarbakır, has been selected as the pilot implementation area. The geographical location of this region played a significant role in its selection. The area has a high solar energy potential, which, when combined with the hydrogen-integrated microgrid design, enhances its capacity to meet the region's energy needs. Additionally, the density and social structure of the settlement provide a valuable opportunity for the pilot project's results to be disseminated to a broader audience and to contribute to the energy transition in the area. Its proximity to a water source, in particular, offers significant advantages for hydrogen production processes, thereby increasing the system's efficiency. This pilot implementation aims to demonstrate the feasibility of sustainable energy solutions in areas close to the city center and to contribute to the region's journey toward energy independence. Figures 1, 2, and 3 illustrate the neighborhood's grid connection model, the supply area, and the feeder information, respectively.



Figure 1. Geographic information systems (GIS) grid connection model



Figure 2. Geographic supply area



Figure 3. Feeder supplying the neighborhood

The specification of the supply area in square kilometers allows readers to better understand the coverage of the energy distribution network, providing clarity regarding the system's geographical context. For this study, the selected area covers a surface area of 17390 decares. Furthermore, including the demand power of the feeder enhances the understanding of energy flow and capacity requirements, contributing to the evaluation of system reliability and performance. The daily load for the study area has been calculated as 13407.45 kWh.

The area under study is supported by a range of transformers with varying capacities to meet the energy demand and ensure system reliability. The transformer capacities include units ranging from 50 kVA to 1000 kVA, strategically distributed throughout the network to optimize energy distribution and accommodate the load requirements. For confidentiality purposes, the exact quantities and locations of these transformers are not disclosed.

Geographical and climatic data are critical for simulating the performance of a hybrid energy system using HOMER Pro. These factors directly influence the design and optimization of the system for a specific location [35]. The exact latitude and longitude coordinates of the study area determine the solar radiation patterns. Detailed information on location-specific average daily and monthly solar radiation, obtained from NASA's Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) database, is essential [36]. In this context, the combined graph presenting the monthly temperature data and Solar GHI (Global Horizontal Irradiance) for the application site is displayed in Figure 4, providing a comprehensive overview of both metrics in a single visualization. [37, 38].



Figure 4. Monthly solar radiation, clearness index and temperature

2.2.2 Data collection

In the study, one year of active energy consumption data (July 2023 - July 2024) for the rural settlement under investigation, obtained from the electricity distribution company was subjected to a detailed analysis by disaggregating it into 24-hour periods on a monthly and daily basis.

This comprehensive dataset enabled the examination of both daily load variations and seasonal differences, allowing for an in-depth analysis of the load profile. The completeness and accuracy of the data increased the reliability of the results and ensured the precision of the calculations. The dataset was uploaded to the HOMER Pro software, and the disaggregated profile data shown in Figure 5 was obtained. Additionally, the data classified by month is presented in Figure 6.

2.3 System Design

In HOMER Pro, a system design was developed for our

neighborhood, characterized as a residential area, using July - the month with the highest energy demand — as the reference. This design integrates multiple components, including PV, an electrolyzer, a hydrogen tank, an energy converter, and the grid, as shown in Figure 7. The electrical energy generated from the PV panels is converted into hydrogen through the electrolyzer and stored. When needed, this hydrogen is converted back into electricity using the energy converter to meet the electrical load. The hybrid microgrid's load group was selected as Bağıvar neighborhood. The cost of energy supplied from the local grid to the microgrid was set at \$0.067 per kWh, and the sale price of energy fed back from the microgrid to the grid was fixed at \$0.050 per kWh. These values were derived based on an analysis of market price ranges and were calculated as an average using data from a one-year period spanning both 2023 and 2024, ensuring a comprehensive and representative cost basis for this study.



Figure 5. Load profile visualized by HOMER Pro



Figure 6. Load profile by month visualized by HOMER Pro



Figure 7. Microgrid structure designed in HOMER Pro

2.4 PV system

The amount of electrical energy generated by PV modules constantly varies depending on many factors. These factors include a range of parameters such as the structure of the solar cell, the nominal power of the panel, the derating factor, the intensity of solar radiation, cell temperature, temperature coefficient, the geographical location of the panel, and environmental conditions. For instance, an increase in solar radiation generally enhances the power produced by the panel, while high temperatures can reduce its efficiency.

The mathematical model expressed as Equation (1) aims to represent these complex relationships with a certain level of accuracy.

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{\bar{G}_T}{\bar{G}_{T,STC}} \right) \left[1 + \alpha_p (T_c - T_{c,STC}) \right]$$
(1)

where:

 Y_{PV} = The rated capacity of the PV array, meaning its power output under standard test conditions [kW]

 f_{PV} = The PV derating factor [%]

 $\overline{\boldsymbol{G}}_{T}$ = The solar radiation incident on the PV array in the current time step [kW/m²]

 $\overline{\boldsymbol{G}}_{T,STC}$ = The incident radiation at standard test conditions [1 kW/m²]

 α_p = The temperature coefficient of power [%/°C]

 T_c = The PV cell temperature in the current time step [°C]

 $T_{c,\ STC} =$ The PV cell temperature under standard test conditions [25°C]

For the hybrid microgrid, the SunPower E20-327 PV module has been selected. The cost of the module is specified per 1 kW of power. The capital cost of this module is \$600, the replacement cost is \$420, and the O&M (Operation and Maintenance) cost is \$6 per year. The lifespan of the modules is set at 25 years.

2.5 Converter

It is used to convert alternating current (AC) to direct current (DC) or vice versa. This is necessary to convert the direct current from solar panels into the alternating current used by households or to transform the direct current drawn from batteries into alternating current through inverters. The Sinexcel PWG-100 converter has been selected. The converter cost for the hybrid microgrid is specified per 1 kW of output power. The capital cost of this converter is \$400, the replacement cost is \$280, the operation and maintenance cost is \$15, and its lifespan is 10 years. The efficiency of the converter is taken as 98%.
2.6 Electrolyzer

HOMER Pro is a useful tool for modeling the key performance and cost characteristics of the electrolyzer in our hybrid energy system. In our system, where we plan to use either Proton Exchange Membrane (PEM) or alkaline electrolyzers, hydrogen production efficiency and economies of scale are significant factors. The efficiency of the electrolyzer is defined as the ratio of the energy content of the hydrogen produced to the electrical energy consumed. Parameters such as hourly hydrogen production capacity (Nm³/hour) and specific energy consumption (kWh/Nm³) are used to assess the electrolyzer's performance. Additionally, the amount of water consumed for each cubic meter of hydrogen produced is important in terms of both operational logistics and the system's environmental impact. The electrolyzer model in HOMER is based on a constant efficiency assumption, and its minimum load level feature ensures that the electrolyzer operates within its efficient operating range.

HOMER Pro models the electrolyzer with a constant efficiency, assuming that a given input of electricity always results in the same amount of hydrogen production. Due to the minimum load limitation, the electrolyzer only operates efficiently when at least 75% of its nominal capacity is used. The electrolyzer, which typically consumes excess electricity, becomes active when there is demand for hydrogen or electricity.

The selected electrolyzer has a capital cost of \$600, a replacement cost of \$360, an operation and maintenance cost of \$30, and a lifespan of 15 years. The efficiency of the converter is considered to be 95%, with a minimum load ratio set at 50%.

2.7 Hydrogen tank

HOMER Pro enables a comprehensive simulation of hydrogen storage within hybrid energy systems by allowing users to define cost curves for storage capacity through a detailed cost table. For the grid model we designed, a hydrogen tank with a capacity of 1200 kg was specified with a capital cost of \$600, a replacement cost of \$480, and an O&M cost of \$20. The key parameters for defining hydrogen storage behavior include a tank lifetime of 20 years, an initial hydrogen level (e.g., 50% of the tank's capacity or an absolute value of 50 kg), and the requirement that the endof-year tank level meets or exceeds the initial level. For instance, the system's daily average hydrogen consumption could be set at 10 kg, with a target of having at least 60% of the tank's capacity filled by the end of the year. These parameters facilitate accurate performance and economic simulations, enabling the optimization of hybrid energy systems to meet energy demands with cost-effectiveness and adequate hydrogen storage capacity. The frequency of hydrogen tank charging and discharging in the simulation study is shown in Figure 8.

2.8 Evaluation criteria

2.8.1 Net present cost (NPC)

The total net present cost (NPC) of a system represents the present value of all expenses incurred throughout its lifetime, reduced by the present value of all revenues generated during the same period. These expenses include capital costs, replacement costs, operation and maintenance (O&M) costs, fuel costs, emissions penalties, and the cost of purchasing power from the grid. Revenues comprise salvage value and income from grid sales. The costs of the designed system are presented in Table 1.



Figure 8. Hydrogen tank charging and discharging frequency

Table 1. Cost summary of the system designed in HOMER Pro

Component	Economic Life (Year)	Capacity	Effiency (%)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$)	Salvage (\$)	Total (\$)
Generic Electrolyzer	15	1500 kW	95	900000.00	229107.87	581738.24	(43120.41)	1667725.70
Grid	-	-	-	0.00	0.00	482726.68	0.00	482726.68
Homer Cycle Charging	25	-	-	5.00	0.00	12.93	0.00	17.93
Hydrogen Tank	20	1200 kg	N/A	720000.00	183633.03	310260.40	(103488.99)	1110404.44
Sinexcel PWG-100	10	3000 kW	98	1200000.00	742087.61	581738.24	(100614.30)	2423211.55
SunPower E-20-327	25	3000 kW	98	1800000.00	0.00	232695.30	0.00	2032695.30
System				4620005.00	1154828.51	2189171.79	(247223.70)	7716781.60

HOMER determines the total NPC by aggregating the discounted cash flows for each year over the project's lifetime.

The total NPC serves as HOMER's primary economic output, used to rank all system configurations in the optimization results. It also forms the basis for calculating the total annualized cost and the levelized cost of energy.

NPC, also referred to as the life-cycle cost, is the present value of all expenses incurred for installing and operating a Component throughout the project's lifetime, reduced by the present value of all revenues generated by the Component during the same period. HOMER computes the net present cost for each Component individually as well as for the entire system.

HOMER utilizes the discount factor to account for the time value of money rather than inflation. The impact of inflation is excluded from the analysis by employing the real discount rate instead of the nominal discount rate. Nevertheless, even with inflation removed, the principle of the time value of money dictates that a future cash flow is less valuable than an equivalent cash flow in the present. The discount factor reflects this effect, decreasing in value as the number of years from the project's inception increases.

The discount factor represents a ratio utilized to determine the present value of cash flows occurring at any point during the project's lifetime. HOMER computes this value using the following formula Equation (2):

$$f_d = \frac{1}{(1+i)^N} \tag{2}$$

where:

i =Real discount rate [%]

N =Number of years

2.8.2 Levelized cost of energy (LCOE)

It defines the LCOE as the average cost per kWh of useful electrical energy produced by the system. HOMER determines the COE value of the system by subtracting the cost of meeting the thermal load from the annual electricity production cost, and then dividing the resulting net electricity production cost by the total electricity demand. The equation for this calculation is provided in Equation (3).

$$COE = \frac{c_{ann,t \circ t} - c_{b \circ iler} H_{served}}{E_{served}}$$
(3)

Where:

 $\begin{array}{ll} c_{ann,t \circ t} & = & \text{Total annualized cost of the system [$/yr]} \\ c_{b \circ iler} & = & \text{Boiler marginal cost [$/kWh]} \\ H_{served} & = & \text{Total thermal load served [kWh/yr]} \\ E_{served} & = & \text{Total electrical load served [kWh/yr]} \end{array}$

The second term in the numerator represents the annual cost component associated with meeting the thermal load of the system. For systems that do not have a thermal load (Hthermal = 0), such as those that only produce electricity (like wind or photovoltaic systems), this term is not considered. The Levelized Cost of Energy (COE) is a metric commonly used to evaluate the economic performance of

different energy systems. However, HOMER does not rank systems solely based on their COE values; it also considers other factors. As a result of the LCOE of the designed system, a cost of \$0.08301 per kilowatt-hour was obtained. This value is higher than the cost of a similarly scaled system powered by grid electricity. However, improvements in current costs and/or the selection of products with different power and cost characteristics in the system design could make this value competitive with grid prices.

2.8.3 Levelized cost of hydrogen (LCOH)

HOMER uses Equation (4) to calculate the Levelized Cost of Hydrogen (LCOH).

$$COH = \frac{c_{ann,t \circ t} - v_{elec} \left(E_{prim,AC} + E_{prim,DC} + E_{def} + E_{grid,sales} \right)}{M_{hydrogen}}$$
(4)

here, $c_{ann,t \circ t}$ represents the total annual cost, v_{elec} is the value of electricity (which is entered in the Hydrogen Load Inputs window), E_{prim} denotes the primary electrical load, E_{def} is the deferrable load, $E_{grid,sales}$ refers to the total energy sold to the grid, and $M_{hydrogen}$ is the total hydrogen production. In the numerator, we aim to determine the annual cost of producing hydrogen by subtracting the annual cost of electricity production. If your system does not meet any electrical load and does not export electricity to the grid, then all these electricity terms will reduce to zero. The value of electricity was entered as \$0.067/kWh. According to HOMER simulation results, the LCOH value of the designed system was calculated to be \$4.50/kg.

2.9 Methodology for carbon emission reduction calculation

This study calculates carbon emission reductions by comparing baseline emissions from fossil fuel consumption with the emissions resulting from the integration of renewable energy and hydrogen technologies. The methodology and formulas used are detailed below:

2.9.1 Baseline emissions calculation

Baseline emissions are calculated by multiplying energy consumption by the carbon intensity of the electricity source Equation (5):

$$E_{baseline} = C_{total} x F_{grid}$$
(5)

where:

Ebaseline	=Base	line carbon	emissio	ns [kg CO	2]
C _{total}	=Total	energy cor	nsumptio	on [kWh]	
F _{grid}	=Grid	electricity	carbon	emission	factor
-0.4.1 CO	/1 33 71 7				

[e.g., 0.4 kg CO₂/kWh]

2.9.2 Project emissions calculation

Emissions from the project, including renewable energy and hydrogen utilization, are calculated as follows Equation (6):

$$E_{prj} = \left(C_{grid} \ x \ F_{grid} \right) + \left(C_{hydrogen} \ x \ F_{hydrogen} \right)$$
(6)

Where:

 E_{prj}

 C_{grid}

=Energy supplied by the grid [kWh]

 $F_{hydrogen}$ =Carbon emission factor for hydrogen production [e.g., 0 kg CO₂/kWh for renewable energy, 0.4 kg CO₂/kWh for grid electricity]

<u>Data Source:</u> Energy data derived from HOMER Pro simulations.

2.9.3 Carbon Emission Reduction Calculation

The reduction in carbon emissions is calculated using the formula Equation (7):

$$E_{reduction} = E_{baseline} x E_{prj}$$
 (7)
Where:

 $E_{reduction}$ = Reduction in carbon emissions [kg CO₂]

2.9.4 Temporal and Source Analysis

<u>Grid Electricity</u>: The emission factor for grid electricity is assumed to be 0.4 kg CO₂/kWh.

<u>Renewable Energy:</u> Emissions for PV and hydrogen generated from renewable sources are assumed to be zero.

<u>Hydrogen Production:</u> Emissions are adjusted based on the energy source used for the electrolyzer.

2.10 Sensitivity analysis

A sensitivity analysis examines how key parameter changes impact system outputs after modeling and evaluation. By examining the impact of variations in different input parameters on system performance, the sensitivity of the system to uncertainties was assessed. HOMER Pro offers various methods for sensitivity analysis. The most commonly used methods include single parameter variation, Monte Carlo simulation, and scenario analysis. In single parameter variation, one parameter in the system is altered by a fixed amount while all other parameters are kept constant, and the system's performance is re-simulated. In Monte Carlo simulation, a probability distribution is defined for each parameter, and multiple simulations are performed using random samples, allowing the investigation of the effects of different parameter combinations on the system. Scenario analysis, on the other hand, involves running simulations under different assumptions (e.g., various climate scenarios) to evaluate the system's performance under varying conditions.

In this study, both sensitivity to uncertainties and fixed parameter-based analysis were performed, taking the values considered to be optimal as the baseline.

3 Findings and discussion

This study employs a comprehensive methodology to optimize the integration of renewable energy sources with hydrogen storage technologies. Initially, data related to the load profile, solar radiation, and temperature of the study area were collected and defined as input parameters for the HOMER Pro software. Subsequently, a hybrid microgrid system was designed, incorporating photovoltaic panels, electrolyzers, hydrogen tanks, energy converters, and grid connections. To evaluate the system's performance, a detailed simulation was conducted using HOMER Pro, analyzing energy production, storage capacity, and cost dynamics.

The simulation results were assessed in terms of energy production and cost-effectiveness, while the potential for reducing carbon emissions was also examined. Optimization efforts were undertaken to enhance the system's environmental and economic efficiency. The findings were validated by comparing them with similar studies in the literature, demonstrating the system's applicability for rural areas. The outcomes of this study provide concrete recommendations for sustainable energy solutions and serve as a valuable reference for future research in the field. The algorithm flow chart is given in (Figure 9).



Figure 9. Algorithm flow chart

In this study, it is acknowledged that electrolyzers require deionized water for hydrogen production. Depending on the salinity level of the water source near the pilot area, a desalination system may be necessary. However, no cost analysis related to a desalination system has been conducted in this study, and this aspect has been omitted from the scope. This assumption was made to perform the analysis within defined boundaries and to focus on the economic feasibility of the current system configuration. Future studies may investigate the impact of desalination requirements on cost calculations based on water quality. It should be noted that this factor could significantly alter total cost estimations, especially for large-scale systems.

In this study conducted in a rural neighborhood of Diyarbakır, a hydrogen-based microgrid model was developed. The simulation results indicated that 61.2% of the system's annual energy demand could be met with renewable energy sources. The hydrogen produced by the electrolyzer met the system's energy storage needs, mitigating the effects of fluctuations in renewable energy generation.

The total capital cost of all components was determined to be \$4620005.00, with total maintenance/repair costs amounting to \$1154828.51, and total fuel costs calculated at \$2189171.79. Disposal costs were calculated to be -\$247223.70. Consequently, the total cost for the system amounted to \$7716781.60. In the graphical representation (Figure 10), the costs of each component are visualized using bar charts, providing a clearer illustration of the cost distribution and the share of each component in the overall cost.

3.1 Grid and PV Performance

The system generates approximately 8345476 kWh of electricity annually. Of this production, 66.5% (around 5553834 kWh) is supplied by solar panels, with the remaining portion met through grid purchases. Electricity production varies significantly with the seasons due to its reliance on solar energy. Production peaks during the sunny summer months, while a decline is observed in the winter (Figure 11) The total annual electricity consumption is approximately 8252687 kWh, with the majority of this consumption classified as an AC primary load. In some months, the system produces more electricity than it consumes. The excess electricity is either stored or sold to the grid. The system includes a hydrogen storage unit, which enables the storage of surplus production for later use. Although the system is not entirely independent, it does purchase electricity from the grid, enhancing its reliability during periods of reduced production. For example, in April, 180579 kWh of energy was purchased and 228710 kWh of energy was sold, resulting in a net sale of 48131 kWh and generating revenue of \$2406.53. In May, 198210 kWh of energy was purchased, while 241126 kWh was sold, leading to a net sale of 42916 kWh and revenue of \$2145.81.

On an annual basis, a total of 2791642 kWh of energy was purchased, and 2296895 kWh was sold. The net energy load amounted to 494747 kWh, with the total grid cost of the system calculated to be \$37342.02.







499

3.2 Electrolyzer performance

In the conducted analysis, the variations in hydrogen load on daily, seasonal, and annual scales have been examined in detail. In the daily profile, the hydrogen load has been determined as a constant 12 kg/hour, indicating a continuous consumption model throughout the analysis. In the seasonal profile, it has been identified that the monthly variations are minimal, and the load exhibits a generally stable demand. In the annual profile, it has been observed that the hydrogen load is distributed uniformly throughout the year, with minor fluctuations due to random variability.

The scaled annual average hydrogen load has been calculated as 70 kg/day, representing the overall demand level of the hydrogen system. The maximum load has been determined as 20.92 kg/hour, while the average load has been identified as 8.05 kg/hour. Additionally, the "Value of Electricity" parameter has been specified as \$0.07/kWh, serving as a critical factor in assessing the cost of hydrogen production. The results demonstrate that the hydrogen demand is consistently met throughout the year, and the costs are maintained at an optimizable level. An annual production of 25579 kg of hydrogen was achieved by the electrolyzer in the system. On the consumption side, the hydrogen load was recorded as 25550 kg, indicating that almost all the hydrogen produced by the system was consumed. These figures, which point to a minimal difference between annual energy consumption and production, demonstrate that the system operates with high efficiency.

Additionally, when examining the monthly hydrogen production graph of the electrolyzer (Figure 12), it is observed that the highest production occurred at the beginning of the year (in January) with approximately 90 kW of energy, while production stabilized around 50 kW in the subsequent months. An increase was observed again in December, which may be due to seasonal conditions or changes in operational requirements.

Such data are crucial for understanding the operational efficiency of the electrolyzer, its sensitivity to seasonal effects, and its capacity to meet energy demands throughout the year. Specifically, the Levelized Cost of Hydrogen (LCOH) for the electrolyzer was calculated to be \$4.50 per kg. This value reflects the cost of hydrogen production and can be considered an important indicator in managing system costs. Notably, this calculated LCOH is below the current

market price for green hydrogen, which ranges between \$5 and \$6 per kg in 2024, demonstrating the potential economic competitiveness of the system under the modeled conditions.

4 Conclusions

The conducted HOMER simulation yielded a LCOE of \$0.08301 per kilowatt-hour for the designed hybrid energy system. This result provides significant insights into the economic performance of the system. The LCOE value of \$0.08301 indicates that the system remains competitive when compared to the average grid electricity price in the region. However, if a lower LCOE value is targeted, some improvements may be necessary. For example, technological innovations such as increasing the efficiency of solar panels, using more efficient electrolyzers, or advancements in hydrogen storage technologies could significantly contribute to reducing costs. Additionally, seeking more cost-effective alternatives for system components or optimizing the purchasing and installation processes could help lower costs. Finding long-term, low-interest financing options is another factor that can reduce the overall cost. Furthermore, optimizing the system to better meet energy demand could help reduce LCOE by minimizing energy losses.

Along with these improvements, closely monitoring fluctuations in the energy market and reassessing the system when necessary is crucial for ensuring the long-term economic sustainability of the system.

In conclusion, while the LCOE value of \$0.08301 demonstrates the economic potential of the system, it also indicates that there is room for improvement. Detailed analyses and optimization efforts could enhance the system's performance and make it more competitive.

The Levelized Cost of Hydrogen (LCOH) for the designed system was calculated to be \$4.50 per kg. This value is above the typical cost range for gray hydrogen but is at a competitive level for green hydrogen production.

The study demonstrates that using renewable energy sources for hydrogen production can reduce carbon emissions and decrease dependence on fossil fuel imports. It is estimated that 0.0254% of Türkiye's target of 695 Mt CO₂ reduction by 2030 could be achieved through the efforts carried out within this project alone. These results could serve as an important reference point for policymakers, investors, and stakeholders who are considering hydrogen investments in urban areas and nationwide.



Figure 12. Monthly production graph for the electrolyzer of the system designed in HOMER Pro

For future studies, a sensitivity analysis using HOMER software could be conducted to examine the system's responsiveness to different variables. Further research could also focus on topics such as the use of intelligent control methods in hybrid systems and the analysis of different control techniques. Factors like project lifespan and salvage values are significant areas of investigation for researchers to understand their impact on the techno-economic outcomes of hybrid systems. Such studies could contribute to determining the optimal configuration of hybrid systems created by integrating different technologies, thereby reducing project investment risks. Additionally, they could enhance analysis efficiency, leading to more accurate and reliable results.

Acknowledgments

We would like to express our sincere gratitude to Dicle Electricity Distribution Co. for their valuable contributions during the data provision phase of this study. Their support made this research possible.

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest regarding this study.

Similarity Rate (iThenticate): 17%

References

- [1] R.A. Satır, 100. Yılında Türkiye Cumhuriyeti'nin Yeni Ekonomik Yol Güzergahı: Yeşil Mutabakat Süreci ve Döngüsel Ekonomi Üzerine Bir Değerlendirme. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Sosyal Bilimler Dergisi, Cumhuriyet'in 100. Yılı Özel Sayısı, 211-224, 2023. https://dergipark.org.tr/en/pub /sufesosbil/issue/80623.
- [2] Y. Demir, Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Tüketimi Ekonomik Büyümeye Katkı Sağlar Mı? Doğuş Üniversitesi Dergisi, 24(2), 271-281, 2023. https://doi.org/10.31671/doujournal.1209964.
- [3] D. E. Olivares, A. Mehrizi-sani, A. H. Etemadi, C. A. Canizares, R. Iravani, M. Kazerani, A. H. Hajimiragha, O. G. Bellmunt, M. Saeedifard, R. P. Behnke, G. A. J. Estevez, and N. D. Hatziargyriou Trends in Microgrid Control. IEEE Transactions on Smart Grid, 5(4), 1905-1919, 2014. https://doi.org/10.1109/TSG.2013. 2295514.
- [4] M.A. Basit, S. Dilshad, R. Badar and S.M. S. Rehman, Limitations, challenges, and solution approaches in grid-connected renewable energy systems. International Journal of Energy Research, 44, 4132-4162, 2020. https://doi.org/10.1002/er.5033.
- [5] A. M. Ferrario, A. Bartolini, F.S. Manzano, F. J. Vivas, G. Comodi, S.J. McPhail and J. M. Andujar, A modelbased parametric and optimal sizing of a battery/hydrogen storage of a real hybrid microgrid supplying a residential load: Towards island operation. Advances in Applied Energy, 3, 100048, 2021. https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100048.

- [6] Q. M. Hassan, A. Abdulateef, S. A. Hafedh, A. Alsamari, J. Abdulateef, A. Z. Sameen, H. M. Salman, A. K. Al-Jiboory, S. Wieteska, and M. Jaszczur, Renewable energy-to-green hydrogen: A review of main resources routes, processes and evaluation. International Journal of Hydrogen Energy, 2023. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.175.
- [7] F. Gutiérrez-Martín, J.M. García-De María, A. Baïri, and N. Laraqi, Management strategies for surplus lectricity loads using electrolytic hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy, 8468-8475, 2009. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.08.018.
- [8] X. Xu, Q. Zhou, and D. Yu, The future of hydrogen energy: Bio-hydrogen production technology. International Journal of Hydrogen Energy, 33677-33698, 2022. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022. 07.261.
- [9] B.S. Zainal, P.J. Ker, H. Mohamed, H.C. Ong, I.M.R. Fattah, S.M. Ashrafur Rahman, L. D. Nghiem, and T. M. I. Mahlia, Recent advancement and assessment of green hydrogen production Technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 113941, 2024. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113941.
- [10] J.J. Brey, Use of hydrogen as a seasonal energy storage system to manage renewable power deployment in Spain by 2030. International Journal of Hydrogen Energy, 17447-17457, 2021. https://doi.org/10.1016/ j.ijhydene.2020.04.089.
- [11] H. Ishaq, I. Dincer, and C. Crawford, A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities. International Journal of Hydrogen Energy, 26238-26264, 2022. https://doi.org/10.1016/ j.ijhydene.2021.11.149.
- [12] M. Neuwirth, T. Fleiter, P. Manz, and R. Hofmann, The future potential hydrogen demand in energy-intensive industries – A site-specific approach applied to Germany. Energy Conversion and Management, 115052, 2022. https://doi.org/10.1016/j.enconman. 2021.115052.
- [13] D. Guilbert and G. Vitale, Hydrogen as a Clean and Sustainable Energy Vector for Global Transition from Fossil-Based to Zero-Carbon. Clean Technologies, 881-909, 2021. https://doi.org/10.3390/cleantechnol 3040051.
- [14] T. Egeland-Eriksen, A. Hajizadeh, and S Sartori, Hydrogen-based systems for integration of renewable energy in power systems: Achievements and perspectives. International Journal of Hydrogen Energy, 31963-31983, 2021. https://doi.org/10.1016/ j.ijhydene.2021.06.218.
- [15] P. Ge, Q. Hu, Q. Wu, X. Dou, Z. Wu and Y. Ding, Increasing operational flexibility of integrated energy systems by introducing power to hydrogen. IET Renewable Power Generation, 14, 372-380, 2020. https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.0663.
- [16] A. Alzoubi, Renewable Green Hydrogen Energy Impact on Sustainability Performance. International

Journal of CIM, 1(1), Dec. 2021. https://doi.org /10.54489/ijcim.v1i1.46.

- [17] M. V. D. Spek, C. Banet, C. Bauer, P. Gabrielli, W. Goldthorpe, M. Mazzotti, S. T. Munkejord, N. A. Røkke, N. Shah, N. Sunny, D. Sutter, J. M. Trusler, and M. Gazzani, Perspective on the hydrogen economy as a pathway to reach net-zero CO₂ emissions in Europe. Energy & Environmental Science, 15, 1034-1077, 2022. https://doi.org/10.1039/D1EE02118D.
- [18] H. Kilic, Improving the performance of microgridbased Power-to-X systems through optimization of renewable hydrogen generation. International Journal of Hydrogen Energy, 75, 106-120, 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.066.
- [19] H. Kilic, M. E. Asker, and C. Haydaroglu, Enhancing power system reliability: Hydrogen fuel cell-integrated D-STATCOM for voltage sag mitigation. International Journal of Hydrogen Energy, 75, 557-566, 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.313.
- [20] Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası. ETKB, 2023. https://enerji.gov.tr/Media/ Dizin/SGB/tr/Kurumsal_Politikalar/HSP/ETKB_Hidr ojen_Stratejik_Plan2023.pdf
- [21] On İkinci Kalkınma Planı (2024-2028). T.C. SBB, 2023. https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/ 2023/12/On-Ikinci-Kalkinma-Plani_20242028_1112 2023.pdf.
- [22] İ. Çetinbaş, B. Tamyürek, and M. Demirtaş, Design, Analysis and Optimization of a Hybrid Microgrid System Using HOMER Software: Eskişehir Osmangazi University Example. International Journal of Renewable Energy Development, 8(1), 65-79, 2019. https://doi.org/10.14710/ijred.8.1.65-79.
- [23] S. Vendoti, M. Muralidhar and R. Kiranmayi, Technoeconomic analysis of off-grid solar/wind/biogas/biomass/fuel cell/battery system for electrification in a cluster of villages by HOMER software. Environment Development and Sustainability, 23, 351–372, 2021. https://doi. org/10.1007/s10668-019-00583-2.
- [24] F. Dawood, G. Shafiullah and M. Anda, Stand-Alone, Microgrid with 100% Renewable Energy: A Case Study with Hybrid Solar PV-Battery-Hydrogen. Sustainability, 12, 2047, 2020. https://doi.org /10.3390/su12052047.
- [25] T. Xia, M. Rezaei, U. Dampage, S.A. Alharbi, O. Nasif, P. F. Borowski and M.A. Mohamed, Techno-Economic Assessment of a Grid-Independent Hybrid Power Plant for Co-Supplying a Remote Micro-Community with Electricity and Hydrogen. Processes, 9(8), 1375, 2021. https://doi.org/10.3390/pr9081375.
- [26] İ. Çetinbaş, B. Tamyürek, and M. Demirtaş, Design, Analysis and Optimization of a Hybrid Microgrid System Using HOMER Software: Eskişehir Osmangazi University Example. International Journal of Renewable Energy Development, 8(1), 65-79, 2019. https://doi.org/10.14710/ijred.8.1.65-79.
- [27] A. F. Güven and M. Mete, Balıkesir İli Erdek İlçesi için Bağımsız Hibrit Enerji Sisteminin Fizibilite Çalışması

ve Ekonomik Analizi. KONJES, 9(4), 1063–1076, 2021. https://doi.org/10.36306/konjes.978002.

- [28] V. Suresh, M. Muralidhar, and R. Kiranmayi, Modelling and optimization of an off-grid hybrid renewable energy system for electrification in rural areas. Energy Reports, 6, 594-604, 2020. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.01.013.
- [29] S. Bhattacharjee, S. Chakraborty and C. Nandi, An Optimization Case Study of Hybrid Energy System in Four Different Regions of India. In: A. Bhoi, K. Sherpa, A. Kalam, and G.S. Chae (Eds.), Advances in Greener Energy Technologies, Green Energy and Technology, Springer, Singapore, pp. 399-437, 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4246-6_23.
- [30] Y. Basheer, A. Waqar, S. M. Qaisar, T. Ahmed, N. Ullah and S. Alotaibi, Analyzing the Prospect of Hybrid Energy in the Cement Industry of Pakistan, Using HOMER Pro. Sustainability, 14(19), 12440, 2022. https://doi.org/10.3390/su141912440.
- [31] M. H. Jahangir and R. Cheraghi, Economic and environmental assessment of solar-wind-biomass hybrid renewable energy system supplying rural settlement load. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 42, 100895, 2020. https://doi.org /10.1016/j.seta.2020.100895.
- [32] A. Amupolo, S. Nambundunga, D.S.P. Chowdhury, and G. Grün, Techno-Economic Feasibility of Off-Grid Renewable Energy Electrification Schemes: A Case Study of an Informal Settlement in Namibia. Energies, 15(12), 4235, 2022. https://doi.org/10.3390/en 15124235.
- [33] C. Palanichamy, T. W. Wen and P. Naveen, A microgrid for the secluded Paana Theertham Kani settlement in India. Clean Energy, 6(1), 43–58, 2022. https://doi.org/10.1093/ce/zkab055.
- [34] S. El Hassani, F. Oueslati, O. Horma, D. Santana, M. A. Moussaoui and A. Mezrhab, Techno-economic feasibility and performance analysis of an islanded hybrid renewable energy system with hydrogen storage in Morocco. Journal of Energy Storage, 68, 107853, 2023. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107853.
- [35] M. Yılmaz, B. Gümüş, H. Kılıç and M. E. Asker, Chaotic analysis of the global solar irradiance. IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), San Diego, CA, USA, pp. 1058-1066, 2017. https://doi.org/10.1109 /ICRERA.2017.8191219.
- [36] M. A. G. Dahmani and M. Arfa, The Analysis of the Integration of Green Hydrogen Into Energy Networks Using HOMER PRO, 2024. https://www.researchgate .net/publication/382241730_The_Analysis_of_the_Int egration_of_Green_Hydrogen_Into_Energy_Networks _Using_HOMER_PRO.
- [37] H. Kılıç, B. Gümüş and M. Yılmaz, Güneydoğu Anadolu bölgesi için global güneş ışımasının ve güneşlenme süresinin istatiksel metodlar ile tahmin edilmesi ve karşılaştırılması. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 7(1), 73-

83, 2016. https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/302870.

[38] H. Kılıç, B. Gümüş, ve M. Yılmaz, Diyarbakır İli İçin Güneş Enerjisi Verilerinin Meteorolojik Standartlarda Ölçülmesi ve Analizi. EMO Bilimsel Dergi, 5(10), 15– 19, 2016. https://dergipark.org.tr/tr/pub/emobd/issue/ 26509/278951.



NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 504-515



Araștırma makalesi / Research article

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



Kohezif ara yüzey elemanlar aracılığıyla dairesel yığma kemerlerin sistematik olarak modellenmesi ve kırılma mekanizmalarının belirlenmesi

Modeling of circular masonry arches systematically via cohesive interface elements and determination of failure mechanisms

Sedat Kömürcü^{1,*} 🝺

^{1*}İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul Türkiye

Öz

DİSLİK FAKÜLTES

Bu çalışmada, yığma kemerler geliştirilen basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği ile modellenmekte ve yığma kemerlerin doğrusal olmayan davranışları 3 boyutlu sonlu elemanlar kullanılarak analiz edilmektedir. Yığma kemerlerin doğrusal olmayan davranışı, kohezif bölge malzemesi (KBM) kullanılarak temas ve hedef elemanlarla elde edilmektedir. Sunulan modelde, yığma kemerleri oluşturan yığma birim sayısı, yığma birimlerin yerleştirildiği açı değeri, kemer üzerinde yükün etki ettiği bölgeler göz önüne alınarak sistematik şekilde ara yüzey elemanlar oluşturulmaktadır. Ayrıca yığma kemerlerin analizlerinde önemli bir aşama olan yığma kemer geometrisinin oluşturulması konusunda pratik bir yaklaşım sunulmaktadır. Böylece farklı geometrik parametrelere yığma kemerler modele kolaylıkla sahip dâhil edilebilmektedir. Oluşturulan model ile hem düzlem içi hem de düzlem dışı davranış incelenebilmektedir. Oluşturulan model ile yığma kemerlerin kırılma mekanizmaları pratik şekilde analiz edilmekte ve model kullanılarak mafsal bölgeleri başarıyla belirlenmektedir. Bu çalışmayla yığma kemerlerin doğrusal olmayan davranışlarının analizine katkı sağlayan bir model sunularak bu yapıların analizleri için pratik olarak kullanılabilir bir çözüm aracı ortaya konulmaktadır.

Anahtar kelimeler: Basitleştirilmiş mikro modelleme, Kırılma mekanizması, Kohezif bölge malzemesi, Plastisite, Yığma kemer

1 Giriş

Yığma kemerler, tarih boyunca mühendislik dehası ve estetiğin birleşimini temsil eden temel bir mimari ve yapısal unsur olarak kullanılmışlardır. Mezopotamya, Mısır, Yunan, Roma ve Türk mimarilerinde kemerli ve tonozlu yapıların oldukça sık kullanıldığı bilinmektedir. Kemerlerin inşa yöntemleri ve analizleri, eski çağlardan beri mimarlık ve mühendislik alanlarında önemli konular olup kemerlerin dayanım ve stabilitesi ile ilgili çeşitli problemler her zaman var olmuştur. Harcın düşük çekme mukavemeti ve tuğla veya bloklar arasındaki zayıf bağlantılar nedeniyle, yığma yapı elemanları çekme ve eğilme dayanımları açısından zayıflık göstermektedirler. Bu durum, yapıların taşıma kapasitesini azaltarak tasarım seçeneklerini kısıtlamaktadır. Tarihi yığma

Abstract

In this study, masonry arches are modeled using developed simplified micro modeling technique and nonlinear structural behavior of masonry arches are analyzed using 3D finite element models. Nonlinear behavior of masonry arches is obtained with the contact and target elements using cohesive zone material (CZM) model. Interface elements are systematically created by taking into account the number of masonry units, the angle value at which the masonry units are placed, and the loading conditions. In addition, a practical approach is presented for the creation of the geometry of the masonry arch, which is an important stage in the analysis of masonry arches. In this way, masonry arches with different geometric parameters can be easily included in the model. Hinge zones are also determined with this model very efficiently. With the created model, both in-plane and out-of-plane behavior can be examined. It is seen that; the collapse mechanisms of masonry arches can be analyzed practically and the hinge regions are determined successfully using the model. In this study, a model that contributes to the analysis of nonlinear behavior of masonry arches is presented and a practically usable solution is presented for the analysis of these structures.

Keywords: Cohesive zone material, Fracture mechanism, Masonry arch, Plasticity, Simplified micro modeling technique

kemerlerin analizi, korunması ve restorasyonu gibi konularda kemerlerin davranışları hakkında araştırmalar devam etmekte olup özellikle yığma kemerlerin modellenmesi ve sayısal analizler günümüzde önemli çalışma alanlarıdır.

Kemer yapılar, dayanıklı ve yüksek mukavemetli yığma yapıların inşası amacıyla birçok yapıda çeşitli formlarda kullanılmışlardır. Ancak yığma malzeme kullanılarak oluşturulan kavisli elemanların yapısal davranışlarını anlamak son derece karmaşık bir konudur. Heyman'ın yığma yapıların sınır analizi teorisi üzerine yaptığı öncü çalışma, yığma kemerlerin yapısal davranışını anlamak adına temel bir çalışmadır [1]. Heyman'ın teorik çalışmaları, hesaplamalı ve analitik modellerin gelişiminde önemli rol oynamıştır.

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: komurcus@itu.edu.tr (S. Kömürcü) Geliş / Received: 25.11.2024 Kabul / Accepted: 28.01.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngmuh.1590866

Lourenço, yığma yapılar için ileri düzey modelleme yöntemleri sunarak birçok çalışmaya ilham kaynağı olmuştur [2]. Çalışmada sunulan modelleme teknikleri, özellikle bilgisayar kullanımıyla yaygınlaşan sayısal modellere örnek teşkil etmektedir.

Çeşitli yükleme koşulları altında yığma kemerlerin davranışını anlamak için deneysel ve sayısal analizler önemli birer rol ovnamıştır. Gecmişten günümüze vığma kemerlerin analizleri konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Bir çalışmada, çeşitli geometrilerde oluşturulan yığma kemerlerin yanal yük taşıma kapasiteleri ve minimum kalınlıkları araştırılmıştır [3]. Başka bir çalışmada, kemerli yığma duvarların statik yüklere karşı düzlem dışı davranışları üzerine çalışma yapılmıştır [4]. Yığma kemerlerin inşasında kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi de oldukça önemli bir konudur. Yığma kemerlerin sonlu eleman yapısal analizinde elastisite modülünün etkisi araştırılmıştır [5]. Bir diğer çalışmada yığma kemerlerin en uygun itme eğrilerini belirlemek için sayısal bir yaklaşım gerçekleştirilmiştir [6]. Yığma kemerlerin analizlerinde kullanılmak üzere çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Yığma kemerlerin doğrusal olmayan davranışının değerlendirmesi için ayrık makro elemen yöntemi önerilmiştir [7]. Bir diğer çalışmada yığma kemerler için kuvvet tabanlı eğri eksenli bir kiriş elemanı önerilmiştir [8].

Yığma kemerler özellikle tarihi köprülerde yaygın olarak kullanılmıştır. Bu amacla yığma köprülerde kemerlerin kullanımı üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Yığma kemer köprülerin geometrik özelliklerinin yapının dayanımına olan etkisi araştırılmıştır [9]. Yığma kemer köprülerde kullanılan dolgu malzemesinin modellenmesi için bir yaklaşım önerilmiştir [10]. Tarihi yığma kemerler için özellikle kritik bir konu olan sismik performans birçok çalışmada incelenmiştir. De Felice ve Giannini, kemer yapıların sismik davranışını ve düzlem dışı direncini araştırarak zayıflıkları vurgulamış, analiz ve koruma yöntemleri önermiştir [11]. Yığma kemer köprüler konusunda bir diğer sismik araştırma Pela ve ark. tarafından yapılmıştır [12]. Bir diğer çalışmada yığma kemerler için sismik kapasitenin parametrik olarak incelemesi yapılmıştır [13]. Düzensiz temellere ve kemer kalınlığına sahip yığma kemerlerin sismik kapasitesi incelenmiştir [14]. Bir diğer çalışmada, güçlendirilen yığma kemerlerin deneysel testleri ve sayısal modellemesi yapılmıştır [15]. Çeşitli kompozitlerle güçlendirilmiş antik yığma kemerler ve tonozlar sayısal olarak analiz edilmiştir [16].

Valluzzi ve ark. laminatlarla güçlendirilen tuğla örtülü kemerlerin davranışı üzerine bir çalışma gerçekleştirdiler. Bu çalışmada, dış veya iç yüzeylerinden elyaf takviyeli polimer (FRP) şeritlerle güçlendirilmiş tuğla örgülü tonozlar üzerinde yapılan deneysel araştırmanın sonuçlarını sundular [17]. Milani ve Lourenço, yığma kemer köprülerinin 3 boyutlu doğrusal olmayan davranışını incelediler [18]. Yığma köprülerinin statik doğrusal olmayan davranışı, sonlu elamalar ile sayısal olarak analiz edilerek özellikle yapıların eksantrik yüklere maruz kaldığındaki davranışı ve dolgunun neden olduğu güçlendirme etkisi dikkate alınmıştır. Michiels ve Adriaenssens, düzlem içi deprem yüklemesi etkisinde olan yığma kemerler için bir yapısal form elde etme algoritması geliştirdiler [19]. Lewis ve ark. yeni bir kemer formunu analiz ederek, bu formu geleneksel kemer formlarıyla karşılaştırdılar [20]. Liu ve ark. tek ve çok gözlü yığma kemer köprülerinin çatlak yayılımlarını ve genel kırılma mekanizmalarını incelediler [21]. Grosman ve ark. kemerli köprü ve viyadüklerin sonlu eleman analizleri için sonlu elemanlar ağının oluşturulması için yeni bir parametrik model tasarladılar [22]. Bertolesi ve ark. özellikle FRP takviyeli duvar kemerlerinin analizi için tasarlanmış basit ve güvenilir bir sonlu eleman modeli sundular [23].

Tarihi yığma kemerlerin analizi, bu yapıların korunması için kritik bir öneme sahiptir. Kemerler ve kubbeler gibi yığma yapı elemanlarının çökme davranışları üzerine yapılan çalışmalar, bu yapıların mekanik özelliklerinin yanı sıra çevresel etkilerle nasıl etkileşimde bulunduğunu anlamaya yönelik önemli bulgular sunmaktadır. Aita ve ark. yığma kemerler ve kubbelerde sürtünme ve basınç dayanımındaki belirsizliklerin etkilerini incelemiştir. Bu çalışmada, sınırlı sürtünme ve belirsizlikler dikkate alınarak yapılan analizler, yığma yapılar için daha gerçekçi çökme modelleri sunmaktadır [24]. Avasthi ve Rai, yığma kemerlerin deprem altındaki davranışını, derzlerdeki çekme dayanımını da göz önüne alarak analiz etmiştir. Bu çalışma, yığma kemerlerin dinamik yükleme altındaki davranışına ışık tutmakta ve bu tür yapıların deprem dayanıklılığını artırmak için tasarım stratejileri önermektedir [25]. Pingaro ve ark. uzun acıklıklı tarihi kubbelerde meydana gelen cökme risklerini değerlendirmek icin ileri düzev sonlu eleman modelleri gelistirmistir. Bu modeller, özellikle kubbe tepe noktalarındaki ağır yüklerin etkilerini detaylı bir şekilde analiz ederek yapının zayıf noktalarını ortaya koymaktadır [26]. Varró ve ark. taş yığma kemerlerin güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş durumlarını laboratuvar testleri ve sayısal analizlerle incelemiştir. Çalışma, güçlendirme yöntemlerinin yığma yapıların dayanımını artırmada ne kadar etkili olduğunu göstermektedir [27]. Zampieri ve ark. yığma kemerlerde hasarın sismik çökme davranışına olan etkilerini araştırmıştır. Bu çalışma, hasar seviyesinin kemer stabilitesini nasıl etkilediğini açıklamaktadır [28]. Zhao ve ark. yığma kemerlerin çökme süreçlerini analiz etmek için iki aşamalı bir modelleme stratejisi önermiştir. Bu yöntem, yığma kemerlerin davranışını daha iyi anlayarak, yapıların çökme mekanizmalarını daha hassas bir şekilde tahmin etmeyi sağlamaktadır [29]. Yığma yapıların sismik davranışını ve kırılma mekanizmalarını inceleyen çalışmalar yapılmıştır [30-33]. Farklı modelleme stratejileri ve deneysel vaklasımlar, yığma yapıların mekanik davranışını daha iyi anlamaya ve bu yapıların korunmasını optimize etmeye olanak sağlamaktadır.

Bu çalışmada yığma kemerler, sistematik bir şekilde kohezif ara yüzey malzemesi kullanılarak modellenerek, yığma kemerlerde çeşitli yüklemeler altında ortaya çıkan kırılma mekanizmaları belirlenmektedir. Yığma kemerler için hem malzeme hem de ara yüzey elemanlar açısından yüksek derecede doğrusal olmayan bir davranışın incelenmesine olanak sağlayan bir sayısal modelin sunulması ve kemerlerin kırılma mekanizmaların pratik ve etkili bir şekilde belirlenmesi bu çalışmanın önemli sonuçları arasındadır.

Çalışmanın kısımları şu şekilde sıralanmaktadır: Öncelikle yığma kemerlerin sayısal olarak modellenmesi kısmı sunulmaktadır. Bu amaçla, geometrik parametrelerin sistematik olarak kullanılması, kohezif bölge malzeme (KBM) modelinin özellikleri ve yığma birimler arasındaki ara yüzeylerin modellenmesi incelenmektedir. Sonrasında oluşturulan modelin performansı farklı şekillerde yüklenen üç adet yığma kemer örneği ile sunulmaktadır. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi ve sonuçlar kısımlarıyla çalışma tamamlanmaktadır.

2 Yığma kemer sistemin modellenmesi

Yığma kemerleri oluşturan yığma birimler ve harcın modellenmesi için basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği farklı bir bakıs açısıyla ele alınmakta ve sistematik bir yöntem sunulmaktadır. Bu yöntemin esası, yığma birimleri birbirine bağlayan harcın ayrı bir eleman olarak modellenmeyerek harcın yaptığı etkinin ara yüzey elemanlarla oluşturulmasına dayanmaktadır. Kullanılan semboller, metnin sonundaki semboller listesinde ayrıca belirtilmektedir. Şekil 1'de kemeri oluşturan yığma birim eleman görülmektedir. Burada Ri kemerin iç yarıçapını, Rd kemerin dış yarıçapını, t ise kalınlığını göstermektedir. Yığma kemer oluşturulurken θ açısına göre kemerin alacağı form belirlenmektedir. Yığma birim elemanı oluşturan köşe kısımları ABCDEFGH olarak isimlendirilmektedir. Elemanı meydana getiren 6 adet yüzey alanı şekilde görüldüğü üzere 1-2-3-4-5-6 olarak numaralandırılır. Bu numaralandırma yığma sistemi kemer formunun olusturulmasını pratikleştirmektedir. Yığma kemeri oluşturan yığma birimler, alan numaralandırma sistemi göz önüne alınarak sistematik şekilde oluşturulmaktadır.



Şekil 1. Yığma birim geometrik parametreleri ve alan numaralandırması

2.1 Kohezif bölge malzemesi (KBM) davranışı

Yığma yapılar gibi birden fazla malzemenin kullanılmasıyla oluşturulan kompozit malzemelerde, kırılma ve ayrılma gibi durumlar malzemelerin tokluk ve süneklik gibi özelliklerini kısıtlamalarından ötürü yapısal analizlerin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi hususunda önemli birer rol oynarlar. Malzemeler arasındaki ara yüzeylerin bünye bağıntısını teşkil eden KBM, ara yüzeylerin birbirlerinden ayrılması için gerekli olan enerji olarak bilinen kritik kırılma enerjisi kavramını kullanarak yüklemeler ve ayrılma miktarı arasındaki ilişki sayesinde yapıda oluşacak olan kırılma mekanizmalarının belirlenmesini sağlar.

KBM modellenirken ara yüzey veya kontakt elemanlardan faydalanılır. KBM için malzeme davranışı bilineer veya eksponansiyel olarak seçilebilir. Buna ek olarak, malzemenin davranışı farklı modlara göre ayrı ayrı veya iki modun birleşimi şeklinde ele alınmaktadır. Ayrıca seçilen malzeme modeli, kritik kırılma enerjisi veya yüzeylerde meydana gelen ayrılmalar şeklinde farklı açılardan modellenebilir. Bu hususlar düşünüldüğünde, ara yüzey elemanlar veya kontakt elemanlarda kullanılan malzeme modelinin davranışının belirlenmesinin detaylı ve önemli bir durum olduğu görülmektedir.

Şekil 2'de görülen grafik kohezyonlu ek yerleri için çekme-ayrılma malzeme kanununu göstermektedir. Bu kanun, birbirine yapışmış malzemelerin gerilme altında nasıl ayrıldığını tanımlamak için kullanılır.



Şekil 2. Kohezif birleşimlerde malzeme davranışı

Burada görülen dikey eksen çekmeyi (birim alan başına kuvvet, yani gerilme) temsil eder. Yatay eksen ayrılmayı (yer değiştirme veya ayrılma mesafesi) temsil eder. Eğri, çekme gerilmesinin ayrılma ile nasıl değiştiğini gösterir. Başlangıçta ayrılma arttıkça çekme artar ve bir tepe değerine ulaşır. Tepe noktasından sonra, ayrılma artmaya devam ettikçe çekme azalır, bu da malzeme yumuşamasını ve nihayetinde kopmasını gösterir. Bu grafikte $\tau_n^0, \tau_s^0, \tau_t^0$ farklı yönlerdeki başlangıç çekme değerleri. δ_n^0 , δ_s^0 , δ_t^0 farklı yönlerdeki başlangıç ayrılma değerleri. δ_n^f , δ_s^f , δ_t^f malzemenin tamamen koptuğu noktadaki son ayrılma değerlerini göstermektedir. Çekme-ayrılma eğrisinin altındaki alan Gc olarak belirtilir ve bu kırılma enerjisini temsil eder. Bu, malzemeyi ayırmak için gerekli olan enerjidir. K_n, K_s, K_t malzemenin farklı yönlerdeki ayrılmaya karşı direncini temsil eden rijitlik parametreleridir. Bu

değerler Denklem (1) ve Denklem (2) kullanılarak hesaplanabilir. Grafik, bir kohezyonlu malzemenin, onu ayırmaya çalışan kuvvetlere maruz kaldığında nasıl davrandığını göstermektedir. Malzeme başlangıçta ayrılmaya karşı direnç gösterir, ancak belirli bir noktadan sonra direnç azalır ve bu da malzemenin kopmasına neden olur. Bu kanun, malzemelerin ve yapıların incelenmesinde, özellikle yapışmış ek yerlerinin gerilme altında nasıl davrandığını anlamada önemlidir ve malzeme biliminde ve yapısal analizlerde sıklıkla kullanılır.

$$K_n = \frac{E_t E_h}{h_h (E_t - E_h)} \tag{1}$$

$$K_t = K_s = \frac{G_t G_h}{h_h (G_t - G_h)} \tag{2}$$

2.2 Ara yüzeylerin modellenmesi

Modelin oluşturulmasında önemli adımlardan birisi yığma birimler arasında bulunan ve harcı temsil etmek üzere de kullanılan ara yüzeylerin oluşturulmasıdır. Bu çalışmada, yığma birimler arasında bulunan kontakt elemanlar (hedef ve temas) Tablo 1 ile gösterilen kod yapısı ile oldukça pratik bir şekilde oluşturulabilir.

7111 4	T	1 1 0	1 .		1	• 1	•
Tablo I.	l emas ve	hedet v	nzevlern	i fanim	lanması	18	emi
14010 10		neaer y	allejiein	1 000111111	iaiiiiaoi	191	VIIII

Temas yüzeyleri	Hedef yüzeyleri
*do,i,2,(((ts-1)/2)+1)	*do,i,1,(((ts-1)/2)-1)
i=i*6	i=i*6+(2+((ts-1)/2))*6
ASEL,A,,,i	ASEL,A,,,i
*enddo	*enddo
*do,i,1,(((ts-1)/2)+1)	*do,i,1,((ts-1)/2)
i=5+(i-1)*6	i=(((2+((ts-1)/2))*6)-1)+(i-1)*6
ASEL,A,,,i	ASEL,A,,,i
*enddo	*enddo

Burada "ts" kullanılan tuğla sayını ifade etmektedir. Elemanların oluşturulmasında Şekil l'de sunulan numaralandırma sisteminden faydalanılmaktadır. Bu sayede alan numaraları sistematik bir şekilde tekrarlanarak istenilen sayıda ara yüzey kontakt elemanlar ile teşkil edilmektedir. Ortaya konulan kod sisteminde öncelikle tek numaralı ve sonrasında çift numaralı yığma kemer birimler olusturulmaktadır. Kullanılan 6 rakamı vığma kemer birimleri oluşturan yüzey sayısını temsil etmektedir. Yığma kemer birimleri olusturulduktan sonra birimler arasındaki ara yüzeyler tanımlanmaktadır. Bu aşamada da ara yüzey elemanlar, sistematik olarak yığma birimler arasına numaralandırma sırasına göre atanmaktadır.

Oluşturulan modelleme sistematiği sayesinde çeşitli geometrik parametrelere sahip kemer yapılar pratik şekilde modellenebilmektedir. Sunulan modelleme sistematiği kullanılarak modellenebilen dairesel kemer formları Şekil 3'te görülmektedir. Bu tür kemer formları, yapısal davranışları ve yük taşıma kapasiteleri açısından farklılık gösterirler. Yarım dairesel kemer, yığma yapıların en yaygın türlerinden biridir ve yükü her iki mesnede eşit olarak dağıtır. Simetrik yapısı nedeniyle, dengeli bir yük dağılımı sağlar. Yüksek basınca dayanıklı olduğu için tarihi yapılarda yaygın kullanılır. Düz formlu kemerler daha az kavisle oluşturulur. Daha düz bir profile sahip olduğu için, genellikle düşük yük taşıma kapasitelerine sahiptir ve daha kısa açıklıklar için kullanılır. Eliptik veya yassı formdaki kemerler, genis acıklıklar geçmek için tasarlanabilir. Ançak, tepe kısmında yüksek çekme gerilmelerine maruz kalabilir. Bu da catlak oluşumunu hızlandırabilir. Farklı kemer formları, tasarım sırasında yapının taşıması gereken yüke, açıklık genişliğine ve malzemenin özelliklerine göre seçilir. Bu formlar arasında yük taşıma kapasitesi ve stabilite açısından belirgin farklar bulunur.



Şekil 3. Kullanılan modelleme sistematiği ile oluşturulan kemer formları

3 Sayısal örnekler

Bu bölümde oluşturulan modelin yapısal analizlerdeki performansını değerlendirmek üzere sayısal örnekler sunulmaktadır. Yapılan analizler sonucunda yığma kemerlerin farklı yüklemeler sonucundaki kırılma mekanizmaları belirlenmektedir.

3.1 Model parametreleri

Yığma kemerlerin kırılma mekanizmalarını ANSYS [34] yazılımı ile analiz etmek amacıyla literatürde deneysel olarak incelenen kemer örneğinin geometrik ve malzeme parametreleri kullanılmaktadır [8, 15]. Açıklık L=920 mm, yüksekliği H=510 mm ve kalınlığı t=255 mm olan yığma kemer oluşturulmaktadır. Kemerin dış yarıçapı R_d=576 mm ve iç yarıçapı R_i=456 mm. Tuğlaların ölçüleri boy k=R_d-R_i=120 mm, en b=65 mm'dir. Tuğla eni ölçüsü 10 mm olan harç kalınlığını da içermektedir. Yığma birimler θ =8° açı ile teşkil edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan tuğla ve harcın elastisite modülü tuğla için E_t=16000 MPa ve harç için E_h=1500 MPa olarak verilmektedir. Poisson oranı değerleri ise tuğla için v_t=0.2, ve harç için v_h=0.2'dir. Kayma modülleri tuğla için G_t=6666,67 MPa ve harç için G_h=625 MPa olarak verilmektedir.

Yığma kemerin KBM parametreleri; maksimum normal temas gerilimi σ_0 =0,005 MPa, maksimum eşdeğer teğetsel temas gerilimi τ_0 =1 MPa, Mod I normal ayrılma için kritik kırılma enerjisi G_{kI}=0,0003 MPa ve Mod II teğetsel kayma için kritik kırılma enerjisi G_{kII}=0,004 MPa'dır. Numerik analizler için yapay sönümleme katsayısı η =0'dır, normal basınç temas gerilmesi altında teğet kayma ayarı β =1 olarak seçilmiştir. Temas yüzeylerindeki sürtünme katsayısı μ =0,5'tir. Yığma birleşim yerlerinin normal doğrultudaki K_n rijitliği ile birinci kesme yönündeki K_s rijitliği ve ikinci kesme yönündeki K_t rijitliği Denklem (1) ve Denklem (2) yardımıyla; K_n=165 MPa, K_s=K_t=69 MPa olarak hesaplanır.

KBM modeli, malzemelerde çatlak oluşumu ve ilerlemesini modellemek etmek için kullanılır. Mikro düzeyde çatlak uçlarındaki gerilme ve deformasyonları modelleyen bu yöntem, çatlak başlangıcını ve ilerlemesini enerji temelli bir yaklaşımla tanımlar. Gerilme-yer değiştirme ilişkisi üzerinden, malzeme elastik davranıştan nihayetinde kopmaya geçiş hasara ve sürecini göstermektedir. Kırılma enerjisi, maksimum gerilme ve elastisite modülü gibi parametreler yardımıyla malzeme icindeki kopma ve hasar mekanizmaları tanımlanır. Bu model, beton, kompozit malzemeler ve vığma yapılar gibi kırılma mekaniğinin kritik olduğu mühendislik uygulamalarında, çatlak oluşumu ve yük taşıma kapasitesinin analiz edilmesi için kullanılır.

İki cisim arasındaki temas problemi, rijitliğin aniden kaybolması veya yeniden ortaya çıkması açısından ele alınması en zor doğrusal olmayan durumlardan biridir. Yığma kemerler açısından iki cisim arasındaki temas problemi, yığma birimler ve harç tabakaları veya doğrudan taş birimler arasındaki mekanik etkileşimleri anlamak için önemlidir. Her bir yığma birim, üzerindeki yükleri temas ettiği komşu birimlere iletir ve bu iletim sırasında temas yüzeylerinde basınç ve kayma gerilmeleri oluşur. Temas yüzeylerinin mekanik davranışı, özellikle harç tabakalarının elastik, plastik veya kırılma özellikleriyle belirlenir. Yük altında, temas bölgelerinde mikro çatlaklar ve plastik mafsallar oluşabilir, bu da taş birimleri arasındaki temas alanını küçülterek gerilme yoğunluklarını artırır. Ayrıca, taş birimleri arasında genellikle bir sürtünme kuvveti bulunur ve bu sürtünme, kemerin stabilitesine önemli katkı sağlar: ancak aşırı yükleme durumunda sürtünme yetersiz kalabilir ve kırılma gerçekleşebilir. Temas problemlerinin analizi, genellikle sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmaktadır. Analiz için 8 düğüm noktasına sahip SOLID65 elemanı kullanılmıştır. Her düğümün x, y ve z yönlerinde üç yer değiştirme serbestlik derecesi vardır. Eleman, hem çekmede hem de basınçta kırılma mekanizmalarını gösterebilir. Tuğla yığma birimler için bu eleman kullanılarak standart mesh ağı elde kullanılmaktadır. Yığma birimler arasında kullanılan CONTA174 ve TARGE170 elemanları yüzeysel elemanlardır. Temas ve hedef yüzeyler arasındaki etkileşimi göstermek için kullanılırlar [34]. Tuğlalar arasında teşkil edilen ara yüzeyler örnek olarak Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. Temas ve hedef elemanların kullanıldığı ara yüzeyler

Sınır koşulları olarak analizlerde kemerlerin sağ ve sol uç noktalarındaki yüzeyler mesnet olarak tamamen sabitlenir. Yüklemeler deplasman kontrollü şekilde kemer üst kısmından yapılır. Ayrıntılı bir veri seti elde etmek ve doğrusal olmayan analizin başarılı bir şekilde tamamlanabilmesi için yükleme işlemi 50 alt adıma bölünmüştür. Deplasman kontrollü yüklemede, kemer üzerine uygulanan yük miktarı yerine, yapının belirli bir noktasındaki yer değistirme miktarı kontrol edilir ve yükleme, bu deplasman doğrultusunda artırılır. Örneğin, kemerin tepe noktası veya açıklık ortasında bir yük uygulanıyorsa, bu yükleme, o noktadaki yer değiştirme değerine göre ayarlanır. Bu yöntem, özellikle kemerin kırılma davranışını ve yük taşıma kapasitesini anlamak açısından önemli bir husustur. Bu sayede, kemerin çatlak oluşumu, plastik mafsalların gelişimi ve mekanizma haline gelme süreci adım adım izlenebilir. Deplasman kontrollü yükleme, yığma kemerlerin taşıma kapasitesini, kırılma mekanizmasını ve stabilitesini detaylı bir şekilde analiz etmek için uygun bir yükleme türüdür.

3.2 Yükleme 1: Kemer üst noktasından simetrik yükleme

Bu bölümde en üst noktasından, genellikle kilit taşı olarak adlandırdığımız yığma birim üzerinden yüklenen kemer örneği Şekil 5'te görülmektedir. Kemer 23 adet yığma birim ve yığma birimler arasında teşkil edilen KBM modeli ile oluşturulmaktadır.



Şekil 5. Kemer en üst noktasından yükleme durumu

Analizler sonucunda yığma kemerlerin kırılma mekanizmaları Şekil 6'da detaylı olarak sunulmaktadır. Burada analiz sonuçlarında görülen yapıda meydana gelen maksimum yer değiştirme (d) değerine göre meydana gelen deformasyonlar adım adım görülmektedir. Şekilde yığma kemerlerin artan deformasyon miktarına (d) göre yapısal davranışlarını ve kırılma mekanizmaları görülmektedir. Yığma kemerdeki birimlerin d=0 mm'den d=0.01 mm'ye kadar artan deformasyonlar altında nasıl hareket ettiği ve birbirleriyle bağlantılarının değiştiği olan nasıl gözlemlenebilir. Bu tür deformasyon analizleri, kemerin yük altında kırılma mekanizmalarını belirlemeye yardımcı olur. Baslangıç durumunda (d=0 mm), kemerin bütünlüğü korunmus, tüm taslar birbirine sıkıca bağlıdır. Ancak deformasyon arttıkça (d=0.002 mm'den d=0.01 mm'ye kadar), taşlar arasında açıklıklar oluşmakta ve bazı bölgelerde ayrılmalar gözlemlenmektedir. Özellikle d=0.008 mm ve sonrasında kemerin tepe noktasında belirgin bir açıklık oluşmaktadır. Bu durum, kemerin yük altında maruz kaldığı gerilmeler sonucu mafsal bölgelerinin oluştuğunu ve taşıyıcı elemanlar arasındaki bağın zayıfladığını gösterir. Kemerlerin kırılma mekanizmalarının tepe noktası ve belirli mafsal bölgelerinde geliştiğini göstermektedir. Kemerin bu bölgelerindeki ayrılmalar, yükün dağılımına bağlı olarak yığma yapıların hasara en açık olduğu alanları işaret eder. Dolayısıyla, yığma kemerlerin yapısal analizlerinde bu kritik bölgelerin güçlendirilmesi gerektiğini veya bu bölgelerde oluşabilecek hasarları öngörmek için kullanılabilecek bir referans sunmaktadır. Yükleme sonucu kemerde meydana gelen kırılma mekanizması d=0.01 mm gibi düşük olarak nitelendirebileceğimiz bir miktarda ortaya çıkmaktadır. Sonrasında bazı mafsalların kapandığı, yığma birimler arasında kaymaların gerçekleştiği görülmektedir. Analiz sonucunda görülen deformasyon durumu, yığma kemerin göçme sonrasındaki durumunu temsili olarak gösterdiğini söylenebilir.



Şekil 6. Yığma kemerin farklı yükleme değerlerindeki deforme olmuş şekilleri

3.3 Yükleme 2: Yığma kemerde simetrik olmayan yükleme

Bu bölümde keyfi olarak seçilen bir yığma birim üzerinden yüklenen kemer örneği Şekil 7'de görülmektedir. Bu analizde, yığma birimlerden oluşan bir kemerin üzerine bir tekil yük uygulandığı görülmektedir.



Şekil 7. Kemerde simetrik olmayan yükleme durumu

Kemerin üst kısmına bir noktada uygulanan yük, ok ile gösterilmektedir ve belirli bir yığma bloğu üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bu tür bir yükleme, kemerin yapısal dayanımını test etmek veya yük etkisi altında kırılma davranışını incelemek için yapılmaktadır. Yığma kemerler genellikle yük altında doğrusal olmayan bir davranış sergiler ve uygulanan yük, kemerin taşıma kapasitesini zorlayarak taşlar arasında gerilme oluşmasına neden olur. Yükleme sonucu oluşacak deformasyon ve açıklıklar, kemerin bu yük altında nasıl tepki verdiğini, hangi bölgelerde çatlak veya ayrılma oluşabileceğini anlamaya yardımcı olmaktadır. Analizler sonucunda yığma kemerlerin kırılma mekanizmaları Şekil 8'de detaylı olarak sunulmaktadır.

Analiz sonuclarında görülen yapıda meydana gelen maksimum yer değiştirme (d) değerine göre meydana gelen deformasyonlar görülmektedir. Bu analiz, yığma kemerlerin farklı deformasyon seviyeleri (d) altında yapısal davranışlarını ve kırılma mekanizmalarını gösterir. Deformasyon d=0 mm'den başlayarak d=0.037 mm'ye kadar kademeli olarak artmaktadır. Kemerin her bir seviyede nasıl tepki verdiği, yapının yük altında maruz kaldığı gerilmelerle nasıl şekil değiştirdiği ve hangi bölgelerde çatlama ya da ayrılmaların oluştuğu gözlemlenebilir. Baslangic durumunda (d=0 mm), kemer tamamen sağlam ve taşlar arasındaki bağlantılar eksiksizdir. Deformasyon arttıkça, taşlar arasında özellikle üst ve kenar bölgelerde açılmalar meydana gelmektedir. Bu açıklıklar, yük altında kemerde oluşan gerilmelerin etkisiyle taşların birbirlerinden ayrılma eğilimine girdiğini gösterir. Özellikle d=0.012 mm ve sonrasında, kemerin üst kısmında belirgin bir ayrılma oluşmakta ve mafsal bölgeleri netleşmektedir. d=0.025 mm ve d=0.037 mm seviyelerinde, bu ayrılmalar daha belirgin hale gelmekte, kemerin yük taşıma kapasitesi azalmaktadır. Yükleme sonucu ilk mafsalın, kemerin yükleme yapılan kısmında ortava cıktığı görülmektedir. Sonrasında olusan diğer üç mafsalla beraber kemer çökme durumuna ulasmaktadır.



Şekil 8. Yığma kemerin farklı yükleme değerlerindeki deforme olmuş şekilleri

3.4 Yükleme 3: Kemere 2 noktadan simetrik tekil yükleme Bu bölümde Şekil 9'da görülen kemere iki noktadan tekil

yük etki etmektedir. Kemerin üst kısmına iki noktada uygulanan yükler, ok ile gösterilmektedir.



Şekil 9. Kemerde 2 noktadan simetrik tekil yükleme durumu

Analizler sonucunda yığma kemerlerin kırılma mekanizmaları Şekil 10'da detaylı olarak sunulmaktadır. Deformasyon d=0 mm'den başlayarak d=0.0453 mm'ye kadar kademeli olarak artmaktadır. Özellikle d=0.0089 mm ve sonrasında, kemerin üst kısmında belirgin bir ayrılma oluşmakta ve mafsal bölgeleri netleşmektedir. d=0.0453 mm deformasyonda, bu ayrılmalar daha belirgin hale gelmekte, kemerin dört mafsallı kırılma mekanizmasına ulaşmaktadır.

İlk durum, yük uygulanmadan önceki durumu göstermektedir. Küçük bir yük uygulandığında, yapıda hafif deformasyon baslamaktadır. Yük arttıkça, bazı bölgelerde küçük çekme gerilmeleri ve mikro çatlaklar başlamaktadır. Daha yüksek deformasyon seviyelerinde, kemerin kritik bölgelerinde plastik mafsalların oluşmaya başladığı görülmektedir. Mafsalların oluşumu yük dağılımını etkileyerek kırılma mekanizmasını tetiklemektedir. Son durumda d=0.0453 mm deformasyonda kemer artık mekanizmaya dönüşmüş durumdadır. Kritik yük sınırına ulaşıldığında, çatlaklar belirli bölgelerde genişler ve bu bölgeler mafsal haline gelir. Kemerin dört farklı noktasında plastik mafsallar oluştuğunda, yapı bir mekanizmaya dönüşür. Artık kemer yük taşıyamaz hale gelir, çünkü bu noktadan sonra herhangi bir ek yük yapının çökmesine neden olmaktadır. Plastik mafsalların oluşumu tamamlandığında kemer yük taşıyamaz hale gelmektedir.

Bu analizler, kemerin dayanımını ve kırılma mekanizmasını belirlemek için kullanılmaktadır. Deformasyon ve kırılma mekanizmaları, yığma kemerlerin tasarımında güvenlik sınırlarını anlamak ve olası hasarları önlemek açısından önemlidir.



Şekil 10. Yığma kemerin farklı yükleme değerlerindeki deforme olmuş şekilleri

4 Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

Yığma kemerin yapısal davranışını görmek için sonlu elemanlar analizlerinin bazı sonuçları bu bölümde sunulmaktadır. Kilit taşı üzerinden yüklenen kemerin üç boyutlu deformasyonu Şekil 11'de görülmektedir.



Şekil 11. Kemerde görülen üç boyutlu deformasyon (d=0.01 mm)

Kemer üst noktasından simetrik olarak yüklenmesi sonucu ortaya çıkan kırılma mekanizması Şekil 12'de görülmektedir. En üst noktasından simetrik olarak yüklenen kemerde beş mafsallı kırılma mekanizması meydana gelmektedir.



Şekil 12. Simetrik yüklü yığma kemerde kırılma mekanizması

Belirli bir yükleme koşulu altında kemer yapıların stabilitesi ve güvenliği, yapıların geometrisine ve malzemenin mekanik özelliklerine büyük ölçüde bağlıdır. Yığma kemerde çekme dayanımının ihmal edilebilir bir düzeyde olduğu bilinen bir durumdur. Kemerler için güvenlik koşulu, itme çizgisinin kemerin her bir bölümünün içinde tutulduğunda elde edilir. İç kuvvetlerin sonucu merkezin dışına doğru hareket ettiğinde kesit parçalanır ve yüksek deformasyonların olduğu bir aşama başlar. Bunun sonucu olarak kemerin basınç altındaki kenarının ezildiğini gösteren bir mafsal oluşur.

Üst kısmın sağından keyfi bir noktadan yüklenen kemerde, deforme olmuş şekil ve mafsal bölgeleri asimetrik olarak yüklenen kemer içinde başarıyla belirlenebilmektedir. Yığma birimler arasındaki ayrım şekilde açıkça görülmektedir. Yığma tuğlaların ayrılma noktası, taşıyıcı sistemin çökme noktaları olarak değerlendirilebilir. Kemerin üç boyutlu deformasyon Şekil 13'de görülmektedir.



Şekil 13. Kemerde oluşan üç boyutlu deformasyon (d=0.037 mm)

Kemerde simetrik olmayan yükleme durumunda ortaya çıkan kırılma mekanizması Şekil 14'te görülmektedir. Mafsal sayısı dörde eşit veya daha fazla olduğunda yapı kararsız hale gelir ve çökme meydana gelmektedir.



Şekil 14. Kemerde oluşan kırılma mekanizması

Tepe noktasından ve tepe noktasının sağından yüklü iki yığma kemer örneği incelendiğinde her iki yükleme senaryosunun yığma kemer üzerindeki etkileri farklı olacaktır. Tepe noktasından yükleme uygulandığında, kemer üzerindeki yük doğrudan yukarıdan gelen bir kuvvet olarak dağıtılır. Bu yük, kemerin eğimindeki değişikliklere göre taş birimleri arasında basınç ve kayma gerilmeleri oluşturur. Yükün simetrik bir şekilde uygulandığı bu durumda, kemer yükü her iki mesnete eşit şekilde aktarır, yani her iki yanındaki yığma birimler de simetrik olarak yük taşır. Bu simetrik yük dağılımı genellikle yapının daha dengeli olmasını sağlar. Yük simetrik olarak dağılır, dolayısıyla her iki mesnete ve yığma birimlerine eşit gerilmeler gelir. Yük arttıkça, taşıma kapasitesinin genellikle artması beklenir çünkü kemer homojen bir şekilde yükü taşır. Simetrik yükleme nedeniyle dayanıklılık, daha dengeli bir dağılım ile maksimum düzeyde olur. Tepe noktasının sağından yükleme uygulandığında, yük, kemerin sadece bir tarafına daha fazla gerilim uygular. Bu durum, yapıyı asimetrik bir sekilde yükler ve sağdaki yığma birimleri, yükü taşımada daha fazla zorlanır. Bu asimetri, kemerin deformasyonunu ve gerilme dağılımını etkiler. Yük sağ tarafta yoğunlaştığı için, sağdaki yığma birimler üzerindeki gerilmeler artacak ve kemerin yapısal stabilitesinde dengesizlikler meydana gelir. Kısa mesafede daha düşük yük taşıma kapasitesine sahip olabilir,

ancak bazı özel durumlarda yer değiştirmelerin kontrollü bir şekilde yönlendirilmesi sağlanabilir. Yük asimetrik olduğundan, sağ tarafta yığma birimlerde yerel aşırı gerilme ve potansiyel çatlaklar meydana gelebilir. Bu da yapının genellikle daha düşük dayanıklılığa sahip olmasına yol açar.

Tepe noktasından ve tepe noktasının sağından yüklenen iki kemerin yer değiştirme davranışı, yükün dağılımına ve yapının simetrik ya da asimetrik olmasına bağlı olarak farklılık gösterecektir. Yer değiştirme, yükün kemer üzerindeki yığma birimlerine nasıl etki ettiğiyle doğrudan ilişkilidir. Tepe noktasından simetrik yükleme, kemerin her iki tarafında daha düzenli bir yer değiştirme sağlar. Yük arttıkça, yer değiştirme de artar, ancak her iki tarafta yük eşit dağıldığı için yer değiştirme oranı genellikle daha kontrollü ve düzenlidir. Asimetrik yükleme nedeniyle sağ tarafta daha fazla yer değiştirme olur. Kemerin sağ tarafı, sol tarafa kıyasla daha büyük deformasyon gösterir. Bu, sağdaki yığma birimlerin daha fazla yer değiştirmesine neden olur.

İki noktadan simetrik asimetrik olarak yüklenen kemerde, deforme olmuş şekil ve mafsal bölgeleri belirlenmektedir. Kemerin üç boyutlu deformasyon Şekil 15'te görülmektedir.



Şekil 15. Kemerde oluşan üç boyutlu deformasyon (d=0.0453 mm)

Kemerde iki noktadan yapılan yükleme durumunda ortaya çıkan kırılma mekanizması Şekil 16'da görülmektedir. Kemerin yükleme noktalarına ek olarak üst kısımlarda iki adet daha mafsal bölgesi oluşarak kemer kırılma mekanizması formuna ulaşmaktadır.



Şekil 16. Simetrik iki tekil yük etkisindeki kemerde oluşan kırılma mekanizması

5 Sonuçlar

Bu çalışmada, yığma kemerler basitleştirilmiş mikro modelleme tekniğinin sistematik ve yeni bir şekilde kurgulanmasıyla oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modelleri kullanılarak analiz edilmektedir. Sunulan sistematik yapı kullanıldığında, yığma kemerlerin geometrilerinin olusturulması ve yüzeylerin ara islemleri pratik tanımlanması oldukca olarak yapılabilmektedir. Bu husus ise ortaya konulan sonlu eleman modelinin; farklı yığma birim sayısı, farklı yerleşim açıları ve farklı geometrik parametreler içeren yığma kemerlerin modellenmesinde kullanılmasını kolaylaştırmaktadır.

Yığma birimler, kontakt elemanlar bünyesindeki KBM modeliyle birleştirilerek yığma kemer davranışını etkili şekilde yansıtmaktadırlar. Bu durum, yığma kemerlerde meydana gelmesi beklenen çekme-ayrılma davranışının doğru bir şekilde modellenmesini sağlamaktadır.

Sunulan model sayesinde, yığma kemerin deforme olmuş şekilleri ve kırılma mekanizmaları elde edilmektedir. Analizlerde kemerlerin kırılma mekanizmalarının oluşma aşamalarının sıra ile belirlenmesi kemer üzerindeki kısımların birbirlerine göre mukavemet durumları hakkında önemli bilgiler vermektedir. Simetrik yüklü kemerde beş mafsallı çökme mekanizması, asimetrik olarak yüklenen kemerde ve iki tekil yük ile yüklenen kemerlerde ise dört mafsallı çökme mekanizması başarılı olarak tespit edilmiştir. Kemerlerin kırılma mekanizmalarının önceden belirlenmesi sayesinde yığma kemerlere uygulanacak güçlendirme yöntemi ve güçlendirilecek bölgeler daha etkili bir şekilde tespit edilebilir.

Tepe noktasından yüklenen kemer, simetrik yük dağılımı sayesinde genellikle daha dayanıklı olacaktır. Bu durumda kemer, yükü daha dengeli bir şekilde taşır ve yapının stabilitesi korunur. Öte yandan, tepe noktasının sağından yüklenen kemerde, yük asimetrik olduğu için sağ tarafta daha fazla gerilme meydana gelir, bu da yapının daha erken hasar görmesine neden olabilir. Bu nedenle, simetrik yükleme genellikle daha yüksek dayanıklılık sağlar.

Tepe noktasının sağından yüklenen kemer, daha fazla yer değiştirme yapar çünkü yük, sadece bir tarafa uygulandığı için asimetrik gerilmeler ve deformasyonlar ortaya çıkar. Kemerin sağ tarafındaki birimler daha fazla deforme olacak, dolayısıyla bu bölgede daha büyük bir yer değiştirme meydana gelecektir. Öte yandan, tepe noktasından yüklenen kemer simetrik bir şekilde yük taşır ve bu nedenle yer değiştirme daha dengeli olur, ancak toplamda daha az yer değiştirme olmaktadır.

Deformasyon ve kırılma analizleri, kemerlerin kritik kırılma noktalarını belirlemede önemli birer araçtır. Analizler, kemerin tasarım veya restorasyon sürecinde hangi bölgelerin güçlendirilmesi gerektiği hakkında fikir vermektedir. Kemerin yük altında beklenilen dayanıklılığını sürdürebilmesi için bu kritik alanların takviye edilmesi, yapı güvenliği açısından önemli bir husustur. Yığma yapıların analizlerinde mikro modelleme tekniği, yaygın olarak kullanılan homojenize ya da makro modelleme yaklaşımına göre oldukça gerçekçi sonuçlar sunmaktadır. Bu nedenle yığma yapıların mikro modeller ile analiz edildiği çalışmaların yaygınlaşması gerekmektedir.

Semboller listesi

- b : Tuğla eni
- d : Yer değiştirme miktarı
- Et : Tuğla elastisite modülü
- E_h : Harç elastisite modülü
- Gc : Çekme-ayrılma eğrisinin altındaki alan, kırılma enerjisi
- G_h : Harç kayma modülü
- Gt : Tuğla kayma modülü
- GkI: Mod I normal ayrılma için kritik kırılma enerjisi
- GkII : Mod II teğetsel kayma için kritik kırılma enerjisi
- H : Yükseklik
- k : Tuğla boyu

 $K_{n},\,K_{s},\,K_{t}\,\colon$ Normal, kayma ve enine yönlerdeki ayrılmaya karşı rijitlik parametreleri

- L : Açıklık
- Ri : Kemerin iç yarıçapı
- R_d : Kemerin dış yarıçapı
- t : Kalınlık
- β : Normal basınç temas gerilmesi altında teğet kayabilme ayarı

 $\delta_n{}^0,\;\delta_s{}^0,\;\delta_t{}^0$: Farklı yönlerdeki (normal, kayma ve enine) başlangıç ayrılma değerleri

 $\delta_n{}^f,\,\delta_s{}^f,\,\delta_t{}^f$: Malzemenin tamamen koptuğu noktadaki son ayrılma değerleri

- η : Yapay sönümleme katsayısı
- θ : Yığma birimlerin yerleşim açısı
- v_h : Harç Poisson oranı
- vt : Tuğla Poisson oranı
- μ : Sürtünme katsayısı
- σ_0 : Maksimum normal temas gerilimi
- τ_0 : Maksimum eşdeğer teğetsel temas gerilimi

 τ_n^0 , τ_s^0 , τ_t^0 : Farklı yönlerdeki (normal, kayma ve enine) başlangıç çekme değerleri

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir. **Benzerlik oranı (iThenticate):** %5

Kaynaklar

- [1] J. Heyman, The Masonry Arch, Ellis Horwood Ltd, 1982.
- [2] P. B. Lourenço, Computational Strategies for Masonry Structures, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, 1996.
- [3] N. Cavalagli, V. Gusella, L. Severini, Lateral loads carrying capacity and minimum thickness of circular and pointed masonry arches, Int. J. Mech. Sci. 115-116:

645-656, 2016. j.ijmecsci.2016.07.015

https://doi.org/10.1016/

- [4] I.E. Edri, D.Z. Yankelevsky, O. Rabinovitch, Out-ofplane response of arching masonry walls to static loads, Eng. Struct., 201: 109801, 2019. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109801
- [5] R. Quinteros-mayne, I. De Arteaga, R. Goñi-lasheras, A. Villarino, J.I. Villarino, The influence of the elastic modulus on the finite element structural analysis of masonry arches, Constr. Build. Mater., 221: 614-626, 2019. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06. 013
- [6] E. Ricci, A. Fraddosio, M. Daniele, E. Sacco, A new numerical approach for determining optimal thrust curves of masonry arches, Eur. J. Mech. / A Solids 75: 426-442, 2019. https://doi.org/10.1016/j.euromechsol. 2019.02.003
- [7] F. Cannizzaro, B. Pantò, S. Caddemi, I. Caliò, A Discrete Macro-Element Method (DMEM) for the nonlinear structural assessment of masonry arches, Eng. Struct. 168: 243-256, 2018. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.006
- [8] P. Di, D. Addessi, E. Sacco, A multiscale force-based curved beam element for masonry arches, Comput. Struct. 208: 17-31, 2018. https://doi.org/10.1016/ j.compstruc.2018.06.009
- [9] I.De Arteaga, P. Morer, The effect of geometry on the structural capacity of masonry arch bridges, Constr. Build. Mater. 34: 97-106, 2012. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.037
- [10] V. Sarhosis, T. Forgács, J.V. Lemos, A discrete approach for modelling backfill material in masonry arch bridges, Comput. Struct. 224: 106108, 2019. https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2019.106108
- [11] G. De Felice, R. Giannini, Out-of-plane Seismic Resistance of Masonry Arches, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 05(2), 253-271, 2001. https://doi.org/10.1080/13632460109350394
- [12] L. Pelà, A. Aprile, A. Benedetti, Seismic assessment of masonry arch bridges, Eng. Struct. 31, 1777-1788, 2009. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.012
- [13] R. Dimitri, F. Tornabene, A parametric investigation of the seismic capacity for masonry arches and portals of different shapes, Eng. Fail. Anal. 52: 1-34, 2015. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.02.021
- [14] P. Zampieri, N. Simoncello, C. Pellegrino, Seismic capacity of masonry arches with irregular abutments and arch thickness, Constr. Build. Mater. 201: 786-806, 2019. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12. 063
- [15] I. Cancelliere, M. Imbimbo, E. Sacco, Experimental tests and numerical modeling of reinforced masonry arches, Eng. Struct. 32, 776-792, 2010. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.12.005
- [16] E. Bertolesi, G. Milani, F.G. Carozzi, C. Poggi, Ancient masonry arches and vaults strengthened with TRM, SRG and FRP composites: Numerical analyses, Compos. Struct. 187: 385–402, 2018. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.021

- [17] M.R. Valluzzi, M. Valdemarca, C. Modena, Behavior of brick masonry vaults strengthened by frp laminates, J. Compos. Constr., 5(3): 163-169, 2001. https://doi.org/10.1061/(ASCE)10900268(2001)5:3(16 3)
- [18] G. Milani, P. B. Lourenço, 3D non-linear behavior of masonry arch bridges, Computers and Structures 110– 111, 133–150, (2012). https://doi.org/10.1016/ j.compstruc.2012.07.008
- [19] T. Michiels, S. Adriaenssens, Form-finding algorithm for masonry arches subjected to in-plane earthquake loading, Computers and Structures, 195 (2018) 85–98, 2018. https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.10.001
- [20] W.J. Lewis, J.M. Russell, T.Q. Li, Moment-less arches for reduced stress state. Comparisons with conventional arch forms, Computers and Structures, 251 (2021) 106524. https://doi.org/10.1016/ j.compstruc.2021.106524
- [21] B. Liu, V. Sarhosis, J. V. Lemos, Quantification of the crack propagation and global failure mechanism of single-and multi-ring masonry arch bridges, Engineering Structures, 306 (2024) 117805. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117805
- [22] S. Grosman, L. Macorini, B.A. Izzuddin, Parametric nonlinear modelling of 3D masonry arch bridges, Advances in Engineering Software, 185 (2023) 103514. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2023. 103514
- [23] E. Bertolesi, G. Milani, R. Fedele, Fast and reliable non-linear heterogeneous FE approach for the analysis of FRP-reinforced masonry arches, Composites Part B, 88 (2016) 189-200. https://doi.org/ 10.1016/j.compositesb.2015.11.005
- [24] D. Aita, M. Bruggi, and E. Garavaglia, Collapse analysis of masonry arches and domes considering finite friction and uncertainties in compressive strength, Eng. Fail. Anal., vol. 163, no. PA, p. 108462, 2024. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024. 108462
- [25] R. Avasthi and D. C. Rai, Seismic behavior of circular segmental masonry arch considering tensile strength of joints, Bull. Earthq. Eng., vol. 21, no. 14, pp. 6367–6391, 2023. https://doi.org/10.1007/s10518-023-01771-2

- [26] N. Pingaro, M. Buzzetti, and G. Milani, Advanced FE nonlinear numerical modeling to predict historical masonry vaults failure: Assessment of risk collapse for a long span cloister vault heavily loaded at the crown by means of a general-purpose numerical protocol, Eng. Fail. Anal., vol. 167, no. PB, p. 109070, 2025. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.109070
- [27] R. Varró, G. Bögöly, and P. Görög, Laboratory and numerical analysis of failure of stone masonry arches with and without reinforcement, Eng. Fail. Anal., vol. 123, no. March 2020, 2021. https://doi.org/10.1016/ j.engfailanal.2021.105272
- [28] P. Zampieri, M. A. Zanini, and F. Faleschini, Influence of damage on the seismic failure analysis of masonry arches, Constr. Build. Mater., vol. 119, pp. 343–355, 2016. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05. 024
- [29] C. Zhao, Y. Xiong, X. Zhong, Z. Shi, and S. Yang, A two-phase modeling strategy for analyzing the failure process of masonry arches, Eng. Struct., vol. 212, no. July 2019, p. 110525, 2020. https://doi.org/ 10.1016/j.engstruct.2020.110525
- [30] B. Ozturk, Seismic behavior of two monumental buildings in historical Cappadocia region of Turkey, Bulletin of Earthquake Engineering, 2017, 15: 3103-3123. https://doi.org/10.1007/s10518-016-0082-6
- [31] D. Guney, E. Aydin, B. Ozturk, The evaluation of damage mechanism of unreinforced masonry buildings after Van (2011) and Elazig (2010) Earthquakes. Journal of Physics: Conference Series. Vol. 628. No. 1. IOP Publishing, 2015. https://doi.org/10.1088/1742-6596/628/1/012066
- [32] B. Ozturk, C. Yilmaz, T. Senturk, Effect of FRP retrofitting application on seismic behavior of a historical building at Nigde, Turkey. 14th European Conference on Earthquake Engineering 2010: Ohrid, Republic of Macedonia, 2010.
- [33] B. Ozturk, T. Senturk, C. Yilmaz, Analytical investigation of effect of retrofit application using CFRP on seismic behavior of a monumental building at historical Cappadocia region of Turkey. 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Toronto, Canada. 2010.
- [34] ANSYS 23.0 (2023) Element reference.



NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 516-531



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

Araștırma makalesi / Research article

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



Using transfer learning models for DNA sequence similarity via fCGR method

fCGR yöntemi ile DNA dizi benzerliği için transfer öğrenme modellerinin kullanılması

Emre Delibaș^{1,*} 🗓

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas Türkiye

Abstract

Similarity analysis of DNA sequences is a critical issue for understanding evolutionary relationships and identifying genetic mutations. Since traditional alignment-based methods have high computational costs, this study investigated the applicability of transfer learning models for alignment-independent DNA similarity analysis. DNA sequences were visualized with the Frequency Chaos Game Representation (fCGR) method and feature extraction was performed with ResNet50, EfficientNetB0, and MobileNet models. Three similarity metrics such as cosine similarity, Euclidean distance, and correlation and four different hierarchical clustering methods were compared. The results show that cosine similarity metric reflects genetic similarities better. MobileNet provided the highest accuracy rate with its lightweight structure and efficient feature extraction. Feature vectors visualized with PCA exhibited strong clustering tendencies and were in agreement with reference phylogenetic trees. The study demonstrates the applicability of transfer learning in genetic analyses and shows that scalable and biologically meaningful analyses can be performed.

Keywords: DNA sequence similarity, Transfer learning, Automatic feature extraction, fCGR

1 Introduction

The analysis of DNA sequence similarity represents a foundational challenge within a plethora of bioinformatics applications, including those pertinent to evolutionary biology, the investigation of genetic diseases, and the identification of novel genes [1]. Alignment-based methods, including the BLAST algorithm and the Needleman-Wunsch algorithm, have been instrumental in this field [2,3]. However, these methods have high computational costs when working with large datasets or long sequences. This limitation has led to the development of alignment-free methods to analyse similarities between sequences [4]. These alignment-free methods have garnered significant attention, particularly due to their capacity to expedite the processing of voluminous genomic data. These approaches have been shown to overcome the computational difficulties of alignment-based methods by using various strategies,

Öz

DNA dizilerinin benzerlik analizi, evrimsel ilişkilerin anlasılması ve genetik mutasyonların belirlenmesi açısından kritik bir konudur. Geleneksel hizalama tabanlı yöntemler yüksek hesaplama maliyetine sahip olduğundan, bu calısmada hizalamadan bağımsız DNA benzerlik analizi için transfer öğrenme modellerinin uygulanabilirliği incelenmiştir. DNA dizileri, Frequency Chaos Game Representation (fCGR) yöntemiyle görselleştirilmiş ve ResNet50, EfficientNetB0, MobileNet modelleriyle özellik çıkarımı yapılmıştır. Cosine similarity, Euclidean distance ve correlation gibi üç benzerlik metriği ve dört farklı hiyerarşik kümeleme yöntemi karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, cosine similarity metriğinin genetik benzerlikleri daha iyi yansıttığını göstermektedir. MobileNet, hafif yapısı ve verimli özellik çıkarımıyla en yüksek doğruluk oranını sunmuştur. PCA ile görselleştirilen özellik vektörleri güçlü kümelenme eğilimleri sergilemiş ve referans filogenetik ağaçlarla uyum göstermiştir. Çalışma, transfer öğrenmenin genetik analizlerde uygulanabilirliğini ortaya koyarak ölçeklenebilir ve biyolojik olarak anlamlı analizler yapılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: DNA dizi benzerliği, Transfer öğrenme, Otomatik özellik çıkarımı, fCGR

such as k-mer frequency analysis, chaos game representation (CGR) and information theory-based metrics [4]. Frequency Chaos Game Representation (fCGR) is a particularly promising technique that facilitates rapid and efficient similarity analysis by converting DNA sequences into a format that is both visualizable and analyzable [5].

While alignment-free methods have made significant contributions, deep learning has revolutionized the field of bioinformatics [6]. Transfer learning is a subfield of deep learning that allows models pre-trained on large datasets to extract meaningful features from new datasets. Such approaches have shown great success in DNA sequence classification problems where labeled datasets are available [7]. However, clustering-based problems, such as the one in this study, present unique challenges due to the lack of labeled data.

The necessity for alignment-free methods has arisen in order to overcome the computational costs of alignment-

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail edelibas@cumhuriyet.edu.tr_(E. Delibaş) Geliş / Received: 29.10.2024 Kabul / Accepted: 05.02.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngumuh.1575701

based approaches, particularly in the context of large-scale genomic data. These methods provide bioinformatics workflows that are both fast and scalable by analysing sequence similarities without the necessity of direct alignment [8, 9]. However, the integration of alignment-free techniques with deep learning methods has not been sufficiently explored, especially for clustering-based problems. Deep learning methods have predominantly focused on supervised learning scenarios, where the training process is guided by labelled data [10]. In scenarios where such labelled data is not available, transfer learning emerges as a viable alternative. The present work aims to establish a bridge that combines alignment-free methods and deep learning in DNA sequence similarity analysis by investigating the usability of pre-trained models such as ResNet50, EfficientNet, and MobileNet for feature extraction.

Within the scope of alignment-free sequence analysis, many different fields of study have been included in this subject based on similarity calculation. Alignment-free methods have been studied in a wide range and several basic groups of methods have emerged in the literature: graphical representation-based approaches, image/texture based similarity analysis methods, information-theory-based algorithms, k-mer-based analyses and methods based on chaos theory. Each of them aims to provide fast and efficient similarity analysis by using various features of DNA sequences [11, 12].

Comparison of DNA sequences with different encoding methods based on graphical representation offers a comparison approach based on matching multidimensional curves on the coordinate plane [13]. These approaches have been developed based on 2D graphical representation [13], 3D graphical representation [14, 15] and larger dimensional representations [16-18]. On the other hand, examples of analyzing DNA sequences by converting them to different data formats are not limited to this. DNA sequences converted to image format with different coding techniques were vectorized with texture comparison methods and subjected to similarity calculations [19, 20]. When we look at the methods based on information theory, the amount of information shared between the analyzed sequences is calculated and explained. While the calculations are made with complexity calculations such as Kolmogrov or Lempel-Ziv [21, 22], it has been seen that methods based on vectorizing the transition distances of the nucleotides in the sequence with different metrics are also used [23]. DNA sequences have been evaluated as digital signal sequences in some studies and have found a wide field of study from the signal processing perspective [24, 25]. Some of the abovementioned studies have tried to use the information they may contain by grouping them as dinucleotides, trinucleotides or by their physicochemical properties, as in [26] and [27].

Biomolecular sequences consisting of texts with a fourletter alphabet have also been an important area of study for word-based alignment-free algorithms [4, 8, 11]. K-merbased analyses are one of the most common alignment-free methods. This method allows comparing similarities between sequences using the frequency of fixed-length subsequences (k-mers) in DNA sequences. This approach has been widely adopted due to its simplicity and computationally efficient nature [8]. In addition, a similar approach, n-gram-based methods, are among the word-based methods that bring different coding approaches in phylogenetic analyses [28, 29]. The use of statistical calculations of the obtained words [30], the use of Markov models found with k-mers or a combination of these two [31], similarity analysis with Cavnar and Trenkle distance calculation based on reduced n-grams [32], genome analysis combining the information theory approach [33] are examples of studies carried out in this field. Additionally, different approaches have been proposed by hybridizing CGR and word-based algorithms and the ranged word matches approach with maximum likelihood-based algorithms [34, 35].

Chaos game representation (CGR) is represented as a square matrix of nucleotide counts of a genome sequence [36, 37]. This technique has been used in various applications. CGR is also used in protein classification [38], Safoury et al. [37] proposed a DNA sequence classification method using convolutional neural network (CNN) from CGR image. Similarly, Rizzo et al. [39] developed a DNA sequence classification based on CGR image. In these studies, CGR has been shown to be an efficient method for rapid comparison of DNA sequences. However, a frequencybased extension of CGR, Frequency Chaos Game Representation (fCGR), provides a more detailed analysis by also taking into account k-mer frequencies in the sequences [5]. fCGR has been demonstrated to be efficacious in a variety of bioinformatics applications, including genome analysis, the inference of phylogenetic relationships, and protein classification. To illustrate this, consider the example of fCGR, a frequency-based extension of CGR, which facilitates expeditious calculation of similarities between sequences with k-mer representation [40].

The utilisation of transfer learning methodologies confers considerable advantages in the domains of DNA sequence analysis and classification. The utilisation of transfer learning facilitates the reutilisation of pre-trained models in novel tasks, thereby ensuring the attainment of superior outcomes with limited datasets [41, 42]. Transfer learning applications are critical to improve the overall performance of the model, especially when working with small numbers of examples. For instance, Bredesen and Rehmsmeier demonstrated that DNA sequence models enhance their capacity to generalise to independent Polycomb response elements [43]. Such studies underscore the impact of transfer learning on DNA sequence analysis. The potential of transfer learning is particularly evident in supervised learning tasks. Models such as ResNet50, EfficientNetB0 and MobileNet, pre-trained on extensive datasets like ImageNet, have been adapted for DNA sequence classification, where their weights are fine-tuned. However, the applicability of these models in clustering scenarios where fine-tuning is not possible due to the lack of labelled data has not yet been sufficiently investigated.

This study proposes a novel methodology for DNA sequence analysis. The objective of this study is to combine

alignment-free methods and transfer learning techniques in order to vectorize DNA sequences and evaluate the clustering performance of these vectors. The study utilises Frequency Chaos Games Representation (fCGR) as a fundamental technique to derive structured data from DNA sequences. This method has been shown to significantly reduce data size while simultaneously providing a high level of detail in the representation of DNA features. Transfer learning models ResNet50, EfficientNet and MobileNet are used for feature extraction on fCGR outputs. The classification layers of these models are then extracted, resulting in high-quality feature vectors of DNA sequences. Subsequently, an array of similarity measures, including cosine similarity, Euclidean distance, and correlation, are evaluated on these vectors. In addition, a range of clustering methods, namely average linkage, Ward's method, single linkage, and complete linkage, are employed to analyse the data. To assess the efficacy of the proposed methodology, a comparison with reference phylogenetic trees obtained from the MEGA11 program, a widely utilised reference tool in the domain of computational biology, was undertaken. The novelty of this work lies in the introduction of a transfer learning-based feature extraction approach for the analysis of DNA sequences using alignment-free methods, with the objective of optimising clustering performance and establishing a new framework for bioinformatics applications.

2 Material and Methods

2.1 Dataset

In this study, three distinct data sets were utilised to illustrate the generalisability of the proposed methodology on DNA sequences of varying lengths and complexity levels. The selection of data sets was guided by the following criteria:

• Widely Used in the Literature: These data sets are frequently used in the scientific literature and are accepted in the comparison of methods. Consequently, the findings of this study can be meaningfully compared to existing research in the scientific literature.

• Current and Scientific Importance: Data sets such as Influenza and Coronavirus indicate important biological problems that are frequently updated and always valid in the scientific world. These data sets are frequently used as data sources, especially in genetic analyses.

• Generalizability: Datasets of different lengths were chosen to test the generalizability of the proposed methodology and provide an opportunity to evaluate whether the method is effective on various types of DNA sequences.

The DNA sequences utilised in this study were obtained directly from the NCBI GenBank database, with accession numbers assigned for each sequence. These sequences pertain to specific gene regions and have been extensively cited in the extant literature, thus demonstrating their reliability. The obtained sequences are presented in FASTA format, in accordance with the standards established by GenBank, and are devoid of any missing data or low-quality regions. As the data set belongs to a specific gene region, there is no requirement for additional alignment or preprocessing, such as anomaly detection. Consequently, the raw data was utilised directly in the analysis process, a method that is widely accepted in the literature.

Summary information about the datasets detailed below is presented in Table 1.

Table 1. Datasets used in the analysis

Source	Length (bp)	Number of Spec.
NCBI	1350-1467	38
NCBI	16295-17019	18
NCBI	9000-31000	36
	Source NCBI NCBI NCBI	Source Length (bp) NCBI 1350-1467 NCBI 16295-17019 NCBI 9000-31000

2.1.1 Influenza A virus dataset

A DNA dataset of Influenza A viruses was used to test the proposed method. This dataset has been used in the literature to test many methods and consists of 38 viruses including H1N1, H2N2, H5N1, H7N3 and H7N9 subtypes [44-47]. NCBI accession numbers of sequences with lengths ranging from 1350 to 1467 bases are given in Table S1.

2.1.2 Whole mitochondrial genomes of 18 eutherian mammals

Whole mitochondrial genomes contain a wealth of genetic information from 18 eutherian mammals and have been widely used in recent years [19, 23, 48, 49]. All sequences were obtained from the NCBI database and are listed in Table S2, ranging in length from 16,295 to 17,019 bases.

2.1.3 Coronavirus dataset

Coronavirus belongs to the Coronavirinae subfamily of the Coronaviridae family in the Nidovirales order. , In this article, a dataset containing 36 Coronaviruses was also used. The genomic size of coronaviruses, which is widely used in the literature, varies between approximately 9 thousand and 31 thousand bp and has an average of 27,567 nucleotides [50]. The dataset containing viruses of different genome lengths is considered important in terms of generalizability in the analysis of the method. Details of the genome information of the viruses and access information are given in Table S3.

2.2 Frequency chaos game representation on DNA

The first application of CGR on DNA was made by Jeffrey in 1990 [51]. He applied CGR with a square instead of a triangle and used its four vertices to represent the four nucleotides, adenine (A), cytosine (C), guanine (G) and thymine (T) (Figure 1). The figure on the left shows the CGR algorithm and coordinates for four vertices labeled A, C, G, and T. In CGR, the center has coordinates (0,0) and CGR extends from (-1,-1) to (1,1). The figure on the right shows the partitioning of the CGR space iteratively [5].



Figure 1. Application of CGR to DNA



Figure 2. FCGR with count matrix for the complete mitochondrial genome sequence of the Tyrolean Iceman (GenBank:EU810403.1) and FCGR as a grayscale visualization [36].

While the CGR algorithm uses exact coordinates for each point, a discritization called frequency chaos game representation (FCGR) has enabled the use of a coarsegrained and less noisy CGR abstraction for sequences. FCGR is based on the frequency of CGR points according to a predefined grid according to the mapping in CGR. In Figure 2, CGR is divided by a grid (here 8x8 cells) and the number of points in each cell is counted. This count is presented as a matrix representing the frequency of k-mers (here 3-mers) in the corresponding map region and a grayscale image normalized between 0 and 255 [5].

2.3 Transfer learning models

Transfer learning constitutes a methodology that facilitates the reutilisation of deep learning models that have been pre-trained on extensive and diverse datasets on smaller and specialised datasets. This method facilitates the successful application of deep learning models that necessitate substantial data for training on smaller, more specialised datasets [52]. In bioinformatics and genetic analyses, transfer learning offers significant advantages in terms of time and resource efficiency during the visualisation and analysis of large genomic datasets.

In this study, three distinct transfer learning models were employed to enhance the extraction of information from visualised representations of genetic data (fCGR) and to assess the generalisability of the proposed method across diverse datasets: ResNet50, EfficientNetB0, and MobileNet. The selection of these models was made based on their suitability for the needs of the study, their effectiveness in the literature, and the advantages provided by transfer learning.

• ResNet50 has been shown to demonstrate superior performance in the learning of complex relationships by preventing information loss in deep learning processes thanks to residual connections. Its efficacy in complex tasks, such as medical image analysis, has been well-documented in the literature. Notably, it is particularly adept at extracting intricate features from high-resolution fCGR images.

• EfficientNetB0 offers a balanced approach between computational efficiency and accuracy with the Compound Scaling method. Its capacity to provide high accuracy while optimising the processing cost in medium-sized datasets

enables it to provide an efficient solution in genetic data. The EfficientNet model has been documented as successful in a wide range of applications in areas such as biomedical image analysis (see the relevant literature for further details).

• MobileNet, on the other hand, is a lightweight architecture that provides expeditious results with minimal computational expense. It is particularly effective in cases where limited processing power is a constraint, such as in small and medium-sized datasets, including fCGR images extracted from short DNA sequences. MobileNet has been documented in the literature as providing high accuracy at low cost in the context of medical imaging and classification.

The three models under consideration permit effective analysis of fCGR images obtained from DNA sequences by taking advantage of the strong generalisation capacity provided by transfer learning. In addition, it has been stated that the selected models offer lower processing cost and a wider application area when compared to other models in the literature (such as DenseNet, VGGNet, InceptionNet). For these reasons, these models were selected for the purposes of evaluating the performance of our study on different datasets and measuring the comparative effectiveness of the models [53].

2.3.1 ResNet50

ResNet50 is a 50-layer convolutional neural network (CNN) that stands out with its residual connections used in deep learning models [54]. Residual connections allow deeper networks to be trained by preventing the vanishing gradient problem. ResNet50 has been frequently used in medical image analysis and bioinformatics applications due to its capacity to extract complex features from high resolution images. In this study, ResNet50 is used to extract high resolution detailed features from fCGR images. By removing the last classification layer of the model (include_top = False), 2.048-dimensional feature vectors were obtained from each image with the Global Average Pooling (GAP) method. This structure was especially advantageous in learning complex relationships in fCGR images created from long DNA sequences.

2.3.2 EfficientNetB0

EfficientNetB0 is a CNN architecture that provides both accuracy and computational efficiency by scaling the depth, width and resolution dimensions of the model in a balanced way with the Compound Scaling method. EfficientNetB0 is designed to achieve high accuracy in limited processing power and datasets [53]. In this study, EfficientNetB0 is used to optimize the processing costs during feature extraction from fCGR images and at the same time to provide high accuracy. The classification layer of the model is removed and 1,280-dimensional feature vectors are extracted from each image with the GAP method. EfficientNetB0 contributes to the generalizability of the study by preserving the accuracy while reducing the processing time in images created from medium-length DNA sequences.

2.3.3 MobileNet

MobileNet is a CNN architecture that provides lightness and speed in deep learning applications. With a method called depthwise separable convolution, the number of model parameters and computational cost are significantly reduced. MobileNet is known for its use especially in mobile devices or systems with limited processing power [55]. In this study, MobileNet is used to quickly extract information from fCGR images. The last classification layer of the model is removed and 1,024-dimensional feature vectors are obtained from each image with the GAP method. MobileNet strengthens the performance of the study on different datasets by quickly and effectively extracting features in fCGR images derived from short DNA sequences.

2.4 Details of the model

2.4.1 Model structure

In this study, three distinct transfer learning models are utilised to extract information from fCGR (Chaos Game Representation) images derived from DNA sequences. These models are distinguished from each other by their technical features.

ResNet50 is a 50-layer deep CNN architecture with residual connections. The incorporation of residual connections within deep CNN architectures has been demonstrated to enhance the trainability of such networks, facilitate the transmission of input information to subsequent layers, and thereby mitigate information loss during the analysis of complex images. In this study, ResNet50 is optimised to learn detailed features of fCGR images derived from long DNA sequences.

EfficientNetB0 is an architecture that scales the depth, width and resolution dimensions in a balanced way with the Compound Scaling method. This structure, which provides high accuracy with fewer parameters, has made efficient information extraction by reducing the processing cost in medium-sized datasets such as fCGR images.

MobileNet is an architecture that reduces the number of parameters and processing cost with depthwise separable convolution. This structure facilitates rapid inference from fCGR images, a capability that is particularly effective in short DNA sequences.

The efficacy of each model in enhancing the study's scope is noteworthy, particularly in regard to its capacity to process genetic information from fCGR images, a capability that is well-suited to the unique characteristics of this data type.

2.4.2 Feature extraction

In this study, fCGR (Chaos Game Representation) images derived from DNA sequences were converted into feature vectors using three deep learning-based transfer learning models (ResNet50, EfficientNetB0, and MobileNet). In this process, the final classification layers of the transfer learning models were removed and global feature extraction was performed from the images. This approach enabled the effective modelling of biological information specific to DNA sequences from fCGR images.Furthermore, fCGR images were rescaled to 224x224 pixels to ensure compatibility with the input layers of all models. The images were processed in RGB format and converted into feature vectors with a specific pooling strategy for each model. During the extraction of features, a fixed-size feature vector was obtained from each image by applying the Global Average Pooling (GAP) method:

• ResNet50: The features extracted from the images formed a 2,048-dimensional vector. This high dimensionality reflects the capacity of ResNet50 to extract detailed information in complex and high-resolution fCGR images.

• EfficientNetB0, optimised by the Compound Scaling structure, generated a 1,280-dimensional feature vector from each image. This balanced scaling is employed with the objective of reducing the computational cost of the model.

• MobileNet: Utilising depth-separated convolution technology, MobileNet extracted a 1,024-dimensional vector, thereby achieving lightweight and fast feature extraction.

It is noteworthy that all models were executed with pretrained weights on ImageNet for feature extraction, and no fine-tuning was performed. The extracted feature vectors provided biological representations that effectively represented genetic information and were made suitable for subsequent analysis steps.

2.4.3 Network Weights

All transfer learning models utilised in this study (ResNet50, EfficientNetB0, and MobileNet) were executed with weights that had previously been trained on the ImageNet dataset. ImageNet is a substantial and diverse dataset consisting of natural images, which increases the generalisation capacity of the models and enables effective

results to be obtained in different data types. In this study, these pre-trained weights were utilised to represent genetic information in fCGR images derived from DNA sequences.

The final classification layers of the models were removed, and feature extraction was performed only with the pre-trained weights. This approach enhanced the model's capacity to extract information in new data types by leveraging the generalization advantage provided by the transfer learning method in DNA datasets of limited size. Each model extracted feature vectors of differing dimensions from fCGR images, characterised by its distinct weight structure:

- **ResNet50:** Achieved high accuracy in complex images with 25.6 million parameters.
- EfficientNetB0: Achieved balanced accuracy and computational cost efficiency with 5.3 million optimized parameters.
- **MobileNet:** It has achieved fast and low-cost inference with its lightweight structure and 4.2 million parameters.

It is important to note that the weights were not finetuned, and the models were run with fixed weights. This strategy reduced the risk of overfitting on existing datasets, making it possible to extract accurate and generalisable features from visualised representations of genetic data.

2.4.4 Preparation of fCGR images

The conversion of DNA sequences into visual representations was achieved by employing the Frequency

Chaos Game Representation (fCGR) method. This method involves the calculation of the frequencies of specific nucleotide subsequences (k-mers) of a given length within the sequence, and the subsequent visualisation of this information as a two-dimensional matrix. The fCGR matrices were created according to the k-mer length that had been determined for each individual DNA sequence. These matrices were then saved as grayscale images. Subsequent to this, the images were rescaled to 224x224 pixels and converted to RGB format, ensuring compatibility with deep learning models. This format was selected to ensure compatibility with the input format employed in the training of models with ImageNet data, thereby facilitating efficient model operation.

Determination of k-length: The determination of k-mer length constitutes a critical step that exerts a direct influence on the discrimination power and computational cost of fCGR. A plethora of approaches have been proposed in the extant literature to determine the optimal k-mer length; however, these recommendations are contingent on the features of the methods utilised. Shorter k-mer lengths have been shown to reduce the discrimination power of subsequences, while longer k-mer lengths have been shown to increase the discrimination power, albeit at the cost of significantly increased computational complexity. In this study, the logL(n) calculation was utilised as a starting point, an approach that has been accepted in the literature [56]. In this method, n denotes the average length of the sequences to be compared, while L signifies the size of the DNA alphabet (e.g. 4: {A, C, G, T}). In order to better determine the optimal k-mer length, analysis was performed at different k-mer lengths using one value below and one value above this value. This approach yielded a method that provided an approximate optimum limit in k-mer length selection, and the effect of the determined k-mer length on the analysis results was evaluated.

2.4.5 Normalisation of data

Prior to the integration of fCGR images into the models' inputs, a process of normalisation was implemented. This process entailed the subtraction of a specific mean from the pixel values of all images, with these values then being scaled between -1 and 1. The application of this process rendered the models more stable and efficient, whilst concomitantly reducing potential disparities in images from disparate data sources.

This process was implemented for all transfer learning models utilised in the study (ResNet50, EfficientNetB0, and MobileNet), in accordance with the standards that the models were trained with, namely the ImageNet dataset. The application of this process to the normalized images enabled the models to extract meaningful biological information from fCGR images and accurately represent the biological properties of DNA sequences. Furthermore, the normalization process ensured that the general visual features inherent in each model contributed effectively to the acquisition of biological information from fCGR images.

The diagram showing the steps of our method, the details of which will be given in the next subsections, is given in Figure 3.

2.5 Clustering and reconstruction of the Pylogenetic Tree

In this study, the authors evaluated the phylogenetic relationships between DNA sequences and reconstructed phylogenetic trees using feature vectors extracted from fCGR images. To this end, three different distance metrics (cosine similarity, Euclidean distance and correlation distance) and four different hierarchical clustering methods (average linkage, single linkage, complete linkage, and ward linkage) were applied to measure the similarities between feature vectors. The employment of a range of metrics and methods was driven by the objective of offering a more comprehensive perspective on phylogenetic analyses and comparing the performance of the methods.

2.5.1 Distance metrics

Distance metrics serve as the fundamental tools for determining relationships between feature vectors. In this study, the following three metrics were utilised:

• **Cosine Similarity:** This metric quantifies the angular relationship between two vectors and is well-suited for similarity analyses independent of size. The efficacy of this metric in evaluating the orientation-based similarities of fCGR feature vectors extracted from DNA sequences was demonstrated (Equation (1)).

$$\cos(\theta) = \frac{x \cdot y}{\|x\| \|y\|} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} y_i^2}}$$
(1)

• **Euclidian distance:** A conventional metric that quantifies the geometric distance between two vectors. This metric is well-suited for the analysis

of distances resulting from genetic mutations or minor alterations (Equation (2)).

$$d(A,B) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (A_i - B_i)^2}$$
(2)

• **Correlation distance:** A metric that quantifies the linear relationship between two vectors, particularly employed for the evaluation of the density and linear correlations of genetic information (Equation (3)).

correlation(A, B) =
$$1 - \frac{cov(A, B)}{\sigma_A \cdot \sigma_A}$$
 (3)

Each distance metric has enhanced the generalisability of analyses by offering a distinct perspective on genetic data.

2.5.2 Clustering Methods

Hierarchical clustering methods are utilised to construct phylogenetic trees from the relationships obtained from distance metrics. In this study, four distinct methods were employed:

- Average Linkage: This method provides a balanced structure by considering the average distance between groups.
- **Single Linkage:** This method is based on the closest distance between two groups and creates more separated clusters.
- **Complete Linkage:** This method provides a tighter clustering structure by measuring the farthest distance between two groups.



Figure 3. Diagram of the proposed method

• Ward Linkage: This method preserves the diversity in the data set by minimizing the sum of the squares of the differences.

The application of these methods in combination enabled the analysis of phylogenetic relationships from both a detailed and a broad perspective.

The performance of the various metrics and methods employed in this study was evaluated using the Normalized Robinson-Foulds (nRF) score, by comparing them with the reference phylogenetic trees. This score measured the similarity of the reconstructed phylogenetic tree to the reference tree and revealed the accuracy of the method. Furthermore, a comparative analysis of the nRF scores derived from various metric and method combinations was conducted, leading to the identification of the most efficacious combinations. The nRF metric was utilised to compare the generated phylogenetic trees with a reference tree, thereby evaluating the efficacy of the employed method. The calculation of accuracy is outlined in Equation (4):

$$Accuracy = 1 - nRF * 100 \tag{4}$$

As a result, this diversification provided a more comprehensive analysis of the phylogenetic relationships of DNA sequences and provided the opportunity to better evaluate the biological significance extracted from genetic data.

3 Results

This study comprehensively evaluated the automatic extraction and reconstruction of phylogenetic trees from DNA sequences using fCGR images. A range of transfer models (ResNet50, EfficientNetB0, learning and MobileNet) were analysed with various combinations of kmer lengths, distance metrics (cosine similarity, Euclidean distance, correlation), and hierarchical clustering methods (average, single, complete, ward linkage). The results demonstrate that the proposed method can provide a generalisable solution and that transfer learning is an effective tool in the analysis of genetic data. The accuracy rates presented in the results were determined through the alignment process facilitated by the MEGA11 [57] tool, a widely utilised and referenced bioinformatics instrument, and the comparison to the reference tree generated by the UPGMA method.

 Table 2. Accuracy rates of model, method and parameter combinations (%)

			Cosine				Euclidean				Correlation			
			Avg.	Ward	Single	Compl.	Avg.	Ward	Single	Compl.	Avg.	Ward	Single	Compl.
		k=6	40.63	40.63	40.63	50.00	40.63	40.63	40.63	43.75	40.63	40.63	40.63	50.00
	Resnet50	k=7	34.38	31.25	37.50	34.38	34.38	31.25	34.38	34.38	34.38	31.25	37.50	34.38
		k=8	31.25	28.13	31.25	28.13	31.25	25.00	31.25	28.13	31.25	28.13	31.25	28.13
na		k=6	59.38	65.63	56.25	62.50	62.50	62.50	59.38	62.50	62.50	65.63	56.25	62.50
oroi	Mobilenet	k=7	56.25	56.25	59.38	56.25	59.38	56.25	59.38	53.13	56.25	56.25	59.38	59.38
Ŭ		k=8	34.38	31.25	34.38	31.25	31.25	25.00	34.38	31.25	34.38	31.25	34.38	31.25
		k=6	53.13	46.88	53.13	46.88	53.13	46.88	53.13	46.88	53.13	46.88	53.13	46.88
	EfficientNet	k=7	50.00	46.88	50.00	46.88	46.88	50.00	50.00	46.88	50.00	46.88	50.00	46.88
		k=8	31.25	31.25	31.25	31.25	31.25	31.25	31.25	31.25	28.13	28.13	28.13	28.13
		k=6	26.66	33.33	33.33	26.66	33.33	40.00	46.66	26.66	26.66	33.33	33.33	26.66
	Resnet50	k=7	40.00	40.00	40.00	40.00	33.33	33.33	33.33	33.33	40.00	40.00	40.00	40.00
		k=8	33.33	33.33	40.00	33.33	33.33	26.66	26.66	33.33	33.33	33.33	40.00	33.33
tes		k=6	73.34	60.00	53.33	60.00	73.33	46.66	53.33	60.00	73.34	60.00	53.33	46.66
ima	Mobilenet	k=7	26.67	26.67	26.67	26.67	40.00	26.67	26.67	26.67	26.67	26.67	26.67	26.67
Pr		k=8	40.00	33.34	33.34	33.34	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	33.34	33.34	33.34
		k=6	26.67	26.67	20.00	20.00	33.34	33.34	26.67	33.34	26.67	26.67	20.00	20.00
	EfficientNet	k=7	66.67	73.34	66.67	66.67	66.67	60.00	66.67	66.67	66.67	73.34	66.67	66.67
		k=8	40.00	33.34	46.66	33.34	40.00	33.34	46.66	33.34	40.00	33.34	46.66	33.34
		k=4	40.00	31.43	37.14	34.29	40.00	34.29	37.14	34.29	40.00	31.43	37.14	34.29
	Resnet50	k=5	42.86	40.00	40.00	37.14	37.14	37.14	37.14	40.00	42.86	40.00	40.00	37.14
		k=6	34.29	31.43	31.43	37.14	31.43	28.57	28.58	25.71	34.29	34.29	31.43	37.14
nza		k=4	57.14	62.86	57.14	51.43	57.14	57.14	51.43	51.43	57.14	62.86	57.14	57.14
lue	Mobilenet	k=5	40.00	45.71	42.86	42.86	40.00	42.86	40.00	45.71	40.00	45.71	42.86	42.86
Inf		k=6	40.00	37.14	37.14	40.00	40.00	37.14	34.29	40.00	40.00	37.14	37.14	40.00
		k=4	25.71	28.57	31.43	28.57	28.57	31.43	31.43	28.57	25.71	28.57	31.43	28.57
	EfficientNet	k=5	34.29	34.29	34.29	34.29	37.14	37.14	37.14	40.00	34.29	34.29	34.29	34.29
		k=6	34.29	34.29	34.29	37.14	37.14	28.57	34.29	42.86	34.29	37.14	34.29	37.14



Figure 4. Phylogenetic tree constructed by alignment with ClustalW method and UPGMA method using MEGA11 software



Figure 5. Projection of 3D space consisting of PC1, PC2 and PC3 principal components for features obtained from 38 Influenza A virus DNAs.

3.1 Comperative analysis of accuracy across combinations

The accuracy of various combinations was analysed using all datasets. Table 2 presents the accuracies of combinations of three models, three k-mer lengths, three distance metrics, and four clustering methods. This variation has been designed to evaluate both the methodological flexibility and the applicability of transfer learning-based automatic feature extraction to different data types.

3.2 PCA based visualizations of feature spaces

The species in the phylogenetic tree displayed in Figure 4 were grouped and coloured. The feature vectors obtained from the transfer learning models according to the parameter and model preference with the highest accuracy score were projected into a three-dimensional space using PCA (Principal Component Analysis). The graph presented in Figure 5 illustrates that the proportion of information encompassed within the three principal components exhibiting the highest degree of variance is equivalent to 43.10%. This visualisation method enables the observation of the clustering structure of the vectors belonging to the data set and the compatibility of these structures with

phylogenetic trees. This analysis demonstrates the potential of feature vectors in reflecting genetic similarities and underscores the efficacy of the proposed method in elucidating relationships within biological data sets.

The phylogenetic tree displayed in Figure 6 has been grouped and coloured according to the hierarchical clustering of species in the 18 eutherian mammals dataset. The construction of this tree was achieved through the utilisation of feature vectors derived from transfer learning models, with the parameter and model combination that yielded the maximum accuracy score serving as the foundation. In order to further examine the structure of the data, the feature vectors were reduced to a three-dimensional space using PCA (Principal Component Analysis). The graph shown in Figure 7 reveals that the three principal components exhibiting the highest variance cover 60.55% of the total information. This approach enables the observation of the clustering tendencies of the vectors belonging to the dataset and the compatibility of these structures with phylogenetic trees. The findings emphasise the potential of feature vectors to reflect genetic similarities and the effectiveness of the proposed method in explaining relationships in biological datasets.



Figure 2. Phylogenetic tree constructed by alignment with ClustalW method and UPGMA method using MEGA11 software



Figure 3. Projection of 3D space consisting of PC1, PC2 and PC3 principal components for features obtained from 18 mtDNAs of Mammals



Figure 4.Phylogenetic tree constructed by alignment with ClustalW method and UPGMA method using MEGA11 software



Figure 5. Projection of 3D space consisting of PC1, PC2 and PC3 principal components for features obtained from Coronavirus Dataset

The phylogenetic tree displayed in Figure 8 has been grouped and coloured according to the hierarchical clustering of species in the Coronavirus dataset. The construction of this tree was achieved through the utilisation of feature vectors derived from transfer learning models, with the parameter and model combination that yielded the maximum accuracy score serving as the foundation. In order to further examine the structure of the data, the feature vectors were reduced to a three-dimensional space using PCA (Principal Component Analysis). The graph shown in Figure 9 reveals that the three principal components exhibiting the highest variance cover 78.78% of the total information. This approach enables the observation of the clustering tendencies of the vectors belonging to the dataset and the compatibility of these structures with phylogenetic trees. The findings emphasise the potential of feature vectors to reflect genetic similarities and the effectiveness of the proposed method in explaining relationships in biological datasets.

3.3 Contributions and future perspectives

This study proposes a novel methodology for the automatic extraction of features from fCGR images, utilising transfer learning models to represent DNA sequences independently of alignment. A comprehensive comparison between three transfer learning models (ResNet50, EfficientNet, MobileNet) and three different distance metrics (Cosine, Euclidean, Correlation) and four different clustering methods (Average, Ward, Single, Complete) used in the study is presented. This comparison demonstrates the generalizability of the method and its performance on different datasets in detail.

The results presented in Table 2 demonstrate that the cosine metric is more effective than other metrics in reflecting genetic similarities between feature vectors obtained from DNA sequences. This finding aligns with the extant literature, which supports the capacity of the cosine metric to evaluate direction-independent similarities in DNA analyses. It is well-documented in the existing literature that the cosine metric has a proven track record in reflecting density-based and angular similarities in genetic datasets. In this context, the preference for the cosine metric provides a robust foundation for the proposed method, particularly in the analysis of intricate genetic relationships.

In the context of transfer learning models, it has been observed that the MobileNet model consistently achieves the highest accuracy rates. This is attributable to the MobileNet model's low computational cost and lightweight structure, which facilitates efficient information extraction in limited datasets. The fast and efficient computational capacity of MobileNet supports the high performance obtained, especially on fCGR images derived from short DNA sequences. While ResNet50 and EfficientNet models have been shown to achieve commendable results on specific datasets, MobileNet's balanced approach, which strikes a judicious equilibrium between computational cost and accuracy, is particularly noteworthy. One of the most significant contributions of this study is to demonstrate the applicability of transfer learning models in alignment-independent DNA similarity analysis. Furthermore, the methodology outlined herein demonstrates the capacity for genetic relationships to be visualised and modelled via fCGR images. The use of PCA visualisations provides clear evidence for the distribution of feature vectors in a coherent manner in clusters on phylogenetic trees. This finding lends further support to the efficacy of the proposed method in reflecting meaningful genetic patterns in biological datasets.

- Methodological Diversity: In this study, the diversity of metric and clustering method combinations is designed to comprehensively evaluate how the method performs on different datasets. This methodological diversity serves to enhance the generalisability of the proposed method and its applicability in bioinformatic analyses.
- Originality and Innovation: The study presents a significant innovation in the use of transfer learning models in DNA similarity analysis. The integration of the fCGR method, a widely used technique in the relevant literature, with deep learning models suggests a new analysis paradigm compared to traditional approaches.
- Success Rates: The accuracy rates obtained demonstrate the potential for enhancement of the method in its present state. The enhancement of these rates can be achieved through model optimisation, the utilisation of more extensive datasets, and the refinement of the fCGR method.

In conclusion, this study demonstrates the usability of transfer learning models in similarity analysis of DNA sequences and provides a solid foundation for future studies. Future studies may expand the scope to enhance the accuracy and biological significance of these methods.

4 Conclusion

This study comprehensively examined the usability of the Frequency Chaos Game Representation (fCGR) method for alignment-independent analysis of DNA sequences by integrating it with transfer learning models. A comparative analysis was performed on three transfer learning models (ResNet50, EfficientNetB0 and MobileNet) used in the study, three different distance metrics (Cosine, Euclidean, Correlation) and four clustering methods (Average, Ward, Single, Complete). The results demonstrated the generalizability of the method and its applicability in biological datasets.

The findings indicated that the cosine metric exhibited enhanced consistency and efficacy in reflecting genetic similarities between DNA sequences in comparison to other metrics. In accordance with extant literature, the capacity of the cosine metric to reflect direction-independent similarities increased the effectiveness of feature vectors obtained from fCGR images in modelling genetic relationships. Furthermore, MobileNet demonstrated a notable advantage over other transfer learning models by exhibiting low computational cost and high accuracy rates. The lightweight architecture of MobileNet yielded particularly impressive results in the context of data obtained from short DNA sequences.

This study demonstrates the potential of transfer learning models in bioinformatics analysis and proves that processing DNA sequences with visual representations is an effective method for genetic similarity analysis. Nevertheless, the findings indicate that the method has potential for enhancement, and future studies may concentrate on the following areas:

The following tests were carried out:

- An evaluation of model performance with larger datasets;
- An optimisation of transfer learning models with finetuning techniques;
- An evaluation of new architectures and innovative fCGR variations in the feature extraction process.

The findings demonstrate that the proposed approach provides a powerful tool for understanding similarities and relationships in genetic data. The study provides a new perspective on the role of transfer learning models in bioinformatics analysis and provides a solid foundation for future research in this area.

Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity Rate (Turnitin): 9%

References

- Z. D. Stephens et al., Big Data: Astronomical or Genomical?, PLoS Biol, 13, 7, p. e1002195, 2015. https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PBIO.1002195.
- [2] S. B. Needleman and C. D. Wunsch, A general method applicable to the search for similarities in the amino acid sequence of two proteins, J Mol Biol, 48, 3, 443– 453, Mar. 1970. https://doi.org/10.1016/0022-2836(70)90057-4.
- [3] S. F. Altschul, W. Gish, W. Miller, E. W. Myers, and D. J. Lipman, Basic local alignment search tool, J Mol Biol, 215, 3, 403–410, Oct. 1990. https://doi.org/10.1016/S0022-2836(05)80360-2.
- S. Vinga and J. Almeida, Alignment-free sequence comparison—a review, Bioinformatics, 19, 4, 513– 523, Mar. 2003. https://doi.org/10.1093/BIOINFORMATICS/BTG005
- [5] H. F. Löchel and D. Heider, Chaos game representation and its applications in bioinformatics, Comput Struct Biotechnol J, 19, 6263–6271, Jan. 2021. https://doi.org/10.1016/J.CSBJ.2021.11.008.
- [6] M. Yousef and J. Allmer, Deep learning in bioinformatics, Turkish Journal of Biology, 47, 6, p. 366, 2023. https://doi.org/10.55730/1300-0152.2671.
- [7] H. Gunasekaran, K. Ramalakshmi, A. Rex Macedo Arokiaraj, S. D. Kanmani, C. Venkatesan, and C. S. G. Dhas, Analysis of DNA Sequence Classification Using CNN and Hybrid Models, Comput Math Methods Med, 2021, 1, p. 1835056, Jan. 2021. https://doi.org/10.1155/2021/1835056.

- [8] A. Zielezinski, S. Vinga, J. Almeida, and W. M. Karlowski, Alignment-free sequence comparison: benefits, applications, and tools, Genome Biology 2017 18:1, 18, 1, 1–17, Oct. 2017. https://doi.org/10.1186/S13059-017-1319-7.
- [9] A. Zielezinski et al., Benchmarking of alignment-free sequence comparison methods, Genome Biol, 20, 1, 1–18, Jul. 2019. https://doi.org/10.1186/S13059-019-1755-7/TABLES/1.
- [10] R. Rizzo, A. Fiannaca, M. La Rosa, and A. Urso, A deep learning approach to DNA sequence classification, Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 9874 LNCS, 129–140, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44332-4_10/FIGURES/7.
- [11] O. Bonham-Carter, J. Steele, and D. Bastola, Alignment-free genetic sequence comparisons: a review of recent approaches by word analysis, Brief Bioinform, 15, 6, 890–905, Nov. 2014. https://doi.org/10.1093/BIB/BBT052.
- [12] M. Uddin, M. K. Islam, M. R. Hassan, F. Jahan, and J. H. Baek, A fast and efficient algorithm for DNA sequence similarity identification, Complex and Intelligent Systems, 9, 2, 1265–1280, Apr. 2023. https://doi.org/10.1007/S40747-022-00846-Y/TABLES/12.
- [13] S. Zou, L. Wang, and J. Wang, A 2D graphical representation of the sequences of DNA based on triplets and its application, EURASIP J Bioinform Syst Biol, 2014, 1, 2014. https://doi.org/10.1186/1687-4153-2014-1.
- [14] N. Jafarzadeh and A. Iranmanesh, C-curve: A novel 3D graphical representation of DNA sequence based on codons, Math Biosci, 241, 2, 217–224, Feb. 2013. https://doi.org/10.1016/J.MBS.2012.11.009.
- [15] P. Waz and D. Bielińska-Waz, Non-standard similarity/dissimilarity analysis of DNA sequences, Genomics, 104, 6, 464–471, Dec. 2014. https://doi.org/10.1016/J.YGENO.2014.08.010.
- [16] B. Liao, M. Tan, and K. Ding, A 4D representation of DNA sequences and its application, Chem Phys Lett, 402, 4–6, 380–383, Feb. 2005. https://doi.org/10.1016/J.CPLETT.2004.12.062.
- [17] B. Liao, R. Li, W. Zhu, and X. Xiang, On the similarity of DNA primary sequences based on 5-D representation, J Math Chem, 42, 1, 47–57, Jul. 2007. https://doi.org/10.1007/S10910-006-9091-Z/METRICS.
- [18] B. Liao and T. M. Wang, Analysis of similarity/dissimilarity of DNA sequences based on nonoverlapping triplets of nucleotide bases, J Chem Inf Comput Sci, 44, 5, 1666–1670, Sep. 2004. https://doi.org/10.1021/CI034271F/ASSET/IMAGES/ LARGE/CI034271FF3.JPEG.
- [19] E. Delibaş and A. Arslan, DNA sequence similarity analysis using image texture analysis based on first-

order statistics, J Mol Graph Model, 99, p. 107603, Sep. 2020. https://doi.org/10.1016/j.jmgm.2020.107603.

- [20] W. Chen, B. Liao, and W. Li, Use of image texture analysis to find DNA sequence similarities, J Theor Biol, 455, 1–6, Oct. 2018. https://doi.org/10.1016/J.JTBI.2018.07.001.
- [21] M. Li and P. Vitányi, An introduction to Kolmogorov complexity and its applications, 3. Springer, 2008.
- [22] H. H. Otu and K. Sayood, A new sequence distance measure for phylogenetic tree construction, Bioinformatics, 19, 16, 2122–2130, Nov. 2003. https://doi.org/10.1093/BIOINFORMATICS/BTG295
- [23] E. Delibaş and A. Arslan, A new feature vector model for alignment-free DNA sequence similarity analysis, Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 40, 3, 610–619, Oct. 2022. https://doi.org/10.14744/sigma.2022.00065.
- [24] J. P. Bao and R. Y. Yuan, A wavelet-based feature vector model for DNA clustering, Genet Mol Res, 14, 4, 19163–19172, Dec. 2015. https://doi.org/10.4238/2015.DECEMBER.29.26.
- [25] G. Mendizabal-Ruiz, I. Román-Godínez, S. Torres-Ramos, R. A. Salido-Ruiz, H. Vélez-Pérez, and J. A. Morales, Genomic signal processing for DNA sequence clustering, PeerJ, 2018, 1, p. e4264, Jan. 2018. https://doi.org/10.7717/PEERJ.4264/SUPP-2.
- [26] S. Dey, P. Ghosh, and S. Das, Positional difference and Frequency (PdF) based alignment-free technique for genome sequence comparison, J Biomol Struct Dyn, Oct. 2023. https://doi.org/10.1080/07391102.2023.2272748.
- [27] S. Akbari Rokn Abadi, A. Mohammadi, and S. Koohi, A new profiling approach for DNA sequences based on the nucleotides' physicochemical features for accurate analysis of SARS-CoV-2 genomes, BMC Genomics, 24, 1, Dec. 2023. https://doi.org/10.1186/S12864-023-09373-7.
- [28] M. K. Ganapathiraju, A. D. Mitchell, M. Thahir, K. Motwani, and S. Ananthasubramanian, Suite of tools for statistical N-gram language modeling for pattern mining in whole genome sequences, J Bioinform Comput Biol, 10, 6, Dec. 2012. https://doi.org/10.1142/S0219720012500163.
- [29] H. U. Osmanbeyoglu and M. K. Ganapathiraju, N-gram analysis of 970 microbial organisms reveals presence of biological language models, BMC Bioinformatics, 12, p. 12, Jan. 2011. https://doi.org/10.1186/1471-2105-12-12.
- [30] M. R. Kantorovitz, G. E. Robinson, and S. Sinha, A statistical method for alignment-free comparison of regulatory sequences, Bioinformatics, 23, 13, i249– i255, Jul. 2007. https://doi.org/10.1093/BIOINFORMATICS/BTM211
- [31] K. Song, J. Ren, G. Reinert, M. Deng, M. S. Waterman, and F. Sun, New developments of alignment-free sequence comparison: measures, statistics and next-

generation sequencing, Brief Bioinform, 15, 3, 343–353, May 2014. https://doi.org/10.1093/BIB/BBT067.

- [32] H.-H. Huang and C. Yu, Clustering DNA sequences using the out-of-place measure with reduced n-grams, J Theor Biol, 406, 61–72, 2016. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2016.06.0 29.
- [33] M. S. Nawaz, P. Fournier-Viger, M. Aslam, W. Li, Y. He, and X. Niu, Using alignment-free and pattern mining methods for SARS-CoV-2 genome analysis, Applied Intelligence, 53, 19, 21920–21943, Oct. 2023. https://doi.org/10.1007/S10489-023-04618-0/TABLES/13.
- [34] T. Wang, Z. G. Yu, and J. Li, CGRWDL: alignmentfree phylogeny reconstruction method for viruses based on chaos game representation weighted by dynamical language model, Front Microbiol, 15, p. 1339156, Mar. 2024. https://doi.org/10.3389/EMICB.2024.1339156/BIBTE

https://doi.org/10.3389/FMICB.2024.1339156/BIBTE X.

- [35] B. Morgenstern, J. Söding, C. Bleidorn, A. Sturm, J. de Vries, and F. Manea, Alignment-free Phylogenetic Placement and its Applications, Feb. 2023. https://doi.org/10.53846/GOEDISS-9762.
- [36] J. S. Almeida, J. A. Carriço, A. Maretzek, P. A. Noble, and M. Fletcher, Analysis of genomic sequences by Chaos Game Representation, Bioinformatics, 17, 5, 429–437, May 2001. https://doi.org/10.1093/BIOINFORMATICS/17.5.429
- [37] S. Safoury and W. Hussein, Enriched DNA strands classification using CGR images and convolutional neural network, ACM International Conference Proceeding Series, 87–92, Oct. 2019. https://doi.org/10.1145/3369166.3369176.
- [38] K. Dick and J. R. Green, Chaos Game Representations Deep Learning for Proteome-Wide Protein Prediction, Proceedings - IEEE 20th International Conference on Bioinformatics and Bioengineering, BIBE 2020, 115– 121, Oct. 2020. https://doi.org/10.1109/BIBE50027.2020.00027.
- [39] R. Rizzo, A. Fiannaca, M. La Rosa, and A. Urso, Classification experiments of DNA sequences by using a deep neural network and chaos game representation, ACM International Conference Proceeding Series, 1164, 222–228, Jun. 2016. https://doi.org/10.1145/2983468.2983489.
- [40] K. Zheng, Z. H. You, J. Q. Li, L. Wang, Z. H. Guo, and Y. A. Huang, ICDA-CGR: Identification of circRNAdisease associations based on Chaos Game Representation, PLoS Comput Biol, 16, 5, May 2020. https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PCBI.1007872.
- [41] C. Sravani, P. Pavani, G. Y. Vybhavi, G. Ramesh, A. Farman, and L. Venkareswara Reddy, Decoding the Human Genome: Machine Learning Techniques for DNA Sequencing Analysis, E3S Web of Conferences, 430, Oct. 2023. https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202343001067.

- [42] A. Yang, W. Zhang, J. Wang, K. Yang, Y. Han, and L. Zhang, Review on the Application of Machine Learning Algorithms in the Sequence Data Mining of DNA, Front Bioeng Biotechnol, 8, Sep. 2020. https://doi.org/10.3389/FBIOE.2020.01032.
- [43] B. A. Bredesen and M. Rehmsmeier, DNA sequence models of genome-wide Drosophila melanogaster Polycomb binding sites improve generalization to independent Polycomb Response Elements, Nucleic Acids Res, 47, 15, 7781–7797, Sep. 2019. https://doi.org/10.1093/NAR/GKZ617.
- [44] S. Das, A. Das, D. K. Bhattacharya, and D. N. Tibarewala, A new graph-theoretic approach to determine the similarity of genome sequences based on nucleotide triplets, Genomics, 112, 6, 4701–4714, Nov. 2020. https://doi.org/10.1016/J.YGENO.2020.08.023.
- [45] T. Hoang, C. Yin, and S. S. T. Yau, Numerical encoding of DNA sequences by chaos game representation with application in similarity comparison, Genomics, 108, 3–4, 134–142, Oct. 2016. https://doi.org/10.1016/J.YGENO.2016.08.002.
- [46] T. Hoang, C. Yin, H. Zheng, C. Yu, R. Lucy He, and S. S. T. Yau, A new method to cluster DNA sequences using Fourier power spectrum, J Theor Biol, 372, 135–145, May 2015. https://doi.org/10.1016/J.JTBI.2015.02.026.
- [47] D. Quan, N. Nguyen, L. Xing, P. Dong, T. Le, and L. Lin, A graph-theoretical approach to DNA similarity analysis, bioRxiv, p. 2021.08.05.455342, Aug. 2021. https://doi.org/10.1101/2021.08.05.455342.
- [48] X. Jin et al., A novel DNA sequence similarity calculation based on simplified pulse-coupled neural network and Huffman coding, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 461, 325–338, Nov. 2016. https://doi.org/10.1016/J.PHYSA.2016.05.004.
- [49] E. Delibaş, A. Arslan, A. Şeker, and B. Diri, A novel alignment-free DNA sequence similarity analysis

approach based on top-k n-gram match-up, J Mol Graph Model, 100, p. 107693, Nov. 2020. https://doi.org/10.1016/j.jmgm.2020.107693.

- [50] R. Dong, L. He, R. L. He, and S. S. T. Yau, A novel approach to clustering genome sequences using internucleotide covariance, Front Pharmacol, 10, FEB, p. 423682, Apr. 2019. https://doi.org/10.3389/FGENE.2019.00234/BIBTEX.
- [51] H. J. Jeffrey, Chaos game representation of gene structure., Nucleic Acids Res, 18, 8, p. 2163, Apr. 1990. https://doi.org/10.1093/NAR/18.8.2163.
- [52] F. Zhuang et al., A Comprehensive Survey on Transfer Learning, Proceedings of the IEEE, 109, 1, 43–76, Jan. 2021. https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.3004555.
- [53] S. Eskandari, A. Eslamian, and Q. Cheng, Comparative Analysis of Transfer Learning Models for Breast Cancer Classification, Aug. 2024. https://doi.org/10.1109/AIC61668.2024.10731032.
- [54] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, Deep Residual Learning for Image Recognition, 2016. Accessed: Oct. 16, 2024. [Online]. Available: http://imagenet.org/challenges/LSVRC/2015/
- [55] F. Hong, D. W. L. Tay, and A. Ang, Intelligent Pickand-Place System Using MobileNet, Electronics 2023, 12, Page 621, 12, 3, p. 621, Jan. 2023. https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS12030621.
- [56] J. Ren et al., Alignment-Free Sequence Analysis and Applications, Annu Rev Biomed Data Sci, 1, p. 93, Jul. 2018. https://doi.org/10.1146/ANNUREV-BIODATASCI-080917-013431.
- [57] K. Tamura, G. Stecher, and S. Kumar, MEGA11: Molecular Evolutionary Genetics Analysis Version 11, Mol Biol Evol, 38, 7, 3022–3027, Jun. 2021. https://doi.org/10.1093/MOLBEV/MSAB120.


NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 532-541 Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi



Araștırma makalesi / Research article

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

Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences



Transforming ladle furnace slag into an efficient catalyst for hydrogen production by ammonia decomposition

Pota ocağı cürufunun amonyak ayrışması yoluyla hidrojen üretimi için verimli bir katalizöre dönüştürülmesi

Samira F. Kurtoğlu Öztulum^{1,*} 匝

¹Department of Chemical and Biological Engineering, Koç University, Rumelifeneri Yolu, Sariyer, 34450 Istanbul, Türkiye ¹ Koç University TÜPRAŞ Energy Center (KUTEM), Koç University, Rumelifeneri Yolu, Sariyer, 34450 Istanbul, Türkiye ¹ Department of Materials Science and Technology, Faculty of Science, Turkish-German University, Sahinkaya Cad., Beykoz, 34820 Istanbul, Türkiye

Abstract

Ladle furnace slag (LFS), a byproduct of steel production, was modified via HCl treatment and calcination to obtain an efficient catalyst for ammonia decomposition. The unmodified catalyst (LFS-C500) and its modified counterpart (MLFS-C500) were thoroughly characterized by a combination of techniques, including temperature programmed reduction (TPR), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy coupled with energy dispersive X-ray spectroscopy (SEM/EDX), and X-ray fluorescence (XRF). MLFS-C500 outperformed LFS-C500, achieving 96.3% ammonia conversion at 700 °C and a space velocity of 6 000 ml NH₃/($h \times g_{cat}$), with a lower activation energy (131.7 kJ/mol) compared to LFS-C500 (153.0 kJ/mol). The superior performance of MLFS-C500 is attributed to its higher iron content, which successfully forms Fe crystallites upon reduction in H₂, and its enhanced surface structure, resulting from the removal of calcium upon HCl modification. This compounds work demonstrates how an industrial waste can be effectively valorised into low-cost catalysts for COx-free hydrogen production.

Keywords: Ammonia decomposition, Hydrogen storage, Heterogeneous catalysis, Ladle furnace slag, Catalyst characterization

1 Introduction

Hydrogen is a clean energy carrier with a high energy-toweight ratio providing an energy density of 120 MJ/kg [1]. However, the low density of hydrogen creates challenges for its safe and efficient storage, which must be resolved for hydrogen to become a viable replacement for fossil fuels.

One method for storing hydrogen involves using highpressure tanks, however this approach suffers from high gas pressures, creating safety risks [2]. Another option is the liquefaction of hydrogen, though it is energy-intensive and costly [2]. Hydrogen can be lost because of boil-off, making this method less practical. Physisorption of hydrogen on porous materials like zeolites [3], metal organic frameworks [4], or carbon-based materials is another approach, but the

Öz

Pota ocağı cürufu (LFS), çelik üretiminin bir yan ürünü olup, HCl ile muamele ve kalsinasyon yoluyla amonyak ayrışması için verimli bir katalizör haline getirilmiştir. Tepkimeden önce ve sonra modifive edilmemis katalizör (LFS-C500) ve modifiye edilmiş katalizör (MLFS-C500), sıcaklık programlı indirgeme (TPR), X-ışını kırınımı (XRD), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi ile taramalı elektron mikroskobu (SEM/EDX) ve X-ışını floresansı (XRF) gibi tekniklerle ayrıntılı bir şekilde karakterize edilmiştir. MLFS-C500, 700 °C'de ve 6000 ml NH₃/(h \times gkat) boşluk hızında %96.3 amonyak dönüşümü sağlayarak, LFS-C500'den daha üstün bir performans sergilemiştir. Ayrıca, MLFS-C500 (131.7 kJ/mol), LFS-C500'e (153.0 kJ/mol) kıyasla daha düşük bir aktivasyon enerjisi göstermiştir. MLFS-C500'ün üstün performansı, modifikasyon ile kalsiyum iceren bilesiklerin giderilmesi sonucu artan demir içeriği ve bu demir içeriğinin başarılı bir şekilde H2 ile indirgeme sırasında Fe kristalitlerine dönüştürülmesi ile gelişmiş yüzey yapısına atfedilmiştir. Bu çalışma, endüstriyel atıkların COx açığa çıkarmadan hidrojen üretimi için düşük maliyetli katalizörlere nasıl etkin bir şekilde dönüştürülebileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Amonyak ayrışması, Hidrojen depolama, Heterojen kataliz, Pota ocağı cürufu, Katalizör karakterizasyonu

low adsorption capacity and need for low temperatures limits its practical application. Alternatively, storing hydrogen chemically in molecules such as methane, methanol, or ammonia [5] can overcome these issues. Among these molecules, ammonia stands out thanks to its carbon-free composition, high volumetric and gravimetric hydrogen density, existing infrastructure, and non-flammability, making it an ideal choice for CO_x -free hydrogen storage [6].

High-performance catalysts are essential for cracking ammonia to hydrogen and nitrogen. Ru-, Ni-, Co-, and Febased catalysts have shown promise, with Ru-based catalysts leading in performance [7]. However, the high cost and scarcity of Ru are major drawbacks. Although Fe-, Co- and Ni-based catalysts are cheaper alternatives, complex production routes or the need for expensive support materials

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: samira.kurtoglu@tau.edu.tr (S. F. Kurtoğlu Öztulum) Geliş / Received: 21.10.2024 Kabul / Accepted: 12.02.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngumuh.1571359

can hinder their use, as well. Thus, there is a strong need for an affordable and efficient catalyst synthesized using simple methods for hydrogen production from ammonia.

One alternative potential solution is to create costeffective catalysts by reusing industrial wastes through simple modifications. For example, fly ash, a byproduct of coal combustion rich in SiO₂, Al₂O₃, and Fe₂O₃, could be modified through heat treatment and acid washing to serve as a support material for Ru in ammonia decomposition [8]. This modification enhanced the surface area of fly ash, improving Ru dispersion and enhancing ammonia decomposition rates. In another study, Cao and colleagues modified red mud, a byproduct of the aluminum production rich in Fe₂O₃, and used it as a support for Ni [9]. Modified red mud-supported Ni catalyst with a Ni loading of 12 wt% showed the highest activity for ammonia decomposition. These studies highlight the potential of utilizing waste materials as catalyst supports to produce cost-effective catalysts. Additionally, these waste materials can be used directly as bulk catalysts upon simple modifications and without the addition of external metals, offering an even more economical approach. For example, Kurtoğlu et al. demonstrated that red mud could be transformed into an Febased catalyst upon simple acid and heat treatments [10, 11]. The intrinsic Fe content of red mud acted as the active site, and the produced red mud-derived iron-based catalysts provided record high hydrogen production rates for ammonia decomposition compared to other non-noble metal-based catalysts reported in the literature.

Motivated from these promising findings, this study aims to transform ladle furnace slag (LFS), a byproduct of steel industry, into a catalyst for ammonia decomposition without the addition of external metals. LFS is one of the four major slags produced in the iron and steel industry, alongside blast furnace slag, basic oxygen furnace slag, and electric arc furnace slag [12]. LFS is produced in the final steps of steel production and is classified as a basic slag. It is rich in CaO, MgO (which also contributes to its basicity), Al₂O₃, SiO₂, and Fe₂O₃ [13].

In this work, LFS was modified by an acid digestionprecipitation method, commonly applied to industrial wastes such as red mud to enhance surface area and reduce alkali content [14]. Both the as-received LFS and modified ladle furnace slag (MLFS) were tested for ammonia decomposition to produce CO_x -free hydrogen. This study is the first demonstration of ladle furnace slag being used as a catalyst in ammonia decomposition. This approach demonstrates how industrial wastes can be transformed into efficient and cost-effective catalysts, offering a sustainable solution for hydrogen production while addressing waste management in the steel industry.

2 Materials and methods

2.1 Sample preparation

LFS used in this study was kindly provided by Kardemir-Karabük Demir Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş. LFS was calcined at 500 °C in static air for 2 hours following a ramp rate of 5 °C/min to obtain LFS-C500. MLFS was obtained by following the route described elsewhere [14]. In

short, 25 gram LFS was first mixed with 100 ml distilled water and then mixed with 150 ml of 6 M HCl solution. This mixture was digested in a Milestone Microwave Digestion System (SK-10) with a temperature controller, operating at 350 W at 220 °C. The resulting sample was precipitated by adding aqueous ammonia until a pH of 8 was reached. The resulting sample was washed several times with distilled water, separated by centrifugation, and dried in a vacuum oven overnight at 110 °C. The resulting sample was coded as MLFS. When MLFS was calcined at 500 °C in static air for 2 hours following a ramp rate of 5 °C/min, MLFS-C500 was obtained.

2.2 Characterization

X-ray diffraction (XRD) measurements were carried out using a Rigaku MiniFlex 600 equipped with Cu Ka radiation (40 kV, 15 mA). A Zeiss Ultra Plus field emission scanning electron microscope operating at ultra vacuum and at an accelerating voltage of 5 kV was used to obtain scanning electron microcopy (SEM) images. Energydispersive X-ray spectroscopy (EDX) imaging was performed on this microscope with a XFlash 5010 detector. X-ray fluorescence (XRF) measurement was performed on the as-received LFS using a Panalytical/Axios MAX spectrometer, by preparing a pellet of approximately 10 g of sample. Temperature programmed reduction (TPR), CO₂ desorption (CO2-TPD), and NH3 desorption (NH3-TPD) was conducted on a Micromeritics AutoChem II 2920. For TPR, 100 mg sample was placed in a U-shaped quartz reactor. The sample was reduced in 15 ml/min pure H₂ flow at 700 °C for 2 hours, following a ramp rate of 5 °C/min. During H₂reduction, the effluent gas was analyzed by a thermal conductivity detector (TCD). For CO₂-TPD, 0.1 g of sample was initially treated under helium flow at 300 °C for 1 hour, after which the sample was allowed to cool to room temperature. Subsequently, CO₂ was introduced at room temperature for 1 hour to enable adsorption. The temperature was then ramped up to 600 °C at a rate of 10 °C/min under helium flow. For both NH₃- and CO₂-TPD experiments, the effluent gas was analyzed by using a TCD. Brunauer-Emmett-Teller (BET) surface area analysis was conducted using an Anton Paar Nova800 Physisorption Analyzer. For this purpose, 0.8 g of sample was used for LFS and LFS-C500, while 0.2 g was utilized for MLFS and MLFS-C500. Prior to analysis, all samples were degassed under vacuum at 120 °C for 8 hours.

2.3 Catalytic activity measurement

300 mg of catalyst was sandwiched between two quartz wool layers to fix the catalyst bed in the middle of a quartz reactor. The quartz reactor with the catalyst was placed in a Carbolite split-tube furnace. Reduction in H₂ was performed prior to catalytic performance measurement at the same conditions used for TPR measurements (at 700 °C for 2 hours, ramp rate = 5 °C/min). After reduction while at 700 °C, argon was used to purge the catalyst bed at a flow of 50 ml/min for 15 min. Then, the gas was changed to NH₃ at a flow of 50 ml/min (using 300 mg catalyst, this corresponds to a space velocity of 10 000 ml NH₃/(h × g_{cat})) at the same temperature of 700 °C to start the activation period that

lasted for approximately 13 hours. Once the induction period was complete, the temperature was decreased to obtain the Arrhenius plots and to measure the activation energy of the catalysts (below an ammonia conversion of 25%). At constant space velocity of 10 000 ml NH₃/($h \times g_{cat}$), the temperature was varied between 550 and 650 °C to obtain the Arrhenius plot of LFS-C500 and between 500 and 600 °C for MLFS-C500. Subsequently, the temperature was increased back to 700 °C and the space velocity was adjusted to 3000, 6000, 20 000, 30 000, and 40 000 ml $NH_3/(h \times g_{cat})$ to further investigate the potential of the catalysts. To ensure data stability, at least 45 minutes were allowed for each data point. Thus, each experiment lasted approximately 21 hours (after the H₂ reduction): 13 hours for the induction period, 4 hours for obtaining the Arrhenius plot, and the final 4 hours for investigating the space velocity. Conversion was monitored continuously by a Hidden QGA mass spectrometer that was calibrated for H₂, N₂, and NH₃ using the corresponding m/z ratios of 2, 28, and 17.

3 Results and discussion

The XRF analysis result of the as-received LFS is provided in Table 1. Components such as SiO₂, MgO, and Al₂O₃, commonly used as support materials in catalysis, are prominent in the LFS. Additionally, oxides such as K₂O, Na₂O, MnO, or BaO that can act as promoters, are also present among the detected components of LFS. Fe₂O₃ is notable for providing active sites for ammonia decomposition reaction.

Table 1. Com	position	of LFS	obtained	by	XRF
--------------	----------	--------	----------	----	-----

Compound	Concentration (wt%)
CaO	51.15
SiO ₂	20.05
MgO	9.13
Al_2O_3	8.92
SO_3	3.77
Fe_2O_3	3.50
F	1.35
Na ₂ O	0.53
MnO	0.49
TiO ₂	0.31
Others	0.79

Figure 1 presents the SEM images captured with a backscattered electron detector, with corresponding EDX spectra of as-received LFS and its modified counterpart (MLFS). Table 2 shows the elemental composition of LFS and MLFS obtained by analysis of the EDX spectrum provided in Figure 1b and d. Consistent with the XRF results of LFS (Table 1), the EDX spectrum confirms that the most abundant component in LFS is Ca, indicated by the most intense peak in its spectrum (Figure 1b, Table 2). After modification, however, the Ca content decreased significantly (Figure 1d, Table 2), making MLFS a more suitable catalyst because of the increased relative concentrations of the oxides of Fe, Si, Al and Mg, combined with the reduction in Ca. Particularly, the increase in Fe content from 2.74 wt% to 7.93% upon modification is

important, as Fe sites will act as active sites for the ammonia decomposition reaction.

Additionally, Figure 1d and Table 2 reveal a significant increase in the Cl content of MLFS, a residual byproduct left from the acid modification process. Therefore, to eliminate the Cl-containing compounds, both LFS and MLFS were calcined at 500 °C in air prior to further use in catalytic performance tests, as Cl is a known poison in catalysis [15]. Previous studies have demonstrated that a calcination at 500 °C effectively removes Cl-containing residues from materials modified by similar processes [14].



Figure 1. SEM image of a) LFS and b) corresponding EDX spectrum, SEM image of c) MLFS and d) corresponding EDX spectrum.

Table 2. Elemental composition of LFS and MLFS obtainedby EDX spectrum analysis.

Chamical	Composition (%)					
Chemical	LFS	MLFS				
Ca	62.65	8.79				
Si	12.96	35.57				
Al	8.05	12.90				
K	0.55	1.15				
Mg	8.74	11.62				
S	2.96	3.69				
Fe	2.74	7.93				
Na	1.36	1.08				
Cl	-	15.15				
Ti	-	2.14				

Figure 2 shows the XRD patterns of LFS, MLFS, LFS-C500 and MLFS-C500. The XRD pattern of as-received LFS exhibits five major phases. Peaks at 15.7, 20.5, 21.8, 23.2, 26.2, 29.6, 32.4, 32.7, 35.6, 36.8, and 47.5° indicate the presence of colcio-olivine, a calcium silicate, which was observed in LFS also by Sundhararasu et al. [16]. Peaks at 29.8, 33.4, and 41.6° were attributed to grossular, a calciumaluminum garnet [16]. Furthermore, periclase (MgO) was identified by peaks present at 42.8 and 62.2°, as also observed in another LFS sample by Aponte and colleagues [17]. Moreover, mayenite was detected by peaks located at 18.0, 29.8, 33.4, 41.2, and 46.9°, a phase commonly reported in previous LFS studies [13, 17, 18]. Moreover, calcite was observed as demonstrated by peaks labelled with "5" in Figure 2, in accordance with previous reports [16, 17]. These observed phases are consistent with the XRF results presented in Table 1.

Upon calcination of LFS, the crystal structure remained mostly unchanged, as observed in the XRD pattern of LFS-C500 (Figure 2, black line). However, the acid digestion (Figure 2, green line) causes a significant decrease in crystallinity, along with the disappearance of all phases observed in as-received LFS. Both MLFS and MLFS-C500 exhibit poor crystallinity, showing that upon acid digestion and reprecipitation, the resulting product is mostly in an amorphous phase. A similar decrease in crystallinity was also observed for another industrial waste, red mud, after being digested in acid [14]. The only prominent peak observed in the XRD of MLFS was at 26.5°, which may indicate the presence of quartz. However, the significant reduction in intensity of this peak following calcination (in MLFS-C500) decreases the likelihood of its attribution to quartz. Instead, it is more plausibly associated with a chlorine-containing byproduct formed during the acid modification process. This hypothesis is supported by previous studies [14], which reported the disappearance of similar peaks along with a concomitant reduction in chlorine content upon calcination.

To further investigate the structural changes in LFS upon modification, SEM images at higher magnifications were taken using a secondary electron detector (Figure 3). The SEM image of LFS (Figure 3a) reveals distinct morphologies, confirming its heterogeneous structure, as also confirmed by XRD analysis of LFS. The needle-like structures observed in Figure 3a are attributed to the presence of calcite, as they resemble previously reported needle-fibre calcite [19]. Upon acid modification (Figure 3b), these needle-like structures are no longer visible, supporting this observation. Additionally, it is worth noting that after modification and calcination (MLFS-C500), the morphology retains a porous structure, even after high-temperature calcination, with several pores appearing on the surface of MLFS-C500 (Figure 3c).



Figure 2. XRD patterns of LFS, MLFS, LFS-C500 and MLFS-C500. 1–Calcioolivine (γ -Ca₂SiO₄), 2–Grossular (Ca₃Al₂(SiO₄)₃), 3–Periclase (MgO), 4–Mayenite (Ca₁₂Al₁₄O₃₃), 5–Calcite (CaCO₃).



Figure 3. SEM images obtained on a) LFS, b) MLFS, and c) MLFS-C500 at a magnification of 20 000×.

Surface area, pore volume, and pore sizes of the samples are provided in Table 3. The data show that the modification process significantly increased the surface area of LFS from 1.2 to 184.9 m²/g (MLFS), highlighting the effectiveness of the modification procedure. A subsequent calcination step, performed on MLFS to remove residual impurities from acid digestion, reduced the surface area to 139.9 m²/g. Despite this decrease, the surface area remained substantially higher compared to the as-received LFS. In contrast, simple calcination performed directly on LFS (LFS-C500) had minimal impact on surface area, as shown by the low value of 1.5 m²/g for MLFS-C500. Comparing the pore volumes, it is evident that MLFS and MLFS-C500 exhibit a remarkable increase (approximately two orders of magnitude) compared to LFS and LFS-C500.

Table 3. Textural properties of LFS, LFS-C500, MLFS, and MLFS-C500.

Sample	BET surface area (m ² /g)	Pore volume (cm ³ /g)	Pore size (nm)
LFS	1.2	0.0036	4.0
LFS-C500	1.5	0.0051	4.0
MLFS	184.9	0.2926	3.7
MLFS-C500	139.9	0.3787	7.1

To evaluate the acid and base surface properties of a representative sample (MLFS-C500), NH₃-TPD and CO₂-TPD measurements were performed, respectively. The CO₂-TPD analysis revealed three main desorption peaks located at 142, 425, and 513 °C (Figure 4a). The peak at 142 °C corresponds to weak basic sites, while the peaks at 425 and 513 °C, though less intense, clearly indicate the presence of strong basic sites. These findings suggest that MLFS-C500 possesses a variety of basic sites capable of donating electrons to active sites, potentially playing a significant role in ammonia decomposition. This is particularly relevant because the rate-limiting step in ammonia decomposition, the combinative desorption of nitrogen from the surface, is known to be accelerated by basic supports. In contrast, the NH₃-TPD profile of MLFS-C500 exhibits a single peak at 117 °C, most likely corresponding to physisorbed NH₃ (Figure 4b). While a few very low-intensity shoulders and features are present, they are indistinct and therefore not labeled on the graph. This indicates that MLFS-C500 predominantly provides basic rather than acidic sites, making it a promising candidate for utilization in NH₃ decomposition.

Prior to NH₃ decomposition reaction, catalysts must be reduced under H₂ to convert the iron oxide content present in LFS-C500 and MLFS-C500 to the active bulk Fe phase. To confirm the conversion of Fe₂O₃ to Fe during this reduction, TPR measurements were conducted (Figure 5). The most intense peak at 630 °C in the TPR curve of LFS-C500 (Figure 5a) is attributed to the reduction of Ca-containing phases, because it was reported earlier that CaO provides reduction peaks at around 610 °C [20]. The overlapping peaks at approximately 407 and 442 °C might be related to the first reduction step of Fe₂O₃, indicating the reduction of Fe₂O₃ to Fe₃O₄. The reduction of Fe₂O₃ to Fe₃O₄ was reported at 380 °C for pure Fe₂O₃ [21] and at 442 °C in a Fe₂O₃-rich waste material [10] under identical ramp rates during TPR to those used in this study. The shoulder appearing at 670 °C might be associated with the further reduction of Fe₃O₄ to FeO and FeO to Fe, as these transitions are typically reported as a broad peak occurring between 400 and 600 °C [10, 21]. However, it should be noted that these less intense peaks at 407, 442, and 670 °C can be also associated with the localized reduction of calcium-containing compounds particularly at grain boundaries or defect sites.



Figure 4. a) CO₂-TPD and b) NH₃-TPD profiles of MLFS-C500.

The TPR curve of MLFS-C500 is shown in Figure 5b. The peak associated with the Ca-containing compounds' reduction, which was observed at 630 °C in LFS-C500 (Figure 5a), became broader and shifted to a lower temperature (550 °C) after modification. This is expected because of the decrease in calcium content, as evidenced by EDX analysis. The peak at 550 °C appears to be a combined peak, representing the reduction of the left Ca-containing compounds, as well as the second step of Fe₂O₃ reduction (Fe₃O₄ to FeO and FeO to Fe). Moreover, the shoulder appearing at 453 °C might be associated with the first step of Fe₂O₃ reduction (Fe₂O₃ reduction (Fe₂O₃ to Fe₃O₄).

The TPR curves of both LFS-C500 and MLFS-C500 confirm that the selected reduction temperature, ramp rate, and duration were appropriate for successfully reducing the species present in the samples, as the TCD signals stabilized for both catalysts after approximately 150 minutes of time-on-stream (Figure 5a and b).



Figure 5. TPR curves of a) LFS-C500 and b) MLFS-C500.

The reduced versions of LFS-C500 and MLFS-C500 were further characterized using SEM (Figure 6). The SEM image of LFS-C500 reduced in H₂ (Figure 6a) clearly shows the relatively flat morphology with some granular structures. In contrast, even upon a reduction at 700 °C, the porous morphology on MLFS-C500 is still retained (Figure 6b), resembling the SEM image of its fresh counterpart (Figure 3c).



Figure 6. SEM images obtained on the reduced LFS-C500 and b) reduced MLFS-C500 at a magnification of 10 000×.

XRD patterns obtained on the reduced catalysts are presented in Figure 7. While the reduced LFS-C500 did not show significant difference compared to the XRD pattern of fresh LFS-C500 (Figure 2, black line), the reduction of MLFS-C500 was highly effective in reducing the iron content, as evidenced by the very sharp and intense Fe peaks detected at 44.6, 65.0, and 82.3° (Figure 7, blue line). The absence of intense and well-defined bulk Fe peaks in the reduced form of LFS-C500 supports the fact that the reduction peaks observed at 407, 442, and 670 °C may be associated with the reduction of calcium-containing compounds (Figure 5a).



Figure 7. XRD patterns of reduced catalysts.

After confirming the successful reduction of components in both LFS-C500 and MLFS-C500 (Figure 5), the catalysts were tested for ammonia decomposition. The catalysts were first reduced in the catalytic testing system following the same procedure used for obtaining the TPR curves in Figure 5, after which the gas was switched to NH₃. Following the induction period at 700 °C (Figure 8a), the temperature was decreased to measure the activation energy (Figure 8b) of the catalysts, in the region where low conversions are reached (< 25 %).

As shown in Figure 8a, LFS-C500 completed its induction period within approximately 4 hours, while the ammonia conversion of MLFS-C500 steadily increased up to 13 hours time-on-stream. Although LFS-C500 achieved a stable ammonia conversion earlier, both catalysts were subjected to a 13-hour induction period prior to the activation energy measurements. At the end of this 13 h-induction period, LFS-C500 achieved an ammonia conversion of 53.3 % at a space velocity of 10 000 ml NH₃/(h × g_{cat}) and at a temperature of 700 °C, whereas the modified counterpart (MLFS-C500) provided a significantly enhanced ammonia conversion of 80.1 % at identical conditions (Figure 8a).



Figure 8. a) Activation period of the catalysts at 700 °C and at a space velocity of 10 000 ml NH₃/($h \times g_{cat}$) and b) Arrhenius plots of the catalysts.

The enhanced ammonia decomposition is further reflected by the catalysts' Arrhenius plots (Figure 8b). The activation energies of LFS-C500 and MLFS-C500 were determined as 153.0 and 131.7 kJ/mol, respectively, typical values for iron-based catalysts [22, 23, 24]. It should be noted that the modification not only increased the number of active sites by reducing the CaO content, but also resulted in a decrease in activation energy.

To further evaluate the catalytic performance of the two catalysts, the space velocity was varied at 700 °C and the ammonia conversions (Figure 9a) and corresponding H₂ production rates (Figure 9b) were obtained. As the space velocity decreases, fewer NH₃ molecules interact with each Fe active center, resulting in an increase in ammonia conversion, as shown in Figure 9a. However, while lower space velocity enhances ammonia conversion, the reduced NH₃ flow through the reactor leads to a decrease in hydrogen production rates per unit time, as illustrated in Figure 9b. The selection of the optimum space velocity depends on the specific requirements of the process. For applications prioritizing higher conversion rates and purer products, a space velocity of 3000 mL $NH_3/(h \times g_{cat})$ seems more suitable. Conversely, in processes where unconverted NH₃ can be separated and higher hydrogen production rates are desired, higher space velocity values are more suitable. Hence, the optimum reaction conditions can be determined based on the specific needs of the application.

Data show that MLFS-C500 significantly outperformed LFS-C500, emphasizing the effectiveness of a simple acid modification followed by calcination for improving the

structural characteristics and catalytic performance of slags. For instance, at a space velocity of 6 000 ml NH₃/(h × g_{cat}) and a temperature of 700 °C, MLFS-C500 provided an ammonia conversion of 96.3 % corresponding to a hydrogen production rate of 5.9 mmol H₂ / (min × g_{cat}). At identical conditions, LFS-C500 provided an ammonia conversion of 64.7 % and a hydrogen production rate of 4.0 mmol H₂ / (min × g_{cat}), markedly lower than its modified counterpart. Ammonia decomposition tests conducted at a large range of temperatures (Figure 9c) further demonstrate that MLFS-C500 outperforms LFS-C500 at all temperatures (Figure 8c). This enhanced performance is attributed to the increased iron content, resulting because of the decrease of the amount of CaO, the successful formation of iron crystallites, and the improved textural properties.



Figure 9. a) Ammonia conversions and b) H_2 production rates of the catalysts at varying space velocities at a constant temperature of 700 °C. c) Ammonia conversions at a constant space velocity of 10 000 ml NH₃/(h × g_{cat}) at varying temperatures.

The catalytic performance of the almost cost-free MLFS-C500 was compared with several non-noble metal-based ammonia decomposition catalysts reported in the literature (Table 4). For example, while a Fe-containing carbon nanotube catalyst provided 75.1 % conversion at a space velocity of 5 000 ml NH₃/(h × g_{cat}), MLFS-C500 provided 96.3 % conversion at the same temperature at an even slightly higher space velocity of 6 000 ml NH₃/($h \times g_{cat}$). Moreover, a Ni/SiO₂ catalyst provided 36.4 % conversion at 600 °C and at a space velocity of 30 000 ml NH₃/($h \times g_{cat}$), while MLFS-C500 provided 24.1 % conversion at 10 000 ml $NH_3/(h \times g_{cat})$ at the same temperature. Furthermore, a two dimensional mica nanosheet-supported Fe catalyst provided 97.1 % conversion at 700 °C and at a space velocity of 30 000 ml NH₃/(h \times g_{cat}), while MLFS-C500 provided 66.1 % conversion at identical conditions. Although MLFS-C500 underperformed compared to some of these catalysts, it is important to highlight that MLFS-C500 is nearly cost-free and produced through simple techniques, whereas the Fe/mica nanosheet and Ni/SiO2 catalysts are associated with higher costs.

Table 4. Catalytic performance comparison of MLFS-C500 with several non-noble metal-based catalysts in the literature.

Catalyst	Temperature (°C)	Conversion (%)	Space velocity ml NH ₃ /(h × g _{cat})	Ref.
MLFS-C500	700	96.3	6 000	This study
MLFS-C500	700	73.3	20 000	This study
MLFS-C500	700	66.1	30 000	This
MLFS-C500	600	24.1	10 000	This study
Fe- CNT	700	75.1	5 000	[25]
5%Fe/MS-HP	700	97.1	30 000	[23]
Co/CNTs	700	100	20 000	[25]
10% Ni/SiO ₂	600	36.4	30 000	[26]



Figure 10. XRD patterns of spent catalysts.

XRD patterns of spent catalysts are presented in Figure 10. XRD pattern of spent MLFS-C500 shows iron crystallites, similar to its reduced form (Figure 7), pointing out that these iron crystallites are providing the active sites for this reaction. Low-intensity peaks belonging to Fe₂N were also observed, indicating the nitriding of a small amount of iron crystallites during the reaction. On the other hand, the spent catalyst of LFS-C500 shows no phase changes, resembling its fresh (Figure 2) and reduced (Figure 7) counterparts.

4 Conclusion

In this study, LFS, an industrial byproduct of steel production, was successfully transformed into an efficient catalyst for ammonia decomposition by a simple acid modification with HCl, followed by calcination at 500 °C. BET surface area measurements show that the surface area of as-received LFS significantly increased from 1.2 to 139.9 m^2/g upon acid modification and calcination, resulting in the modified slag, MLFS-C500. The TPR curves of both catalysts, LFS-C500 and MLFS-C500, confirmed the complete reduction of species in the slag-based catalysts when reduced in H₂ at 700 °C for 2 h following a ramp rate of 5 °C/min. XRD patterns of the reduced catalysts indicate that Fe crystallites are formed in MLFS-C500 upon reduction, while no significant phase changes were observed in LFS-C500. The successful formation of Fe crystallites in MLFS-C500 was attributed to its increased surface area resulting from modification. MLFS-C500 outperformed the unmodified LFS-C500 in ammonia decomposition tests, achieving higher ammonia conversion and hydrogen production rates. Specifically, MLFS-C500 provided 96.3 % ammonia conversion at a reaction temperature of 700 °C and a space velocity of 6 000 ml NH₃/($h \times g_{cat}$). The activation energies of LFS-C500 and MLFS-C500 were determined to be 153.0 and 131.7 kJ/mol, respectively, demonstrating a decrease in activation energy upon modification. Furthermore, MLFS-C500 exhibited competitive performance compared to other non-noble metal-based catalysts, while offering the advantage of being nearly costfree and produced through straightforward techniques. The enhanced catalytic performance of MLFS-C500 is attributed to its increased iron content, resulting from the removal of most of the calcium-containing compounds during modification, significantly improved surface area, and the formation of iron crystallites upon reduction which are the active sites for this reaction. This study highlights the potential of reusing industrial waste materials as low-cost catalysts for sustainable hydrogen production.

Acknowledgements

The author extends her sincere thanks to Prof. Alper Uzun from Koç University for his mentorship. Büşra Sekizkardeş is gratefully acknowledged for her help in modifying LFS. Special thanks to Dr. Barış Yağcı from Koç University Surface Science and Technology Center (KUYTAM) for his help in SEM/EDX measurements. The author thanks Ali Naci Zenginobuz for his support in BET surface area measurements. Koç University – Boron and Advanced Materials Applications and Research Center is gratefully acknowledged for XRD measurements. Special thanks to Karabük Demir Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş. for kindly providing LFS.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 16 %

References

- M. R. Usman, Hydrogen storage methods: Review and current status. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 167, 111743, 2022. https://doi.org/10.1016/j. rser.2022.112743.
- [2] S. Ristig, M. Poschmann, J. Folke, O. Gómez-Cápiro, Z. Chen, N. Sanchez-Bastardo, R. Schlögl, S. Heumann, H. Ruland, Ammonia decomposition in the process chain for a renewable hydrogen supply. Chemie Ingenieur Technik, 94, 1413-1425, 2022. https://doi.org/10.1002/cite.202200003.
- [3] J. Dong, X. Wang, H. Xu, Q. Zhao, J. Li, Hydrogen storage in several microporous zeolites. International Journal of Hydrogen Energy, 32, 4998-5004, 2007. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.08.009.
- M. Hirscher and B. Panella, Hydrogen storage in metal–organic frameworks. Scripta Materialia, 56, 809-812, 2007. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.0 1.005.
- [5] W. I. F. David, Effective hydrogen storage: A strategic chemistry challenge. Faraday Discussions, 151, 399– 414, 2011. https://doi.org/10.1039/C1FD00105A.
- [6] S. Sun, Q. Jiang, D. Zhao, T. Cao, H. Sha, C. Zhang, H. Song, Z. Da, Ammonia as hydrogen carrier: Advances in ammonia decomposition catalysts for promising hydrogen production. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 169, 112918, 2022. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112918.
- [7] J. E. Lee, J. Lee, H. Jeong, Y. K. Park, B. S. Kim, Catalytic ammonia decomposition to produce hydrogen: A mini-review. Chemical Engineering Journal, 475, 146108, 2023. https://doi.org/10.1016/j.c ej.2023.146108.
- [8] L. Li, S. Wang, Z. Zhu, X. Yao, Z. Yan, Catalytic decomposition of ammonia over fly ash supported Ru catalysts. Fuel Processing Technology, 89, 1106-1112, 2008. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.05.002.
- [9] J. L. Cao, Z. L. Yan, Q. F. Deng, Y. Wang, Z. Y. Yuan, G. Sun, T. K. Jia, X. D. Wang, H. Bala, Z. Y. Zhang, Mesoporous modified-red-mud supported Ni catalysts for ammonia decomposition to hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy, 39, 5747-5755, 2014. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.01.169.
- [10] S. F. Kurtoğlu, A. Uzun, Red Mud as an Efficient, Stable and Cost-Free Catalyst for CO_x-Free Hydrogen Production from Ammonia. Scientific Reports, 6, 32279, 2016. https://doi.org/10.1038/srep32279.
- [11] S. F. Kurtoğlu, S. Soyer-Uzun, A. Uzun, Modifying the structure of red mud by simple treatments for high and stable performance in CO_x-free hydrogen production from ammonia. International Journal of Hydrogen

Energy, 43, 20525-20537, 2018. https://doi.org/10.10 16/j.ijhydene.2018.09.032.

- [12] J. Setién, D. Hernández, J.J. González, Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material. Construction and Building Materials, 23, 1788-1794, 2009. https://doi.org/10.10 16/j.conbuildmat.2008.10.003.
- [13] A Rađenović, J Malina, T Sofilić, Characterization of ladle furnace slag from carbon steel production as a potential adsorbent. Advances in Materials Science and Engineering, 1, 198240, 2013. https://doi.org/10.1155 /2013/198240.
- [14] S. F. Kurtoğlu, S. Soyer-Uzun, A. Uzun, Tuning structural characteristics of red mud by simple treatments. Ceramics International, 42, 17581-17593, 2020. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.08.072.
- [15] W. Arabczyk, U. Narkiewicz, D. Moszyński, Chlorine as a poison of the fused iron catalyst for ammonia synthesis. Applied Catalysis A: General, 134, 331-338, 1996. https://doi.org/10.1016/0926-860X(95)00211-1.
- [16] E. Sundhararasu, S. Tuomikoski, H. Runtti, T. Hu, T. Varila, T. Kangas, U. Lassi, Alkali-Activated Adsorbents from Slags: Column Adsorption and Regeneration Study for Nickel(II) Removal. Chemengineering, 5, 13, 2021. https://doi.org/10.3390 /chemengineering5010013.
- [17] D. Aponte, O. S. Martin, S. Valls del Barrio, M. Barra Bizinotto, Ladle Steel Slag in Activated Systems for Construction Use. Minerals, 10, 687, 2020. https://doi. org/10.3390/min10080687.
- [18] Y. Wang, W. Ni, P. Suraneni, Use of Ladle Furnace Slag and Other Industrial By-Products to Encapsulate Chloride in Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash. Materials, 12, 925, 2019. https://doi.org/10.3390 /ma12060925.
- [19] N. Durand, H. C. Monger, M. G. Canti, Calcium Carbonate Features. In: Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths, Elsevier, pp. 149-194, 2010. https://doi.org/10.1016/B 978-0-444-53156-8.00009-X.
- [20] S. Sivasangar, M. S. Mastuli, A. Islam, Y. H. Taufiq-Yap, Screening of modified CaO-based catalysts with a series of dopants for the supercritical water gasification of empty palm fruit bunches to produce hydrogen. RSC Advances, 5, 36798-36808, 2015. https://doi.org/10.1039/C5RA03430B.
- [21] M. Liang, W. Kang, K. Xie, Comparison of reduction behavior of Fe₂O₃, ZnO and ZnFe₂O₄ by TPR technique. Journal of Natural Gas Chemistry, 18, 110-113, 2009. https://doi.org/10.1016/S1003-9953(08)60 073-0.
- [22] Ö. Akarçay, S. F. Kurtoğlu, A. Uzun, Ammonia decomposition on a highly-dispersed carbonembedded iron catalyst derived from Fe-BTC: Stable and high performance at relatively low temperatures. International Journal of Hydrogen Energy, 45, 28664-28681, 2020. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020. 07.188.

- [23] Z. P. Hu, C. C. Weng, C. Chen, Z. Y. Yuan, Twodimensional mica nanosheets supported Fe nanoparticles for NH₃ decomposition to hydrogen. Molecular Catalysis, 448, 162-170, 2018. https://doi. org/10.1016/j.mcat.2018.01.038.
- [24] W. Arabczyk, J. Zamlynny, Study of the ammonia decomposition over iron catalysts. Catalysis Letters, 60, 167-171, 1999. https://doi.org/10.1023/A:1019007 024041.
- [25] J. Zhang, M. Comotti, F. Schüth, R. Schlögl, D. S. Su, Commercial Fe- or Co-containing carbon nanotubes as catalysts for NH₃ decomposition. Chemical Communications, 19, 1916-1918, 2007. https://doi.org/ 10.1039/B700969K.
- [26] T.V. Choudhary, C. Sivadinarayana, D. W. Goodman, Catalytic ammonia decomposition: CO_x-free hydrogen production for fuel cell applications. Catalysis Letters, 72, 197-201, 2001. https://doi.org/10.1023/A:1009023 825549.



NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 542-550



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

Araștırma makalesi / Research article

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



Çok yönlü dövme ve yaşlandırma işlemlerinin Cu-Co-Be-Ni alaşımının darbe davranışına olan etkisinin incelenmesi

Investigation of the effect of multi-directional forging and aging processes on the impact behavior of Cu-Co-Be-Ni alloy

Harun Yanar^{1,*}🝺

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 61100, .Trabzon, Türkiye

Öz

Bu çalışma kapsamında Cu-Co-Be-Ni alasımına çözündürme, çok yönlü dövme (ÇYD) ve yaşlandırma işlemlerinin farklı kombinasyonlarını içeren işlem adımları uygulanmıştır. Uygulanan işlem adımları sonrası elde edilen farklı örneklerin mikroyapısal değişimi, mekanik özellikleri ve kırılma enerjisi (darbe sönüm kapasitesi) üzerindeki etkileri sistematik bir şekilde araştırılmıştır. Farklı prosesler kapsamında uygulanan işlem adımlarının alaşımın gerek mekanik gerekse mikroyapısal özellikleri üzerinde oldukça etkili olduğu görüldü. En iyi sertlik ve mukavemet değerleri sırasıyla uygulanan cözündürme, CYD ve yaşlandırma işlemleri sonrasında elde edilirken, kırılma tokluğunun ise bu yapıda daha düşük olduğu saptandı. Özetle, ÇYD etkisiyle yapıda oluşturulan tane incelmesi ve dislokasyon artışı ve yaşlandırma sonrası çökelti oluşumuna bağlı olarak alaşımın mekanik özellikleri iyileştirilirken, süneklik ve darbe sönüm kapasiteleri düşürdüğü gözlendi.

Anahtar kelimeler: Aşırı plastik deformasyon, Darbe sönüm kapasitesi, Cu-Co-Be-Ni alaşımı

1 Giriş

Cu- Be- Co alaşımları, bakır (Cu), berilyum (Be) ve kobalt (Co) gibi elementlerinin belirli oranlarda birleşmesiyle oluşan yüksek performanslı yaşlandırılabilir sert bakır alaşımlarıdır. Yapısında bulundurduğu elementler sayesinde sahip olduğu mükemmel termal iletkenliği, üretim kolaylığı, üstün korozyon dayanımı, nispeten yeterli mukavemet ve yorulma davranışları nedeniyle elektronik, otomotiv ve havacılık gibi sektörler için dikkat çekici hale gelmiş temel malzeme gruplarından biridir [1-5]. Yaşlandırılabilir olmaları, üretim sonrasında uygulanacak ilave ısıl işlemlerle ilgili alaşımın sahip olduğu bu üstün özellikleri uygulamalara göre optimize etme imkanı sunmaktadır [6-8]. Cu-Co-Be alaşımları özellikle son yıllarda araştırmacıların dikkatini çekmeye başlamış ve ilgili alaşım üzerinde mikroyapısal, mekaniksel, elektriksel iletkenlik, yorulma ve tribolojik davranışı gibi özellik incelemelerinin ele alındığı çalışmalara rastlamak mümkündür [8-11]. Ayrıca ilgili alaşımın yapısına katılan ilave Ni [12] ve Zr [13] gibi çeşitli elementler ile dörtlü

Abstract

In this study, different combinations of mechanical and thermal processes, such as solution treatment, multidirectional forging (MDF), and aging treatment, were applied to the Cu-Co-Be-Ni alloy. The effects of the applied processes on microstructure, mechanical properties, and fracture toughness of samples were systematically investigated. The obtained results demonstrated that the process steps applied separately or in combination were quite effective on both the mechanical and microstructural properties of the alloy. The highest hardness and strength values were obtained after the combination of solutioned, MDF and aging processes, respectively, while the fracture toughness was found to be lowest in this structure. In summary, it was observed that while the mechanical properties of the alloy were improved due to grain refinement and increasing dislocation density in the structure due to the effect of MDF and precipitation formation after aging, the ductility and impact damping capacities decreased.

Keywords: Severe plastic deformation, Impact toughness, Cu-Co-Be-Ni alloy

alaşım grupları oluşturulmuştur. Bu çalışmaların bazılarında, ilave element katkısı sayesinde yapıda oluşturulan faz dönüşüm kinematiğinin kapsamlı şekilde ele alındığı dikkati çekerken, bazılarında ise ilave alaşımlamanın alaşımın mekaniksel ve tribolojik özelliklerine olan etkileri ortaya koyulmaya çalışılmıştır [12-15].

Yapısında ağırlıkça yüksek oranda bulunan bakır elementi (Cu > %95 ağırlıkça) sayesinde Cu-Co-Be esaslı alaşımların dövülebilir nitelikte olması, ilgili alaşımın mikroyapısal oluşumu, mekaniksel ve yorulma performanslarının yanında pek çok özelliğinin plastik deformasyon yöntemleriyle yeniden optimize edilmesine imkan sunmaktadır. İlgili alaşım grubu üzerine yapılan calısmalar incelendiğinde deformasyon etkilerinin de özellikle son yıllarda çalışılmaya başlandığı, sınırlıda olsa bu alanda birkaç çalışmaya rastlamak mümkündür. Nitekim Y Zhou ve arkadaşları [16] tarafından yapılan bir çalışmada, sıcak dövme, termal ekstrüzyon ve soğuk çekme gibi geleneksel plastik deformasyon yöntemleri uygulanarak elde edilen Cu-Co-Be alaşımı örneklerine sonradan uygulanan

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: yanar@ktu.edu.tr (H. Yanar) Geliş / Received: 30.12.2024 Kabul / Accepted: 17.02.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngmuh.1608101

çözündürme ve yaşlandırma işlemlerinin alaşımın mekanik özelliklerine ve kırılma davranışına olan etkilerinin ele alındığı görülürken, Demirtaş tarafından yapılan başka bir çalışmada ise aşırı plastik deformasyon yöntemlerinden (APD) eş kanallı açısal presleme (EKAP) işlemi ve sonrasında uygulanan yaşlandırma işleminin Cu-Co-Ni-Be alasımının mikroyapısal, mekaniksel ve tribolojik özelliklerine olan etkileri arastırılmıştır [9]. Genel olarak yapılan bu çalışmalar ve Cu esaslı alaşımlar üzerine yapılan mevcut literatür calısmaları değerlendirildiğinde geleneksel plastik deformasyon tekniklerine kıyasla aşırı plastik deformasyon yoluyla deforme edilerek elde edilen ince taneli (İT) veya ultra ince taneli (UİT) mikro yapı oluşumların Cu esaslı malzemelerin mukavemetinde ve sertliğinde çok daha fazla artış sağlanabileceği iyi bilinmektedir [17-23].

Metalik malzemelerde ultra ince taneli yapı elde etmek için kullanılan tekniklere bakıldığında APD yöntemi olarak EKAP, yüksek basınç altında burulma (YBB) ve çok yönlü dövme (CYD) yöntemlerinin ön plana çıktığı görülmektedir. Bunlar arasında özellikle EKAP ve YBB yöntemlerinin küçük numuneler üzerinde uygulanabilir olması endüstriyel açıdan ilgili tekniklerin kullanımını sınırlamaktadır. Ancak, ÇYD işleminin daha büyük boyutlu numunelere uygulanabilmesi ilgili yöntemin kullanımını daha yaygın hale getirmiştir. Mevcut literatür, ÇYD işleminin Cu-esaslı bazı alaşımlara da yaygın olarak uygulandığını ve işlem sonrası ilgili alaşımların tane boyutunda ciddi oranda incelmenin elde edildiğini göstermektedir [18, 24, 25]. Ayrıca bazı çalışmalarda, APD işlemi sonrası uygulanan vaslandırma isleminin alasımın sertlik ve mukavemet değerlerinin daha da artırılmasında etkili olduğu ifade edilmektedir [22, 23, 26]. Buradan hareketle, bu çalışma kapsamında APD yöntemi olarak uygulanan ÇYD işleminin alaşımın mikro yapısal dönüşümü ve yaşlandırma davranışına olan etkisi ile birlikte ÇYD ve yaşlandırma işlemlerinin ilgili alaşımın darbe tokluğu değerlerine ve kırılma mekanizmalarına olan etkileri ele alınacaktır.

2 Deneysel çalışmalar

2.1 Malzeme ve çok yönlü dövme işlemi

Çalışma kapsamında, kimyasal bileşimi Cu-1,1Co-1Be-1Ni şeklinde olan ve yaklaşık 280 HV sertlik değerine sahip ticari bir alaşım kullanılmıştır. İlgili alaşım yaşlandırılmış formda 20 mm kalınlığında bir plaka şeklinde temin edilmiştir. Ardından ilgili alaşımdan ÇYD işleminde kullanılmak üzere 40×40×20 mm3 boyutlarına sahip bir prizmatik parça tel erozyon yöntemiyle çıkarıldı. ÇYD işlemi öncesi bu parça atmosfer kontrolü olmayan bir kül fırın içerisinde 1000 °C'de 1 saat boyunca çözeltiye alındı ve ardından su verilerek oda sıcaklığına soğutuldu. ÇYD işlemi aşırı doymuş katı çözelti formuna sahip bu alaşıma uygulandı. Uygulama adımları Şekil 1(a)'da verilen ÇYD işleminde alaşım oda sıcaklığında ve 1 mm/s ilerleme hızında her bir pasoda %50 oranında deforme olacak şekilde plastik deformasyona tabi tutuldu. Her paso arasında numune Şekil 1'te gösterildiği gibi 90° döndürüldü. Üç paso sonrasında numune bütün yüzeylerinden deforme edildi ve bu durum bir çevrim olarak adlandırıldı. Toplamda numuneye ɛ=4.15 plastik deformasyona karşılık gelen 2

çevrim (6 paso) ÇYD işlemi uygulandı. Ardından deforme edilmiş bu numuneden çeşitli testler için konumları Şekil 1(b)'de gösterilen numuneler çıkarılarak farklı testler uygulandı. Öncelikle deforme edilmiş alaşımın yaşlandırma sıcaklığının belirlenmesi için 10×10×5 mm³ boyutlarına sahip numunelerle 200-600 °C sıcaklık aralığında çeşitli kademelerde 1 saat sürelerde kül fırınında atmosfer koşullarında yaşlandırma işlemleri yapılarak ilgili numunelerin sertlik ölçümleri yapıldı.



Şekil 1. (a) 3 paso (1 çevrim) çok yönlü dövme işleminin uygulama aşamaları, (b) test numunelerinin dövülmüş numunedeki konumları

2.2 Mikroyapısal incelemeler

Hem ticari forma sahip hem de deforme edilmiş numunelerin içyapılarının belirlenebilmesi için Zeiss AXI0 marka ve model numaralı optik mikroskop kullanıldı. İnceleme öncesinde numune yüzeyleri 240-600-1200-2500 gritlik zımparalarla kademeli olarak zımparalandı ve bu sayede yüzeydeki tel erozyon kaynaklı oksidasyon etkileri uzaklaştırıldı. Ardından 5 μ m ve 1 μ m ve 0.3 μ m kademelerinde alümina solüsyonlar ve keçeler kullanılarak iyice parlatıldı. Son aşamada parlatılmış örnekler %10 HCl + %5 FeCl₃ + %90 H₂O kimyasal çözeltisi kullanılarak dağlandı ve optik mikroskopta incelendi.

2.3 Mekanik özellik incelemeleri

Belirlenen şartlardaki örneklerin mukavemet değerlerinin belirlenmesi için çekme testleri uygulandı. Çekme testleri Instron 3382 marka elektro-mekanik çekme cihazı kullanılarak 4×10⁻³ deformasyon hızında ve oda sıcaklığında boyutları Şekil 2'de verilen numunelerle gerçekleştirildi. Test öncesi bütün numunelerin yüzeyleri 600-1200 kademelerdeki zımparalar kullanılarak tel erozyondan gelen oksitleyici ark etkilerinden temizlendi. Her koşul için testler 3 kez tekrarlandı ve bu testlerden elde edilen değerlerin ortalaması malzemenin ortalama mukavemet değerleri olarak verildi.



Şekil 2. Çekme testlerinde kullanılan numunenin boyutları

Belirlenen koşullardaki örneklerin sertlik değerleri Struers marka sertlik ölçüm cihazı kullanılarak Vickers sertlik ölçüm metoduna göre belirlendi. Sertlik ölçümleri $10 \times 10 \times 5$ mm³ boyutlarındaki numunenin iki geniş yüzeyi üzerinde 500 g yük altında 12 s bekleme süresinde gerçekleştirildi. Her koşulda alınan 10 farklı ölçümün aritmetik ortalaması alınarak o koşula ait ortalama sertlik değeri belirlendi.

2.4 Darbe tokluğu incelemeleri

Örneklerin darbe tokluğu değerleri DIN50115 standardına uygun olarak, 50J çekiç kapasitesine sahip Instron - Ceast marka Charpy çentik darbe test cihazı kullanılarak belirlendi. Darbe tokluğu için deforme edilmiş numune üzerindeki konumları Şekil 3'te verilen 4×3×27 mm³ boyutlarına ve V formuna sahip çentikli (çentik açısı 60°, taban yuvarlatma çapı 0.1 mm) örnekler kullanıldı. Yapısal homojensizliklerin önüne geçmek için numuneler mümkün olduğunca deforme edilmiş numunenin orta kısımlarından tel erezyon yöntemi kullanılarak çıkarıldı. En az 3 başarılı testten elde edilen verilerin aritmetik ortalaması alınarak ilgili örneğe ait darbe tokluğu değeri belirlendi. Test sonrası, kırılma mekanizmalarının/ formlarının belirlenmesi için kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) vardımıyla incelendi. İncelemelerde ZEISS EVO LS 10 marka ve model numaralı elektron mikroskobu kullanıldı.



Şekil 3. DIN50115 standardına uygun olarak hazırlanmış Charpy çentikli darbe numunesinin boyutları

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Mikroyapısal incelemeler

Çözündürülüp su verildikten sonra elde edilen aşırı doymuş katı çözelti formuna sahip alaşımın ve pik noktaya (maksimum sertlik değerine) karşılık gelen koşullarda (475°C – 1h) yaşlandırılan alaşımın sahip olduğu içyapılara ait optik mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 4(a-b)'da ve Şekil 4(c-d)'de verilmiştir. Şekil 4(a) ve (b)'de gösterilen aşırı doymuş katı çözelti formuna sahip (çözündürülmüş + su verilmiş) alaşımın içyapısına bakıldığında genel olarak iri taneli bir yapıya sahip olduğu, yapısında boyutları 20 µm -80 µm arasında değişen tanelerin bir arada olduğu dikkati çekmektedir. Bu görüntüler üzerinde lineer kesiştirme yöntemi kullanılarak yapılan tane boyutu ölçümlerinde ortalama tane boyutu 50±5.2 µm olarak belirlenmiştir. Avrıca yapıda tavlama ikizlerinin varlığı (Sekil 4(b)) da dikkati çekerken, bu oluşumun genel olarak bakır alaşımların yapısında ısıl işlem sonrası ortaya çıktığı ifade edilebilir [27]. Aşırı doymuş katı çözelti formuna sahip alaşım, 475 °C'de 1 saat yaşlandırıldıktan sonra yapılan mikroyapı incelemelerinde yapıdaki tane formunun ve boyutunun genel olarak değişmediği dikkati çekerken, tavlama ikizlerinin ise yapıda hala var olduğu söylenebilir. Yaşlandırma işlemi sırasında yapıda genel olarak yapıyla bağdaşık ince çökeltilerin oluştuğu bilinmektedir. Fakat çalışma kapsamında detaylı incelemeler (geçirimli elektron mikroskobu incelemeleri) yapılamadığı için bu çökeltiler görüntülenememiştir. Demirtaş tarafından yapılan bir çalışmada yaşlandırma işlemi sırasında oluşan bu çökeltilerin boyutlarının 10 nm-200 nm arasında değiştiği ve genel olarak yapıda CoNiBex formunda yoğun olarak bulunduğu ifade edilmektedir [8].

Aşırı doymuş katı çözelti formuna sahip alaşıma ÇYD işlemi uygulanmış ve ÇYD işlemi sonrası pik sertlik noktasına karşılık gelen koşullarda yaşlandırılmış örneklerin vapılarına ait optik mikroskop görüntüleri ise Sekil 4(e-f)'de verilmiştir. Genel olarak bakıldığında ÇYD yöntemiyle oda sıcaklığında uygulanan APD sonrası alasımın mikroyapısının ciddi oranda değiştiği dikkati çekmektedir. Alaşımın tane yapısının plastik deformasyon etkisiyle önemli oranda inceldiği ve tane boyutunun mikron/mikron altı seviyelere kadar yaklaştığı dikkati çekmektedir. Ancak, yapılan optik mikroskop incelemeleriyle alaşımın tane boyutu tam olarak belirlenememiştir.

3.2 Mekanik özellik incelemeleri

Aşırı doymuş katı çözelti formundaki alaşım ile çözündürme sonrası 6 paso ÇYD işlemi uygulanmış (dövülmüş) Cu-Co-Be-Ni alaşımının 150-500 °C sıcaklık aralığında farklı kademelerde 1 saat süreyle yaşlandırılması sonrası elde edilen yapıların ortalama sertlik değişimleri Şekil 5'te verilmiştir. Genel olarak bakıldığında yaşlandırma işleminin her iki koşuldaki alaşımın sertlik değerini ciddi oranda arttırdığı görülmektedir. Aşırı doymuş katı çözelti formunda 96 HV ortalama sertlik değerine sahip alaşıma özellikle 300 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda uygulanan yaşlandırma işlemlerinde alaşımın kayda değer bir yaşlanma eğilimi göstermediği 300 °'de-1 saat uygulanan yaşlandırma işlemi sonunda dahi sertliğinin (99 HV) aşırı doymuş katı



Şekil 4. Farklı işlem adımları uygulanmış durumdaki alaşımın mikroyapı görüntüleri: (a) çözeltiye alınmış ve ardından su verilmiş, (b) Çözeltiye alma ve su verme işlemi sonrası 475 °C'de 1 saat yaşlandırılmış ve (c-d) çözeltiye alma ve su verme sonrası 6 paso ÇYD uygulanmış ve sonrasında 425 °C'de 1 saat yaşlandırılmış

çözelti formuna oldukça yakın olduğu görülmektedir. Ancak ilgili alaşımın bu sıcaklık seviyesinden sonra hızlı bir şekilde yaşlanma trendine girdiği ve sertliğinin yaşlandırma sıcaklığındaki artışa bağlı olarak hızla arttığı dikkati çekmektedir. Sertlik değerinin 475 °C'de uygulanan yaşlandırma işlemi sonrası maksimum değeri olan 274 HV değerine ulaştığı ve bu sıcaklık seviyesinin üzerinde sertlik değerinde bir düsüsün baslayarak asırı yaslanma sürecine girdiği net olarak görülmektedir. Sertlik değerinde 300 °C sıcaklık seviyesinin üzerinde ortaya çıkan artış yaşlandırma sırasında ilgili alaşımın yapısında oluşturulan nano boyutlu ve yapıyla bağdaşık olan γ'' ve γ' çökeltileriyle ilişkilendirilirken 475 °C üzerinde ortaya çıkan düşüş ise yapıdaki mevcut çökeltilerin bağdaşıklığının bozularak irileşmesi ve y formuna dönüşmesi ve tane boyutunda ortaya çıkan büyümeye bağlı olarak açıklanmaktadır [28]. Öte yandan, çözündürme + su verme işleminin ardından oda sıcaklığında uygulanan 6 paso ÇYD işlemi ilgili alaşımın ortalama sertlik değerini ciddi oranda artırarak 96 HV seviyesinden 213 HV seviyesine kadar yükseltmiştir. Sertlik değerinde ortaya çıkan bu ciddi artış etkisi yapıda oluşturulan ciddi orandaki deformasyon etkisine ve tane boyutundaki incelmeye bağlı olarak açıklanabilir (Şekil 5). Deformasyon sonrası uygulanan yaşlandırma, dövülmüş durumdaki alaşımın yapısında da 225 °C sıcaklık seviyesine kadar olan yaşlandırmalarda alaşımın yapısında belirgin bir sertlik artışına sebep olmamıştır. Bu sıcaklık seviyesinin

üzerindeki yaşlandırmalarda sertlik değerlerinde belirgin bir artış başlamış ve 425 °C uygulanan yaşlandırma işlemi sonrası dövülmüş durumdaki alaşımın maksimum sertlik değeri olan 310 HV değerine ulaşmıştır. Daha yüksek sıcaklık seviyelerinde uygulanan yaşlandırmalarda ise sertlik değerlerinde sıcaklık artışına bağlı kademeli bir düşüş gözlenmistir. Sertlik değerlerinde ortava cıkan artış aşırı dovmus katı cözelti formundaki numunenin vapısında olduğu gibi ince ve bağdaşık çökelti oluşumuyla iliskilendirilirken, sertlik değerlerinde ortaya cıkan azalma çökeltilerin irileşmesi, dislokasyon yoğunluğundaki azalma ve yeniden kristalleşme mekanizmasının aktifleşmesiyle ilişkilendirilebilir [9]. Öte yandan gerek sertlik değerinde belirgin artışın başladığı sıcaklık seviyesi gerekse de pik sertlik değerine ulaşılan sıcaklık seviyesi dövülmüş durumdaki alaşım için daha düşük seviyelerde ortaya çıkmaktadır. Benzer durum bakır esaslı alaşımların plastik deformasyonunun çalışıldığı başka çalışmalarda da gözlenmiş ve bu durum yapıda plastik deformasyon etkisiyle oluşturulan yüksek yoğunluktaki dislokasyonların varlığıyla ilişkilendirilmiştir [9, 29]. Bu çalışmalarda genel olarak aşırı plastik deformasyonun yaşlandırma sürecini hızlandırıldığı ifade edilmiştir.



Şekil 5. Çözündürülmüş ve çözündürme + ÇYD işlemi uygulanmış alaşımların sertlik değerlerinin yaşlandırma sıcaklığına bağlı değişimleri

Cu-Co-Be-Ni alaşıma uygulanan farklı proses adımları sonrası elde edilen yapılara ait gerilme- uzama eğrileri Sekil 6'da verilmistir. Genel olarak bakıldığında cözündürme ve su verme islem adımları sonrası elde edilen asırı dovmus katı cözelti formuna sahip alasımın sahip olduğu iri taneli yapısı sayesinde (Sekil 4(a)) akma ve çekme dayanımı değerlerinin nispeten düşük kopma uzaması değerinin ise oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu koşullar altında akma ve çekme dayanımları ile kopma uzaması değeri sırasıyla 110 MPa, 295 MPa ve %52 olarak elde edilmiştir. Akma ve çekme dayanımı değerleri arasında ortaya çıkan bu fark çözündürülmüş yapıdaki dislokasyon yoğunluğunun artmasından kaynaklanmaktadır. Alaşımın çekme testi sırasında çekme dayanımına ulaşıncaya kadar gerilmeuzama eğrisinde geniş bir üniform deformasyon bölgesinin

 $(\varepsilon_u = \%45)$ ortaya çıkması bu durumu doğrular niteliktedir. Öte yandan ilgili alaşımın çözündürme sonrası maksimum sertlik noktasına karşılık gelen koşullarda yaşlandırılması sonrası mukavemet ve süneklik değerlerinin ciddi oranda değiştiği dikkati çekmektedir. Çözündürülmüş koşullarda alaşımın sahip olduğu düşük akma ve çekme dayanımı değerlerinin yaslandırma sonrası ciddi oranda artarak sırasıvla 595 MPa ve 705 MPa değerlerine kadar ulastığı üniform ve kopma uzaması değerlerinin ise büyük oranda azalarak %13 ve %17 seviyelerine kadar gerilediği görülmektedir. Akma ve çekme dayanımı değerlerinde ortaya çıkan bu belirgin artış etkisi yaşlandırma sırasında yapıda oluşturulan nano boyutlu ve üniform çökeltilerden kaynaklanmaktadır. Nitekim, ilgili alaşım üzerine yapılan farklı çalışmalarda yaşlandırma sonrası yapıda CoNiBex çökeltilerinin oluştuğu ve bu çökeltilerin deformasyon sırasında dislokasyon hareketini engelleyerek alaşımın akma çekme dayanımı değerlerini artırdığından ve bahsedilmektedir [9].

Aşırı doymuş katı çözelti formuna sahip alaşımın önce çok yönlü dövme işlemiyle 6 paso dövülmesi ve ardından 425 °C'de 1 saat yaşlandırılması sonrası akma ve çekme dayanımı değerlerinin yükseldiği ve sünekliğinin ise daha da azalarak sırasıyla 842 MPa, 890 MPa ve %8 değerlerine ulaştığı görülmektedir. Çözündürme sonrası yaşlandırılmış alaşıma kıyasla akma ve çekme dayanımı değerlerinde ortaya çıkan bu artış ÇYD etkisiyle yapıda oluşturulan aşırı deformasyona bağlı dislokasyon artısıyla ve tane incelmesiyle ilişkilendirilebilir [30, 31]. Diğer taraftan ilgili alasımın CYD sonrası akma ve cekme dayanımı değerlerinin birbirine oldukça yakın olarak elde edildiği dikkati çekmektedir. Bu durum alaşımın çekme testi sırasında yapısındaki yoğun dislokasyonların varlığı sebebiyle fazla pekleşmeye uğramadığının bir göstergesi olarak sunulabilir. Nitekim, gerilme-uzama eğrisinde görülen üniform uzama bölgesinin de neredeyse tamamen ortadan kalkması da bu durumu doğrular niteliktedir (Şekil 6).



Şekil 6. Farklı proses adımları sonrası elde edilen yapılara ait gerilme-yüzde uzama eğrileri

3.3 Charpy testi incelemeleri

Farklı ısıl ve mekanik işlemler sonrası elde edilen farklı yapılardaki numunelere ait kırılma sonrası yüzey görünümleri ve ölçülen kırılma tokluğu değerleri sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 7'de verilen görüntüler incelendiğinde kırılma sırasında aşırı doymuş katı çözelti formundaki numunenin (Şekil 7(a)) darbe testi sonrası kırılmaya uğramadığı yalnızca darbe sırasında eğilerek ciddi anlamda deforme olduğu dikkati çekmektedir. Bu durum ilgili numunenin iri taneli forma sahip sünek yapısından kaynaklanmaktadır. Nitekim darbe testi sırasında ölçülen sönüm enerjisi değerinin ilgili numunede oldukça yüksek olması (317 ± 11.4 kJ/m²) yoğun plastik deformasyona uğradığını doğrular niteliktedir (Şekil 8).



Şekil 7. Charpy testi uygulanmış numunelerin kırılma sonrası yüzeylerinin stereo mikroskop görüntüleri



Şekil 8. Farklı proses adımları sonrası elde edilen numunelerin sahip olduğu darbe sönüm enerji değerleri

Ayrıca ilgili numunenin statik çekme koşullarında oldukça fazla uzaması ve uniform uzama bölgesinin oldukça geniş olması ilgili numunenin plastik deformasyon kabiliyetini desteklemektedir. Öte yandan çözündürme ve su verme işlemlerinin ardından 475 °C'de 1 saat yaşlandırılan numunelerde kırılma şekillerinin değiştiği ve çözündürülmüş numunede ortaya çıkan eğilmenin aksine kırılmanın gerçekleştiği dikkati çekmektedir. Ayrıca, kırılma sırasında absorbe edilen enerji değerinin de %14.1 oranda azalarak 272±6.6 kJ/m² seviyesinde elde edildiği dikkati çekmektedir. Bu durum yaşlandırma sonrası numunelerde gevrekliğin artığını işaret etmektedir. Nitekim ilgili numunelerde yaşlandırma işlemi sonrası ortalama sertlik değerinin 96 HV den 274 HV seviyesine kadar yükselmesi numunelerin yapısındaki gevrekleşmeyi ilgili doğrulamaktadır (Şekil 5). Her ne kadar yaşlandırma ile kısmı bir gevrekleşme ortaya çıksa da, kırılma sonrası kesitte ortaya cıkan %34.6 daralma miktarı bu numunelerde kırılma sırasında hala voğun plastik deformasyonun gerceklestiğini işaret etmektedir. Öte yandan, çözündürme sonrası sırasıyla uygulanan plastik deformasyon ve vaslandırma islemleri, gerek kırılma yüzeyinin genel görünümünü gerekse de kırılma enerjisi değerini ciddi oranda etkilediği söylenebilir (Sekil 7 ve Sekil 8). Nitekim ilgili numunelerin kesit görünümlerine bakıldığında kesitte meydana gelen daralmanın %14.5 oranında gerçekleştiği dikkati çekerken, sönüm enerjisi değeri ise çözündürülmüş numuneye kıyasla %53.3 oranında azalarak 148±5.3 kJ/m² seviyesine gerilemiştir. Bu durum ÇYD ve yaşlandırma etkisiyle numunelerde ciddi bir gevrekleşmenin ortaya çıktığını işaret etmektedir. Bu gevrekleşme etkisi ilgili numunelerin gerilme-uzama eğrilerinde gözlenen sınırlı homojen uzama bölgesinden de anlaşılmaktadır (Şekil 6). Sınırlı homojen uzama bölgesinin varlığı darbe testi öncesinde numunelerin yoğun dislokasyonların varlığını işaret yapısındaki etmektedir. ÇYD etkisiyle dislokasyon yoğunluğunun artması numunelerde daha sınırlı bir plastik deformasyonu yani daha gevrek bir kırılmayı ve düşük sönüm kapasitesini de beraberinde getirmektedir. Sekil 9'da cözündürme isleminin ardından su verilmis alasımın centik darbe testi sonrası ortaya çıkan kırılma yüzeyi görüntüleri verilmiştir. Genel olarak bakıldığında test sırasında numunelerin kırılmadığı, ancak ciddi oranda plastik deformasyona uğrayarak şekil değiştirdiği dikkati çekmektedir (Şekil 7(a)). Bu durum ilgili alaşımın kırılma yüzeyinden alınan SEM görüntülerinden de net olarak anlaşılmaktadır. Nitekim Şekil 9(b-d) de verilen detay görüntüler incelendiğinde kırılma yüzeyinde yoğun deformasyon (kayma) bantlarının varlığı ve yırtılmaya bağlı hasar oluşumu kırılma sırasında numunenin yoğun plastik deformasyona uğradığını ve sünek bir kırılmanın gerçekleştiğini doğrular niteliktedir. Ayrıca, kırılma enerjisi değerinin diğer numunelere kıyasla oldukça yüksek olması ve çekme testi sırasında görülen oldukça geniş üniform deformasyon bölgesi bu numunelerde sünek bir kırılmanın varlığını işaret etmektedir. Öte yandan, numunede meydana gelen plastik deformasyonun belirlenmesinde kesitte meydana gelen alansal daralmada bir kıyas yöntemidir. Ancak, test sırasında numunelerin kırılarak kopmaması kesitte meydana gelen daralmanın ölcülmesini engellemistir. Asırı doymus katı cözelti sonrası 475 °C'de 1 saat vaslandırılarak elde edilen numunelere ait kırılma yüzeyi görüntüleri Sekil 10'da gösterilmistir. Genel olarak bakıldığında numunelerin darbe testi sonrası kırılarak iki parçaya ayrıldığı görülmektedir (Şekil 7(c-d)). Bu durum çözündürülmüş numuneye kıyasla yaşlandırılmış yapının nispeten daha gevrek olduğunun bir göstergesi olarak sunulabilir. Ancak, test sırasında ilgili numunenin kesitinde % 34.6 oranında bir daralmanın ortaya çıkması kırılma sırasında numunenin büyük oranda plastik deformasyona uğradığı göstermektedir.



Şekil 9. Çözündürülmüş (1000 °C-1 saat) ve su verilmiş yapıdaki alaşımın çentik darbe testi sonrası kırılma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri



Şekil 10. Çözündürülmüş ve ardından pik sertlik değerine karşılık gelen noktada (475 °C-1 saat) yaşlandırılmış alaşımın çentik darbe testi sonrası kırılma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri

Kesitte meydana gelen bu plastik deformasyon çentik bölgesinde ve yanal bölgelerde daralma, çekicin vurma yüzeyinde (çentiğin karşıt yüzeyinde) ise yanal genişleme şeklinde ortaya çıkmaktadır (Şekil 10). Bu sebeple kesit yüzeyinin farklı bölgelerinden detaylı SEM görüntüleri alınarak deformasyon sırasında meydana gelen kırılma mekanizmaları ortaya koyulmaya çalışılmıştır. Çentik bölgesinden (1 nolu bölgeden) alınan görüntüler incelendiğinde bu bölgede yoğun daralmanın ortaya çıkması (Şekil 10(a)) kırılma başlangıcında yoğun plastik deformasyonun ortaya çıktığını net olarak göstermektedir. Ayrıca bu bölgeden alınan detay SEM görüntülerinde görülen deformasyon bantları da (Şekil 10(c-d)) meydana gelen plastik deformasyonu doğrular niteliktedir. Diğer taraftan yanal daralmanın olduğu 2 nolu bölgeye bakıldığında ise bu bölgede gerek daralma miktarından (Sekil 10(e)) gerekse de kırılma yüzeylerinde görülen yoğun lifsi kırılma yüzeylerinden (Şekil 10(f-g)) bu gölgede de yoğun plastik deformasyonun gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Yüzeylerde görülen bu lifsi yapılar (gamze oluşumları) kayma mekanizmasıyla meydana gelen sünek kırılmanın bir göstergesi olarak sunulmaktadır [32]. Numune kesitinde 3 nolu bölge olarak gösterilen orta kısım ise ani kırılma bölgesi olarak ifade edilmektedir. Bu bölgeden yapılan detaylı incelemelerde de hem deformasyon bantlarının hem de lifsi kırılma yüzeylerinin var olduğu söylenebilir (Şekil 10(h-j)). Bu durum genel olarak bu bölgede de voğun plastik deformasyon etkilerinin varlığını işaret etmektedir. Özetle, yaşlandırılmış numunenin kırılma yüzeyinin genelinde plastik deformasyonla ortaya çıkan sünek bir kırılmanın gerçekleştiğini ifade edilebilir. Darbe testlerinde ölçülen nispeten yüksek sönüm enerjisi değeri ve çekme testi sırasında görülen geniş uniform deformasyon bölgesinin varlığı bu durumu doğrular niteliktedir (Şekil 6 ve Şekil 8). Çözündürülmüş numuneye kıyasla mukavemet değerlerinin artması ve sünekliğinin azalması kırılmanın ilgili numunede kısmen sünek bir formda ortaya çıkmasında etkili olmuştur.

Çözündürme ve su verme işlemi sonrası ÇYD işlemiyle ile dövülmüş ve ardından 425 °C'de 1 saat yaşlandırılmış numunelerin kırılma yüzeyi görüntüleri Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. Çözündürülmüş alaşımın 6 paso ÇYD ile dövülmesi ve ardından pik sertlik değerine karşılık gelen koşullarda (425 °C-1 saat) yaşlandırılmış alaşımın çentik darbe testi sonrası kırılma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri

Genel olarak bakıldığında numunenin kesit görünümünün ilk iki koşuldaki numunelere kıyasla farklı olduğu ve ÇYD işlemi uygulanmış numunenin kesitinde kırılma sırasında oldukça sınırlı bir daralma ile geniş bir ani kırılma bölgesinin ortaya çıktığı dikkati çekmektedir (Şekil 11(a)). Sınırlı daralmanın olduğu çentik bölgesinden alınan görüntüler incelendiğinde, oldukça sınırlı bir alanda lifsi sünek bir kırılmanın ortava cıktığı dikkati cekerken (Sekil 11(b-d)). benzer bir durumun yanal daralma bölgesinde de ortaya cıktığı söylenebilir (Sekil 11(e-g)). İlgili numunede kırılmanın başlangıcında plastik deformasyonun etkin olduğu sünek bir kırılma mekanizması hakimken, ilerleyen aşamada daha çok gevrek bir kırılmanın oluştuğu geniş ani kırılma bölgesinden ve kısmı oranda ortaya çıkan kesit daralmasından net olarak anlaşılmaktadır (Şekil 11(a)). Ani kırılma bölgesinden yapılan detaylı incelemelerde kırılmanın gevrek gerçekleştiğini gösteren kanıtların varlığı dikkati çekmektedir. Nitekim yüzey görüntülerinde klivaj tipi ayrılma yüzeylerinin ve çatlakların varlığı ilgili numunelerde gevrek bir kırılmanın ortaya çıktığını doğrulamaktadır (Şekil 11(i -j)).

4 Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında uygulanan aşırı plastik deformasyon ve yaşlandırma işlemlerinin Cu-Co-Be-Ni alaşımının yapısında ve darbe sönüm kapasitesinde oluşturduğu etkiler incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda listelenmiştir.

- Çözündürülmüş Cu-Co-Be-Ni alaşımının başlangıçtaki iri taneli yapısının ÇYD etkisiyle tamamen ortadan kalktığı ve ciddi oranda tane incelmesinin meydana geldiği görülmektedir. Nitekim başlangıçtaki 50 μm'luk tane boyutunun 6 paso ÇYD etkisiyle mikron veya mikron altı seviyeye kadar azaldığı görülmüştür.
- 2- Çözündürülmüş Cu-Co-Be-Ni alaşımına uygulanan yaşlandırma ile alaşımın sertlik ve mukavemet değerleri ciddi oranda artırılmıştır. Çözündürülmüş alaşımın 96 HV olan sertlik değeri yaşlandırma sonrası 274 HV seviyesine kadar yükselirken, 110 MPa olan akma dayanımı ve 295 MPa olan çekme dayanımı değerleri ise sırasıyla 595 MPa ve 705 MPa seviyesine kadar yükselmiştir.
- 3- Çözündürülmüş alaşıma uygulanan ÇYD ve yaşlandırma işlemleriyle alaşımın sertlik değeri, akma ve çekme dayanımı değerleri ciddi oranda artırılmıştır. Nitekim ÇYD ve yaşlandırma işlemlerinin ardından bu değerler sırasıyla 310 HV, 842 MPa ve 890 MPa olarak elde edilmiştir.
- 4- Çözündürülmüş Cu-Co-Be-Ni alaşımına uygulanan yalnızca yaşlandırma veya sırasıyla uygulanan ÇYD ve yaşlandırma işlemleri ilgili alaşımın darbe enerjisi değerlerini düşürmüştür. Çözündürülmüş alaşımın 317 kJ/m² olan kırılma enerjisi değeri sadece yaşlandırıldıktan sonra 267 kJ/m² seviyesine, ÇYD ve yaşlandırma işlemlerinden sonra ise 148 kJ/m² seviyesine kadar gerilemiştir.
- 5- Çözündürülmüş formdaki Cu-Co-Be-Ni numunelerinde darbe testi sırasında yoğun plastik

deformasyonla birlikte sünek bir kırılma gözlenirken, sadece yaşlandırma sonrası veya ÇYD ve yaşlandırma işlemleri sonrası plastik deformasyon oluşumunun azaldığı kırılma türünün sünek formdan daha çok gevrek forma dönüştüğü dikkati çekmektedir.

6- Çözündürülmüş formdaki Cu-Co-Be-Ni numunelerinin kırılma yüzeyinde lifli bir yapı hakimken, özellikle ÇYD ve ardından uygulanan yaşlandırma sonrası kırılma yüzeyinde daha çok klivaj tipi kırılma yapısı gözlenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- P. Scardi, M. Leoni, G. Straffelini and G.D. Giudici, Microstructure of Cu–Be alloy triboxidative wear debris. Acta Materialia, 55, 2531–2538, 2007. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.11.046
- [2] M.P. Ahmed and H.S. Jailani, Enhancing wear resistance of cryo treated Cu-Be2 alloy. Silicon, 11, 105–115, 2019. https://doi.org/10.1007/s12633-018-9835-y
- [3] Properties and Selection: Non-ferrous alloys pure metals, ASM Metals Handbook. 2-10, 403–423, 1992.
- [4] D.M. Zhao, Q.M. Dong, P. Liu, Z.H. Jin and B.X. Kang, Mechanism of alloying of copper alloy with high strength and high electrical conductivity. Chinese Journal of nonferrous metals, 11(2), 24-27, 2002.
- [5] T. Hasegawa, Y. Takagawa, C. Watanabe and R. Monzen, Deformation of Cu-Be-Co Alloys by Aging at 593 K. Materials Transactions, 52, 1685-1688, 2011. https://doi.org/10.2320/matertrans.M2011057
- [6] Y. Tang, Y. Kang, L. Yue and X. Jiao, Mechanical properties optimization of a Cu–Be–Co–Ni alloy by precipitation design. Journal of Alloys and Compounds, 695, 613-625, 2017. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.11.014
- [7] Y. Tang, Y. Kang, L. Yue and X. Jiao, The effect of aging process on the microstructure and mechanical properties of a Cu–Be–Co–Ni alloy. Materials and Design, 85, 332-341, 2015. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.157
- [8] A. Kızılaslan and I. Altınsoy, The mechanism of twostep increase in hardness of precipitation hardened CuCoNiBe alloys and characterization of precipitates. Journal of Alloys and Compounds, 701,116-121, 2017. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.01.101
- [9] M. Demirtas, Microstructural, mechanical and tribological characterization of Cu-Co-Ni-Be alloy processed via equal channel angular pressing. Materials Today Communications, 28, 10267, 2021. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102676
- [10] F. Berto, P. Lazzarin and P. Gallo, High-temperature fatigue strength of a copper-cobalt-beryllium alloy. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 49 (4), 244-256, 2014.

https://doi.org/10.1177/0309324713511804

[11] D. Özyürek, M. Yıldırım and T. Tuncay, An Investigation of the Effects of Ageing Parameters on Wear Behaviours and Electrical Conductivity of Cu-Co-Be Alloys. Acta Physica Polonica A, 129(4), 559-561, 2016.

https://doi.org/10.12693/APhysPolA.129.559

- J. Chen, M. Zhang, D. Yang and H. Liang, Comparative study on the Properties of CuCoBe Alloy and CuNiCoBe Alloy. Advanced Materials Research, 988, 145-150, 2014. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.988. 145
- [13] L. Hefa, S. Naizhen, D. Xueli, R. He and L. Lijun, Form and Effect of Zr in Cu-Co-Be-Zr Alloy. Acta Metallurgica Sinica, 28 (11), 10-14, 1992. https://amse.org.cn/CN/Y1993/V6/I3/153
- [14] D.A. Avila-Salgado, A. Juárez-Hernández, J. Cabral-Miramontes, and J.L. Camacho-Martínez, Strengthening properties and wear resistance of the CuxNi-yCo-Cr-Si alloy by varying Ni/Co and Zr addition. Lubricants, 9 (10), 96, 2021. https://doi.org/10.3390/lubricants9100096
- [15] Z. Yanjun, S. Kexing, M. Xujun, L. Yong, Y. Shaodan and L. Zhou, Phase transformation kinetics of Cu-Be-Co-Zr alloy during aging treatment. Rare metal materials and engineering, 47 (4), 1096-1099, 2018. https://doi.org/10.1016/S1875-5372(18)30126-7
- [16] Y.J. Zhou, K.X. Song, J.D. Xing, Z. Li and X.H. Guo, Mechanical properties and fracture behavior of Cu-Co-Be alloy after plastic deformation and heat treatment. Journal of Iron and Steel Research International, 23 (9), 933-939, 2016. https://doi.org/10.1016/S1006-706X(16)30141-8
- [17] H. Yang, Z. Ma, C. Lei, L. Meng, Y. Fang, J. Liu and H. Wang, High strength and high conductivity Cu alloys: A review. Science China Technological Sciences, 63 (12), 2505-2517, 2020. https://doi.org/10.1007/s11431-020-1633-8
- [18] J. Wongsa-Ngam, M. Kawasaki and T.G. Langdon, A comparison of microstructures and mechanical properties in a Cu–Zr alloy processed using different SPD techniques. Journal of Materials Science, 48, 4653-4660, 2013. https://doi.org/10.1007/s10853-012-7072-0
- [19] A. Vinogradov, V. Patlan, Y. Suzuki, K. Kitagawa and V.I. Kopylov, Structure and properties of ultra-fine grain Cu–Cr–Zr alloy produced by equal-channel angular pressing. Acta materialia, 50 (7), 1639-1651, 2002. https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00437-2
- [20] R. Zhang, Z. Li, X. Sheng, Y. Gao and Q. Lei, Grain refinement and mechanical properties improvements in a high strength Cu–Ni–Si alloy during multidirectional forging. Fusion Engineering and Design, 159, 111766, 2020. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111766
- [21] R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev and I.V. Alexandrov, Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. Progress in materials science, 45 (2):103-189, 2000.

https://doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00007-9

- [22] G. Purcek, H. Yanar, M. Demirtas, Y. Alemdag, D.V. Shangina and S.V. Dobatkin, Optimization of strength, ductility and electrical conductivity of Cu–Cr–Zr alloy by combining multi-route ECAP and aging. Materials Science and Engineering A, 649, 114-122, 2016. https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.09.111
- [23] G. Purcek, H. Yanar, D.V. Shangina, M. Demirtas, N.R. Bochvar and S.V. Dobatkin, Influence of high pressure torsion-induced grain refinement and subsequent aging on tribological properties of Cu-Cr-Zr alloy. Journal of Alloys and Compounds, 742, 325-333, 2018.

https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.303

- [24] P.C. Sharath, Multi directional forging: an advanced deforming technique for severe plastic deformation. Advanced Welding and Deforming, 17, 529-556, 2021. http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-822049-8.00017-7
- [25] I. Shakhova, Z. Yanushkevich, I. Fedorova, A. Belyakov and R. Kaibyshev, Grain refinement in a Cu– Cr–Zr alloy during multidirectional forging. Materials Science and Engineering A, 606, 380-389, 2014. https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.03.116
- [26] G. Kapoor, T. Kvackaj, A. Heczel, J. Bidulská, R. Kočiško, Z. Fogarassy and J. Gubicza, The influence of severe plastic deformation and subsequent annealing on the microstructure and hardness of a Cu–Cr–Zr alloy. Materials, 13 (10), 2241, 2020. https://doi.org/10.3390/ma13102241
- [27] D.P. Field, L.T. Bradford, M.M. Nowell and T.M. Lillo, The role of annealing twins during recrystallization of Cu. Acta materialia, 55 (12), 4233-41, 2007.

https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.03.021

[28] Y.J. Zhou, K.X. Song, J.D. Xing and Y.M. Zhang, Precipitation behavior and properties of aged Cu-0.23 Be-0.84 Co alloy. Journal of Alloys and Compounds, 658, 920-930, 2016.

https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.10.290

[29] G. Purcek, H. Yanar, M. Demirtas, D.V. Shangina, N.R. Bochvar and S.V. Dobatkin, Microstructural, mechanical and tribological properties of ultrafinegrained Cu–Cr–Zr alloy processed by high pressure torsion. Journal of Alloys and Compounds, 816, 152675, 2020.

https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152675

[30] F. Shahriyari, M.H. Shaeri, A. Dashti, Z. Zarei, M.T. Noghani, J.H. Cho and F. Djavanroodi, Evolution of mechanical properties, microstructure and texture and of various brass alloys processed by multi-directional forging. Materials Science and Engineering A, 831, 142149, 2022.

https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142149

[31] P.C.A. Flausino, M.E.L. Nassif, F. Castro-Bubani, P.H.R. Pereira, M.T.P. Aguilar and P.R. Cetlin, Microstructural evolution and mechanical behavior of copper processed by low strain amplitude multidirectional forging. Materials Science and Engineering: A, 756, 474-483, 2019. https://doi.org/10.1016/j.mage.2010.04.075

https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.04.075

[32] S.H. Hoseini, S. Khalilpourazary and M. Zadshakoyan, Fracture Behavior of Annealed and Equal Channel Angular Pressed Copper: An Experimental Study. Journal of Materials Engineering and Performance, 29, 975-986, 2020. https://doi.org/10.1007/s11665-020-04598-z



NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 551-562



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

Araștırma makalesi / Research article

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



Üniversite kampüs girişi uçucu organik bileşik seviyeleri ve mesleki maruziyetin tahmin edilmesi

University campus entrance volatile organic compound levels and estimating occupational exposure

Yetkin Dumanoğlu^{1,*} 🔟, Aslıhan Irmalı²🔟

^{1,2} Dokuz Eylül Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 35390, İzmir Türkiye

Öz

Uçucu Organik Bileşikler (UOB'ler), atmosfer kimyası ve insan sağlığını önemli ölçüde etkiler. UOB'lerin en önemli kaynakları solvent kullanımı, fosil yakıtlar, araç egzozları ve sigaradır. Çalışmada, araç egzozlarından kaynaklanan UOB'lerin kampüs ana giriş kapılarında dış hava ve iç ortamdaki konsantrasyonlarının belirlenmesi ve tespit edilen UOB'lerin solunması ile giriş kapılarında görevli güvenlik personelinde oluşturacağı sağlık etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Örnekleme süresi, giriş kapılarında görevli personelin çalışma süreleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Örnekleme noktalarındaki ortalama UOB konsantrasyonları Doğu Kapısı'nda, iç ortamda gece 11.9 μ g/m³, gündüz 9.6 μ g/m³, dış havada gece 6.8 μ g/m³ gündüz 8.8 µg/m³ olarak tespit edilmiştir. Batı Kapısı'nda ortalama UOB konsantrasyonları iç ortamda gece 12.3 μ g/m³, gündüz 16.4 μ g/m³, dış havada gece 6.3 μ g/m³, gündüz 9.3 µg/m3 olarak tespit edilmiştir. Yaşam boyu UOB'lere maruz kalmanın yol açtığı kanserojen risk genel olarak kabul edilebilir risk seviyesi olan 1.0×10⁻⁶'nın üzerindedir. Hem iç ortam hem de dış havadaki UOB'ler için kronik toksik etki değeri kabul edilebilir düzeydedir (HQ<1).

Anahtar kelimeler: Hava kalitesi, Egzoz emisyonu, Uçucu organik bileşikler, Sağlık riski

1 Giriş

Uçucu Organik Bileşik'ler (UOB'ler), 20 °C'de buhar basıncı 0.01 kPa veya daha yüksek olan organik bileşik grubudur [1]. UOB'ler için bitkiler [2, 3], benzin/dizel ile çalışan motorlu araçlar [4, 5], yakıt depolama [6, 7], biyokütle yakma [8], fosil yakıt kullanılan yakma süreçleri [9], endüstriyel işlemler ve solvent kullanımı [7, 10] bilinen en önemli kaynaklardır. Türkiye'de endüstrileşmenin yoğun olduğu Kocaeli'nde benzen, toluen, m/p-ksilen, o-ksilen, etilbenzen, stiren, siklohekzan, 1,2,3-trimetilbenzen, 1,2,4trimetilbenzen, hekzan, nonan ve dodekan dahil olmak üzere on üç UOB ölçülmüş ve önemli UOB kaynaklarının, araç emisyonları, petrol ve kömür yanması, petrol rafinerisi ve tehlikeli/tıbbi atık yakma tesisi olduğu belirlenmiştir [11]. Araç emisyonlarının ana bileşenleri alkanlar, aromatik hidrokarbonlar ve karbonil bileşikleridir (sırasıyla %36.4,

Abstract

Volatile Organic Compounds (VOCs) exert a considerable influence on atmospheric chemistry and human health. The principal sources of VOCs are the use of solvents, fossil fuels, vehicle exhausts and smoking. The objective of the study was to ascertain the outdoor and indoor concentrations of VOCs from vehicle exhausts at the main entrance gates of the campus and to evaluate the potential health effects of inhalation of the detected VOCs on the security personnel working at the entrance gates. The temporal framework for data collection was determined by the working hours of personnel stationed at the entrance gates. The mean VOC concentrations at the sampling points were 11.9 µg/m³ at night and 9.6 µg/m³ during the day at the East Gate, and 6.8 μ g/m³ at night and 8.8 μ g/m³ during the day in the outdoor air. The concentration of VOCs in the outdoor air was found to be 12.3 μ g/m³ at night and 16.4 μ g/m³ during the day, and 6.3 μ g/m³ at night and 9.3 μ g/m³ during the day in the outdoor air. The carcinogenic risks associated with lifetime exposure to VOCs are typically above the acceptable risk level of 1.0×10^{-6} . The chronic toxic effect value for both indoor and outdoor air VOCs is acceptable (HQ<1).

Keywords: Air quality, Exhaust emission, Volatile organic compounds, Health risk

%33.1 ve %17.4). Aromatik hidrokarbonlardan benzen bileşiğinin ana kaynağı motorlu araç egzozudur [12]. Araç egzozu ve/veya yakıt buharına maruz kalmayla ilişkili olarak UOB'ler toksisiteleri nedeniyle büyük endişe yaratan kirleticilerdir. Benzen, toluen, etilbenzen ve m/p/o-ksilen (BTEX), trafik kaynaklı yaygın toksik hava kirleticilerdir [13, 14]. Özellikle, toluen/benzen (T/B) oranı trafik emisyonları için bir belirteç olarak kullanılmaktadır. Dünya genelinde pek çok kentsel alanda yaklaşık 2-3 arasında belirlenen T/B oranı UOB'lerin araç kaynaklı olduğunu göstermektedir [15, 16].

UOB'ler, atmosfer kimyasını ve insan sağlığını önemli ölçüde etkilemektedir. İkincil kirleticilerin (troposferik ozon, peroksiasetilnitrat ve ikincil organik aerosoller) oluşumunda önemli bir rol oynamaktadır. UOB'ler atmosfere salınır salınmaz buharlaşarak havaya karışır ve

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: yetkin.dumanoglu@deu.edu.tr (Y. Dumanoğlu) Geliş / Received: 03.09.2024 Kabul / Accepted: 18.02.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngumuh.1542601

oksidatif bozunma süreçlerine dahil olurlar [15]. UOB'lere maruz kalma, duyusal tahriş, sinir sistemi bozukluğu, astım ve kanser gibi çok çeşitli akut ve kronik sağlık etkilerine neden olmaktadır [13]. Atmosferdeki BTEX konsantrasyonu Amerika Çevre Koruma Ajansı (USEPA) ve Avrupa Birliği tarafından açıklanan sınırın üzerine çıktığında toksik ve tehlikeli olarak kabul edilir [17]. USEPA bu kirleticileri insan yaşamına verdikleri zararın boyutuna göre 3 gruba ayırmıştır. Benzen, grup A üyesi olarak insanlar için kanserojen bir kimyasaldır. Etilbenzen grup D'nin bir üyesi olarak hayvanlarda kanserojen bir etkiye sahiptir. Toluen ve ksilen kanserojen olmayan olumsuz etkiler gösterir [18]. BTEX üyeleri, insan vücuduna nüfuz etmeyi kolaylaştıran lipofilik özelliğe sahiptir. Bu hava kirleticilerine maruz kalma üç ana yolla gerçekleşir: 1. Soluma, 2. Yutma ve 3. Dermal penetrasyon. Soluma ana maruz kalma yolu olarak kabul edilmektedir. Son yıllarda BTEX düzeyi ve bunların cevreye ve insan sağlığına verebileceği potansiyel zararlar hakkında bilgiler sağlamak için çalışmalar yapılmıştır. Kanserojen ve kanserojen olmayan sağlık riskleri USEPA yaklaşımlarıyla değerlendirilmiştir [19, 20].

UOB maruziyetinin sağlık üzerindeki etkileri, maruz kalmanın dozuna ve süresine bağlıdır. Maruziyetin dozu ve süresi UOB'lerin kronik yada toksik etki yaratmasına neden olmaktadır. Mesleki maruziyet, UOB'lerin etkileri ve yaratacağı sağlık sorunları açısından önem arz etmektedir. Üniversite kampüslerine ulaşım amaçlı özel araçların ve toplu taşımanın kullanılması, araç egzoz emisyonlarından kaynaklanan karbonmonoksit, partikül madde, azot oksitler ve uçucu organik bileşik gibi kirleticilerin kampüs hava kalitesini etkilemesine neden olmaktadır. Güvenliği sağlamak amaçlı görevlendirilen personel kampüse giriş ve çıkış sırasında araçlardan yayılan egzoz dumanına ve uçucu organik bileşiklere maruz kalmaktadır.

İzmir, Akdeniz şehirleri arasında UOB kirliliği en fazla olan şehirlerden biridir. Özellikle trafik emisyonları İzmir şehir merkezinde önemli bir UOB kaynağıdır [21]. İzmir'de yapılan çalışmada dış hava UOB kaynaklarına odaklanılmış ve UOB'lerin üçte ikisinin İzmir şehir merkezindeki trafik emisyonlarından kaynaklandığı, diğer kaynakların (ısınma, sanayi tesisleri) da kentsel alandaki UOB kirliliğine katkıda bulunduğu tespit edilmiştir [22].

İzmir'deki en büyük kampüs alanına sahip olan Dokuz Eylül Üniversitesi Tınaztepe Kampüsü 4.5 milyon m²'lik alanda 10 fakülteyi içinde barındırmaktadır. Kampüs ana girişi iki farklı noktadan sağlanmakta, her iki noktada 24 saat güvenlik amaçlı personel bulunmakta ve personel vardiyalı olarak çalışmaktadır. Kampüse giriş ve çıkışlar bariyer ve kapan sistemleri ile kontrol edilmektedir. Giris-cıkıs sırasında araçlar güvenlik görevlilerinin bulunduğu noktalarda hız kesmekte ve bekleme yapmaktadır. Duruş kalkış sırasında araç egzozlarından kaynaklanan UOB'lere güvenlik görevlileri maruz kalmaktadır. Çalışma kapsamında araç egzozlarından kaynaklanan UOB'lerin kampüs ana giriş kapılarında konsantrasyonları belirlenmiştir. Dış hava ve güvenlik kulübelerinin iç ortamında tespit edilen UOB'lerin solunması (inhalasyon) ile oluşacak sağlık etkilerinin değerlendirilmesi

amaçlanmıştır. Maruziyet sonucunda oluşacak kanserojen ve kanserojen dışı riskler tahmin edilmiştir.

2 Materyal ve metot

2.1 Çalışma alanı

Dokuz Evlül Üniversitesi Calısma Tinaztepe Kampüsü'nde gerçekleştirilmiştir. Tınaztepe Kampüsü İzmir şehir merkezine 15 km uzaklıktadır ve şehrin güneydoğusunda bulunmaktadır. Kampüse ana girişler iki farklı noktadan yapılmaktadır. Örneklemeler, bu iki ana giriş kapısında gerçekleştirilmiştir. "Batı Kapısı" olarak adlandırılan giriş, kampüsün batısında ve Buca ilçe merkezi yönünden gelen araçların giriş yaptığı kapıdır. "Doğu Kapısı'' olarak adlandırılan ikinci giriş ise kampüsün doğusunda, kampüse çevre yolunu kullanarak gelen araçların giriş yaptığı kapıdır (Şekil 1). Bu kapı İzmir Çevre Yolu'na kuş uçuşu 350 m uzaklıktadır. Her iki giriş kapısında araç girişleri kontrollü olarak gerçekleştirilmektedir. Bariyer sistemi ile kontrol sağlanmakta ve bariyer sistemlerinin bulunduğu noktada kampüs güvenliğini sağlayan güvenlik görevlilerinin görev sırasında kullandıkları kulübeler bulunmaktadır.



Şekil 1. Çalışma alanı genel görünümü ve örnekleme noktaları

2.2 Örnekleme programı

Örneklemeler 6 Mayıs 2024-13 Mayıs 2024 tarihleri arasında, kampüs ana giriş kapılarında eş zamanlı gerçekleştirilmiştir. Girişlerde 24 saat boyunca güvenlik sağlanmakta ve her 24 saat diliminde görevliler iki vardiya olarak çalışmaktadır. Örnekleme süresi görevlilerin çalışma süreleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Gündüz vardiyası 08:00-16:00 saatleri arasında, gece vardiyası 16:00-08:00 saatleri arasındadır. Bu bilgiler ışığında gündüz örneklemeleri 8 saat boyunca, gece örneklemeleri ise 16 saat boyunca gerçekleştirilmiştir (Tablo 1).

Hava kalitesi ölçümleri, eş zamanlı olarak güvenlik görevlilerinin bulunduğu kulübelerin iç ortamında ve kulübelerin dışında gerçekleştirilmiştir. Dış havada yapılan ölçümler bariyer sistemine en yakın noktada, güvenlik görevlilerinin durduğu alanda yapılmıştır. UOB'lerin konsantrasyonları, çalışma süreleri boyunca güvenlik görevlilerinin nefes aldığı seviyede izlenmiştir. İç ortam hava kalitesi ölçümlerinin yapıldığı kulübeler Batı Kapısı'nda 20 m², Doğu Kapısı'nda 25 m²'dir. Her iki kulübenin bariyerlere bakan yönünde güvenlik görevlilerinin girişleri kontrol etmek için kullandıkları 0.4 m² ölçüsünde Pencereler 08:00-16:00 pencereler bulunmaktadır. vardiyasında sürekli açık, 16:00-08:00 vardiyasında ise Kulübelerde genel olarak kapalı tutulmaktadır. iklimlendirme klima elektrikli ısıtıcılar ve ile sağlanmaktadır.

Tablo 1. Örnekleme programı

Örnekleme	Örnekl	eme Süresi	Örnalilarna Nalitaa		
Tarihi	Gündüz	Gece	Of nekienne Tvoktasi		
6/7-Mayıs-2024 (Pazartesi) 7/8-Mayıs-2024 (Salı) 8/9-Mayıs-2024 (Çarşamba) 9/10-Mayıs-2024 (Perşembe) 10/11-Mayıs-2024 (Cuma) 11/12-Mayıs-2024 (Cumartesi) 12/13-Mayıs-2024 (Pagar)	08:00- 16:00 (8 Saat)	16:00-08:00 (16 saat)	Tınaztepe Kampüsü- Doğu Kapısı Tınaztepe Kampüsü- Batı Kapısı		

08:00-16:00 vardiyasında Batı Kapısı'nda dört, Doğu Kapısı'nda üç güvenlik, 16:00-08:00 vardiyasında Batı Kapısı'nda üç, Doğu Kapısı'nda bir güvenlik görev yapmaktadır. Ana giriş kapılarında görevli personelin tümü erkek ve yaşları 25 ila 59 aralığındadır. Personelin kronik sağlık sorunlarının olmadığı ancak yaklaşık % 70'inin sigara kullandığı bilgisi anket çalışması ile elde edilmiştir.

2.3 Örnek hazırlama ve analiz

Örnekleme ve analiz, Amerikan Test ve Malzeme Kurumu, D 3686-08 metodu [23] ile gerçekleştirilmiştir. Aktif örnekleme yöntemi ile UOB'ler bir nem tutucu (kalsiyum klorür), bir aktif karbon tüpü, bir rotametre, bir kuru gaz sayacı ve bir vakum pompasından oluşan örnekleme dizisi kullanılarak toplanmıştır (Şekil 2). Örnekleme için birbirini takip eden iki bölümden oluşan 150 mg (100/50) aktif karbon içeren tüpler (SKC 226-01; Hindistan cevizi kömürü, 6×70 mm) kullanılmıştır. Vakum pompası akış hızı ortalama 0.4 L/dk'dır. Pompa akış hızı örnekleme başlangıç ve bitişinde SKC Defender 510-M gaz akış kalibratörü ile kontrol edilmiş, örnekleme boyunca da rotametre ile izlenmiştir. Örnekleme bitiminde adsorpsiyon tüplerinin iki ucu, kirlenmeyi ve desorpsiyonu önlemek için plastik kapaklarla kapatılmış, etiketlenmiş ve ekstrakte edilene kadar -20 °C'de saklanmıştır. Adsorpsiyon tüplerinden 2 ml'lik cam şişeye alınan aktif karbon üzerine ekstraksiyon solventi olarak 1.0 ml karbon disülfit (CS₂, Sigma-Aldrich 342270 ReagentPlus®) ilave edilmiştir. Numuneler 15 dk süreyle ultrasonik banyoda bekletilmiş ve daha sonra 15 dk santrifüjde tutulmuştur (Şekil 3). Cam pastör pipet ile başka bir numune şişesine alınan sıvı kısım analiz edilinceye kadar -20 °C'de saklanmıştır.

UOB numuneleri, kütle seçici dedektörü (Agilent 5973 inert MSD) olan bir gaz kromatografisi (GC) (Agilent 6890N) ile analiz edilmiştir. Kromatografik kolon, HP5-MS $(30 \text{ m}, 0.25 \text{ mm}, 0.25 \text{ }\mu\text{m})$ ve taşıyıcı gaz, 1 ml/dk ve 36 cm/s doğrusal hızda, 1:20 bölünme oranında helyumdur. Split oranı olarak 1:20, inlet sıcaklığı olarak ise 240 °C kullanılmıştır. Analiz sırasında firin sıcaklığı 40 °C'de başlatılıp, 5 °C/dk'lık artışla 120 °C'ye yükseltilmiş ve 1 dk bu sıcaklıkta tutulmustur. MSD elektron iyonizasyon (EI) modunda calıstırılmıştır. İvon kavnağı dört kutupludur ve GC/MSD arayüz sıcaklıkları sırasıyla 230, 150 ve 280 °C secilmistir. MSD, secilen ivon izlemede olarak çalıştırılmıştır. Bileşikler, alıkonma sürelerine (kalibrasyon standardının alıkonma süresinden itibaren ± 0.05 dakika içinde), hedef ve niteleyici iyonlara göre tanımlanmıştır. Tanımlanan bileşiklerin miktarı, harici standart kalibrasyon prosedürü kullanılarak belirlenmiştir. Sıvı numuneler için kalibrasyon, CS₂'de beş seviyede (0.02, 0.1. 1.0, 3.0 ve 5.0 μg/ml) standart çözelti enjekte edilerek (1 μl) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. UOB örnekleme sistemi

2.4 Kalite kontrol/kalite güvence

Ölçülebilir UOB miktarları (enstrümental tespit limitleri, IDL), kromatografik sinyal/gürültü oranı 3 olan bir tepe alanı kullanılarak kalibrasyon eğrisindeki en düşük standarttan doğrusal ekstrapolasyonla belirlenmiştir. Bu miktarlar 2 ila 5 pg arasında değişmiştir (1 µl için enjeksiyon, bölme oranı 1:20). Numune alma ve ekstraksiyon sırasında herhangi bir kontaminasyon olup olmadığını belirlemek için aktif karbon tüpleri kullanılmıştır. Saha körleri için, her gün gündüz ve gece örneklemelerinde ayrı ayrı dört aktif karbon tüpü örnekleme alanına götürülmüş ve laboratuvara geri getirilerek ekstrakte edilmiştir. Ekstraksiyon solventi (CS₂) de aynı amaç için analiz edilmiştir. Tüm örneklerin ekstraksiyon işlemi birlikte gerçekleştirilmiş ve bu işlem sırasında 3 ayrı 2 ml'lik cam şişeye 1 ml CS₂ hazırlanmış ve örnekler ile birlikte analiz edilmiştir. Çözücüde UOB'lerin hiçbiri saptanmazken, saha köründeki miktarlar genellikle numune miktarlarının %1'inden azdır. Kör numunelerde tespit edilen bileşikler için yöntem tespit limiti (MDL), kör numunelerdeki ortalama konsantrasyon artı üç standart sapma olarak tanımlanmıştır. MDL benzen için 0.10 µg/m³ ve toluen için 0.11 µg/m³'tür. Aktif karbondan UOB'lerin CS₂ ekstraksiyonuyla geri kazanım verimlilikleri, standart ekleme deneyi ile belirlenmiştir (n=3). Tespit edilen UOB'lerin geri kazanımının %75'ten yüksek olduğu gözlenmiştir.



Şekil 3. Aktif karbon ve ekstraksiyon sıvısı

2.5 Sağlık riski değerlendirmesi

Kampüs ana giriş kapılarında görev alan güvenlik personelinin araç egzozundan kaynaklanan UOB'lere maruziyeti belirlenmiş ve sağlık riski değerlendirmesi yapılmıştır. Sağlık riski değerlendirmesi, Amerika Çevre Koruma Ajansı rehber dokümanlarına dayandırılmış [24] ve inhalasyon yoluyla maruziyet dikkate alınmıştır.

UOB'lerin sağlık risklerini tahmin etmek için "Kanserojen Risk" ve "Kronik Toksik Risk (Kanserojen Olmayan Risk)" değerleri hesaplanmıştır. Maruz kalınan konsantrasyon (EC), Denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır [25]. Denkleme dahil edilen değişkenler Tablo 2'de verilmiştir.

$$EC = \frac{C \times ET \times EF \times ED}{AT}$$
(1)

Denklem (1)'de "C" her bir uçucu organik bileşiğin havadaki konsantrasyonunu (mg/m³), "ET" maruz kalma süresini (saat/gün), "EF" 1 yılda çalıştığı toplam gün sayısını (gün/yıl) "ED" maruz kalma süresini (yıl) ve "AT" ortalama ömrü (saat) ifade etmektedir. Güvenlik görevlilerin 2024 yılı için yıllık çalışma günü, resmi/dini tatiller ve yıllık izinleri haricinde 350 gün olarak hesaplanmış, maruziyet süresi de çalışma yılları dikkate alınarak 30 yıl olarak belirlenmiştir.

Tablo 2. Risk değerlendirmesinde kullanılan ı	parametreler
--	--------------

	Parametre	Kaynak		
ET	Gündüz vardiyası	8	Anket	
(saat/gün)	Gece vardiyası	16	Anket	
EF (gün/yıl)	l yılda çalıştığı toplam gün sayısı	350	Anket	
ED (yıl)	Toplam çalışma süresi	30	Anket	
AT (saat)	Kanserojen risk	365*70*24		
	Kanserojen olmayan risk	262800=AT=ED =365*30*24	[25]	

UOB'lerin kanserojen risk (CR) değeri Denklem (2) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$CR = EC \times CSF \times 10^3$$
 (2)

Denklem (2)'de "CSF" solunum birim riskini $(1/(\mu g/m^3))$ ifade etmektedir.

Her bir UOB'in kanser riskini dikkate alarak belirlenen Toplam Kanserojen Risk (TCR) Denklem (3) ile hesaplanmaktadır.

$$TCR = CR_{UOB-1} + CR_{UOB-2} + \dots + CR_{UOB-n}$$
(3)

TCR $\geq 1.00 \times 10^{-4}$ olduğunda toplam kanser riski artar, ancak TCR $\leq 1.00 \times 10^{-6}$ değeri olduğunda toplam kanser riski kabul edilebilir düzeydedir. Ayrıca TCR 1.00×10^{-4} ile 1.00×10^{-6} değeri arasında ise maruz kalan popülasyon için toplam kanser riski muhtemeldir [25].

Kronik toksik risk (kanserojen olmayan risk) değerlendirmesi için Tehlike Katsayısı (HQ) hesabında Denklem (4) kullanılmıştır [25].

$$HQ = \frac{EC}{RfC}$$
(4)

Denklem (4)'de "RfC" solunum maruziyeti için referans konsantrasyon (mg/m³) değerini ifade etmektedir.

Tehlike indeksi (HI) hesabında tehlike katsayısı (HQ) ile belirlenen tüm UOB'ler için Denklem (5) ile hesaplanmaktadır.

$$HI = HQ_{UOB-1} + HQ_{UOB-2} + \dots + HQ_{UOB-n}$$
(5)

Elde edilen toplam tehlike indeksine göre HI > 1 ise kanserojen olmayan risk önemli ölçüde artar, ancak HI < 1 olduğunda kanserojen olmayan risk kabul edilebilir düzeydedir değerlendirmesi yapılmaktadır.

İnhalasyon yoluyla maruziyete ilişkin kronik toksik risk analizinde UOB'lerin RfC değerleri dikkate alınmıştır. Hesaplamalarda kullanılan, CSF ve RfC değerleri Tablo 3'de listelenmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 İç Ortam ve dış hava UOB konsantrasyonları

Kampüs ana giriş kapılarında yapılan ölçümlerde 48 UOB analiz edilmiştir. Dört örnekleme noktasında genel olarak 28 UOB tespit edilmiştir. Örnekleme noktalarındaki ortalama toplam UOB konsantrasyonları Tablo 4'de verilmiştir. Doğu Kapısında, çevre yolu güzergahından gelen araçların giriş yaptığı bölgede ölçülen Σ_{28} UOB'lerin ortalama konsantrasyonları iç ortamda gece saatlerinde (16:00 ile 08:00 arasında) 11.9 µg/m3, gündüz saatlerinde (08:00 ile 16:00 arasında) 9.6 µg/m3, dış havada gece saatlerinde 6.8 µg/m³, gündüz saatlerinde 8.8 µg/m³ olarak ölçülmüştür. Doğu kapısında ölçülen konsantrasyonlarda, UOB'ler ic ortamda gece saatlerinde yüksek, bina dısında ölcülen dıs hava konsantrasvonlarında ise gündüz saatlerinde yüksek ölçülmüştür. Doğu kapısı haftanın tüm günlerinde saat 23:00'dan ertesi gün saat 06:30'a kadar arac girisine kapatılmaktadır. Bu saat aralığında Doğu Kapısı'nda görevli olan personel gündüz saatlerinde açık olan pencere ve kapıyı kapatmaktadır. Anketten alınan bilgilere göre örnekleme yapılan bir hafta boyunca gece görevli olan personelin iç ortamda sigara içtikleri belirlenmiştir. Gece saatlarinde pencere ve kapının kapalı olması ve güvenlik görevlilerinin sigara kullanımı gece saatlerindeki iç ortam UOB konsantrasyonlarını arttırmıştır. Doğu kapısının gece saatlerinde araç geçişine kapatılması da dış havada gündüz saatlerinde yüksek olan UOB konsantrasyonlarının gece saatlerinde düşmesine neden olmuştur. Şehir içinden gelen

araçların kampüse giriş yaptığı Batı Kapısı'nda ölçülen Σ_{28} UOB'lerin ortalama konsantrasyonları iç ortamda gece saatlerinde 12.3 μ g/m³, gündüz saatlerinde 16.4 μ g/m³, dış havada gece saatlerinde 6.3 µg/m3, gündüz saatlerinde 9.3 olarak Ankara'da $\mu g/m^3$ ölçülmüştür. üniversite kampüsünde yapılan UOB ölçümlerinde ortalama konsantrasyonlar 0.04 ila 7.89 µg/m³ arasında değismistir [15]. Tınaztepe Kampüsü girislerinde elde edilen sonuclar ile benzerlik göstermektedir. Batı Kapısı'nda ölcülen konsantrasyonlar, Doğu Kapısı'nda tespit edilen konsantrasyonlardan farklı olarak hem iç ortamda hem de bina dışında gündüz saatinde yüksek ölçülmüştür. Batı Kapısı, Buca ilçe merkezinden gelen araçların giriş yaptığı ve gün içinde diğer kapı ile karşılaştırıldığında araç trafiğinin daha yoğun olduğu kapıdır. Araç emisyonlarının başlıca UOB kaynağı olduğu kapalı otoparklarda yapılan hava kalitesi çalışmasında <u><u>S</u>UOB konsantrasyonları 1040 ile</u> 1190 µg/m³ aralığında değişmiştir [14]. Kampüs girişlerinde tespit edilen konsantrasyonlar bu seviyelerin oldukça altında kalmıstır.

UOB'ler	Toksik Sınıflandırma*	CSF (1/(µg/m ³))	Kaynak	RfC (mg/m ³)	Kaynak
Benzen	А	7.8×10 ⁻⁶	[26]	0.03	[26]
Kloroform	B2	2.3×10 ⁻⁵	[26]	0.3	[26]
1,2-dikloroetan	B2	2.6×10 ⁻⁵	[26]	0.4	[27]
Karbon tetraklorür	B2	6.0×10 ⁻⁶	[26]	0.1	[26]
Trikloroetilen	**	4.1×10 ⁻⁶	[26]	2 x 10 ⁻³	[26]
1,1,2-trikloroetan	***	1.6×10 ⁻⁵	[26]		
Bromoform	B2	1.1×10 ⁻⁶	[26]		
Toluen	****			5	[26]
Etilbenzen	D	2.5×10 ⁻⁶	[27]	1	[26]
m,p-Ksilen	****			0.1	[26]
Stiren	****	5.0×10 ⁻⁷	[28]	1	[26]
Dibromometan	****	1.0×10 ⁻⁸	[28]	9 x 10 ⁻³	[26]
İzopropilbenzen	D			0.4	[26]
1,4-diklorobenzen	С	11×10 ⁻⁶	[27]	0.8	[26]
Naftalin	С	3.4×10 ⁻⁵	[27]	3.0×10 ⁻³	[26]

*A= İnsanlar için Kanserojen, B2= İnsanlar için Muhtemelen Kanserojen (çok az insan verisi içeren veya hiç olmayan), C= Olası insan kanserojeni,

D= İnsan kanserojenliğine göre sınıflandırılamaz.

** Mutajenik etki tarzi nedeniyle kanserojen olduğu sonucuna varmıştır.

*** Kansere yakalanma riskinin on binde birden fazla artmasına neden olmaz.

**** Kanserojen potansiyelini değerlendirmek için yetersiz bilgi.

***** İnsanlar için kanserojen olma ihtimali yüksek.

Tablo 4. Kampüs ana giriş kapıları ortalama Σ_{28} UOB konsantrasyonları (μ g/m³)

		Doğu Kapı				Batı Kapı				
∑ ₂₈ UOB Konsantrasyonu	İç ortam		Dış hava		İç ortam		Dış hava			
	Gündüz	Gece	Gündüz	Gece	Gündüz	Gece	Gündüz	Gece		
Min.	5.5	9.7	5.5	5.1	8.6	8.8	4.2	4.4		
Mak.	15.7	14.2	16.0	10.3	21.8	19.8	14.9	10.0		
Ort.	9.6	11.9	8.8	6.8	16.4	12.3	9.3	6.3		
S.S.	3.8	1.7	3.6	1.9	4.3	3.7	3.9	2.0		

Batı Kapısı'nın, Doğu Kapısı'ndan farklı olarak 7 gün ve 24 saat aktif olarak giriş çıkış yapılan bir kapı olmasına rağmen kampüse giren araç sayısının gece saatlerinde yok denecek kadar az olması gece saatleri için dış hava konsantrasyonlarında (6.8 μ g/m³ ve 6.3 μ g/m³) bir farklılık varatmamıştır. Toplam UOB konsantrasyonları hem gece saatlerinde hem de gündüz saatlerinde ic ortam havasında dıs havadan yüksek ölçülmüştür. Her iki kapıdaki güvenlik UOB kulübesi ic ortam konsantrasyonları karşılaştırıldığında, Doğu Kapısı'nda gece konsantrasyonları gündüzden yüksek ölçülmüştür. Batı Kapısı'ndaki gece iç ortam konsantrasyonları Doğu Kapısı iç ortam gece UOB konsantrasyonlarına benzerdir. Ancak Batı Kapısında iç ortamda UOB konsantrasyonu diğer kapıya göre yüksek ölçülmüştür. Gündüz saatlerinde Batı Kapısı'nda diğer kapıya göre daha fazla sayıda güvenlik görevlisi bulunmaktadır. Batı Kapısı'nda gündüz 4 personel, gece 3 ya da 4 personel, Doğu Kapısı'nda gündüz 3 personel gece 1 personel bulunmaktadır. Gece görev yapan personelin pencere ve kapıları kapatması dış havadan gelecek UOB konsantrasyonlarını engellemekte ancak iç ortam da sigara içilmesinden kaynaklanan konsantrasyonların artmasına neden olmuştur. Tablo 5, Tablo 6, Tablo 7 ve Tablo 8'de Doğu ve Batı Kapısı'nda iç ortam ve dış havada tespit edilen bileşikler ve konsantrasyonları listelenmiştir. İç ortamdan alınan örneklerde çoğunlukla tüm bileşikler tespit edilmiştir. Doğu Kapısı iç ortam havasında, dibromometan ve klorobenzen gece saatlerinde 4 gün tespit edilmiş, gündüz ölçümde gözlenmemiştir. saatlerinde ise hiçbir Bromodiklorometan, dibromoklorometan, izopropilbenzen, sec-butilbenzen ve n-butilbenzen iç ortam havasında gündüz geceye göre daha az sayıda tespit edilmiştir. Batı Kapısında ic ortam havasında sadece bromoform gece saatlerinde 5 gün tespit edilmiş, gündüz saatlerinde ise hiçbir ölçümde gözlenmemistir. Bromodiklorometan ic ortam havasında gündüz geceye göre daha az sayıda tespit edilmiştir. Tertbutilbenzen ve 1,4-diklorobenzen her iki kapıda iç ortamda tespit edilmemiş ancak dış havada gözlenmiştir.

Dış havadan alınan örneklerde tespit edildiği gün sayısında, gündüz gece farklılığı bromodiklorometan, 1,1,2trikloroetan, klorobenzen, 1,2-diklorobenzen, n-butilbenzen, naftalin ve stiren'de gözlenmiştir (gece saatlerinde daha fazla örnekte tespit edilmiştir). Tert-butilbenzen ve 1,4diklorobenzen Batı Kapısı'nda, dibromometan ve 1,4diklorobenzen Doğu Kapısı'nda dış hava gündüz saatlerinde gece saatlerine göre daha fazla günde tespit edilmiştir. Ortamlar arasındaki bu farklılıklar dışında, iç ortam ve dış havada yapılan ölçümlerde hem gece hem de gündüz örneklerinde en yüksek konsantrasyona sahip bileşikler sırasıyla toluen, m/p-ksilen ve benzen'dir [29, 30].

Tablo 5. UOB'lerin Doğu Kapısı iç ortam havasındaki konsantrasyonları (µg/m³)

	Doğu Kapı-İç Ortam									
LIOP			Güno	lüz				Geo	e	
COB	Min.	Mak.	Ort.	S.S.	Tespit edilen örnek sayısı	Min.	Mak.	Ort.	S.S.	Tespit edilen örnek sayısı
Kloroform	0.30	1.44	0.67	0.41	7	0.85	2.45	1.54	0.60	7
1,2-dikloroetan	0.06	0.12	0.09	0.03	6	0.07	0.11	0.09	0.01	7
Benzen	0.21	1.13	0.71	0.38	7	0.40	1.24	0.71	0.29	7
Karbon tetraklorür	0.28	0.70	0.53	0.17	7	0.53	1.03	0.79	0.16	7
Trikloroetilen	0.02	0.62	0.33	0.25	7	0.04	0.30	0.12	0.09	7
Dibromometan	t.l.a.*	t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.		0.01	0.03	0.02	0.01	4
Bromodiklorometan	0.04	0.10	0.07	0.03	3	0.03	0.09	0.06	0.03	7
Toluen	0.68	7.13	3.30	2.13	7	1.49	3.40	2.48	0.75	7
1,1,2-trikloroetan	0.04	0.08	0.07	0.02	4	0.02	0.04	0.03	0.01	4
Dibromoklorometan	0.03	0.10	0.07	0.03	5	0.04	0.08	0.06	0.02	7
Tetrakloroetilen	0.08	0.66	0.41	0.23	7	0.10	0.42	0.27	0.11	7
Klorobenzen	t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.		0.01	0.02	0.01	0.003	4
Etilbenzen	0.21	0.56	0.37	0.14	7	0.43	0.76	0.58	0.11	7
m,p-Ksilen	0.75	2.09	1.42	0.58	7	1.87	3.24	2.46	0.43	7
Bromoform	0.21	0.33	0.25	0.04	7	0.23	0.47	0.33	0.10	7
Stiren	0.02	0.59	0.28	0.25	7	0.12	2.02	0.62	0.71	7
o-Ksilen	0.24	0.64	0.43	0.16	7	0.52	1.06	0.73	0.16	7
İzopropilbenzen	0.02	0.03	0.03	0.01	4	0.02	0.03	0.02	0.005	7
Propilbenzen	0.03	0.08	0.06	0.02	7	0.05	0.09	0.07	0.02	7
1,2,4-trimetilbenzen	0.04	0.12	0.08	0.03	7	0.10	0.18	0.13	0.03	7
tert-butilbenzen	t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.		t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.	
1,3,5-trimetilbenzen	0.18	0.57	0.39	0.15	7	0.45	0.82	0.58	0.13	7
1,4-Diklorobenzen	t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.		t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.	
sec-butilbenzen	0.01	0.03	0.02	0.01	5	0.02	0.04	0.02	0.01	7
1,2-Diklorobenzen	0.01	0.04	0.03	0.01	6	0.02	0.24	0.07	0.08	7
p-izopropiltoluen	0.04	0.18	0.10	0.05	7	0.05	0.13	0.09	0.03	7
n-butilbenzen	0.01	0.05	0.03	0.01	4	0.01	0.03	0.02	0.01	7
Naftalin	0.02	0.06	0.03	0.01	6	0.02	0.03	0.02	0.005	7

*t.l.a.=Tespit limiti altında

	Batı Kapı-İç Ortam									
LIOD			Günd	üz	1	,		Gece		
UUB	Min.	Mak.	Ort.	S.S.	Tespit edilen örnek sayısı	Min.	Mak.	Ort.	S.S.	Tespit edilen örnek sayısı
Kloroform	0.10	0.61	0.27	0.17	7	0.13	0.61	0.32	0.15	7
1,2-dikloroetan	0.06	0.12	0.09	0.02	6	0.05	0.10	0.07	0.02	7
Benzen	0.69	3.04	2.03	0.89	7	0.82	3.58	1.54	0.97	7
Karbon tetraklorür	0.24	0.51	0.42	0.09	7	0.26	0.48	0.35	0.10	7
Trikloroetilen	0.02	0.97	0.39	0.32	7	0.04	0.18	0.10	0.05	7
Dibromometan	t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.		t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.	
Bromodiklorometan	0.03	0.07	0.05	0.03	2	0.01	0.08	0.04	0.02	7
Toluen	3.82	9.17	6.76	1.88	7	2.68	6.98	4.75	1.65	7
1,1,2-trikloroetan	0.04	0.09	0.07	0.02	7	0.01	0.06	0.04	0.02	5
Dibromoklorometan	t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.		0.01	0.01	0.01		1
Tetrakloroetilen	0.08	1.11	0.64	0.37	7	0.19	0.76	0.49	0.20	7
Klorobenzen	0.01	0.02	0.02	0.00	3	0.01	0.02	0.01	0.01	4
Etilbenzen	0.45	1.08	0.73	0.23	7	0.38	0.97	0.54	0.20	7
m,p-Ksilen	1.48	3.39	2.32	0.66	7	1.38	3.13	1.73	0.63	7
Bromoform	t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.		0.01	0.04	0.02	0.01	5
Stiren	0.34	1.00	0.66	0.27	7	0.21	1.34	0.70	0.35	7
o-Ksilen	0.44	1.06	0.70	0.21	7	0.39	0.91	0.50	0.18	7
İzopropilbenzen	0.03	0.07	0.05	0.01	7	0.02	0.07	0.03	0.02	7
Propilbenzen	0.07	0.18	0.13	0.04	7	0.06	0.16	0.09	0.03	7
1,2,4-trimetilbenzen	0.06	0.17	0.13	0.04	7	0.06	0.16	0.09	0.03	7
tert-butilbenzen	t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.		t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.	
1,3,5-trimetilbenzen	0.26	0.71	0.52	0.18	7	0.27	0.68	0.38	0.14	7
1,4-Diklorobenzen	t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.		t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.	
sec-butilbenzen	0.02	0.04	0.03	0.01	7	0.01	0.04	0.02	0.01	7
1,2-Diklorobenzen	0.04	0.13	0.08	0.03	7	0.04	0.09	0.06	0.01	7
p-izopropiltoluen	0.10	0.31	0.20	0.07	7	0.10	0.34	0.20	0.08	7
n-butilbenzen	0.03	0.06	0.05	0.01	7	0.02	0.06	0.03	0.01	7
Naftalin	0.05	0.09	0.07	0.02	7	0.03	0.09	0.05	0.02	7

Tablo 6. UOB'lerin Batı Kapısı iç ortam havasındaki konsantrasyonları ($\mu g/m^3$)

Tablo 7. UOB'lerin Doğu Kapısı dış hava konsantrasyonları ($\mu g/m^3$))
--	---

	Doğu Kapı-Dış Hava									
LIOD			Günd	üz				Gec	e	
СОВ	Min.	Mak.	Ort.	S.S.	Tespit edilen örnek sayısı	Min.	Mak.	Ort.	S.S.	Tespit edilen örnek sayısı
Kloroform	0.06	0.12	0.09	0.03	7	0.06	0.12	0.09	0.02	7
1,2-dikloroetan	0.06	0.15	0.11	0.03	6	0.05	0.14	0.09	0.03	7
Benzen	0.21	1.13	0.61	0.39	7	0.18	0.90	0.53	0.26	7
Karbon tetraklorür	0.25	0.50	0.41	0.11	7	0.26	0.50	0.42	0.10	7
Trikloroetilen	0.02	0.68	0.34	0.27	7	0.03	0.29	0.13	0.09	7
Dibromometan	0.03	0.07	0.05	0.02	4	0.02	0.02	0.02	0.003	2
Bromodiklorometan	0.02	0.02	0.02	t.l.a.	1	0.02	0.03	0.02	0.01	4
Toluen	0.67	7.80	3.07	2.34	7	1.01	2.66	1.81	0.60	7
1,1,2-trikloroetan	0.04	0.05	0.04	0.01	2	0.02	0.04	0.02	0.01	6
Dibromoklorometan	0.11	0.32	0.25	0.08	6	0.05	0.18	0.15	0.04	7
Tetrakloroetilen	0.08	1.01	0.58	0.37	7	0.05	0.55	0.31	0.18	7
Klorobenzen	0.02	0.02	0.02	t.l.a.	1	0.01	0.02	0.01	0.005	4
Etilbenzen	0.11	0.40	0.23	0.12	7	0.15	0.37	0.22	0.08	7
m,p-Ksilen	0.35	1.44	0.85	0.50	7	0.61	1.58	0.90	0.35	7
Bromoform	0.24	2.07	1.33	0.63	7	0.50	1.27	1.03	0.26	7
Stiren	0.01	0.40	0.16	0.16	5	0.04	1.93	0.41	0.69	7
o-Ksilen	0.13	0.43	0.27	0.14	7	0.16	0.39	0.25	0.08	7
İzopropilbenzen	0.01	0.03	0.02	0.01	5	0.01	0.02	0.01	0.004	5
Propilbenzen	0.02	0.08	0.04	0.02	7	0.02	0.05	0.03	0.01	7
1,2,4-trimetilbenzen	0.02	0.12	0.05	0.04	7	0.02	0.07	0.05	0.02	7
tert-butilbenzen	0.02	0.03	0.02	0.01	2	0.01	0.01	0.01	0.001	2
1,3,5-trimetilbenzen	0.08	0.54	0.24	0.17	7	0.10	0.28	0.19	0.06	7
1,4-Diklorobenzen	0.01	0.04	0.03	0.01	7	0.01	0.01	0.01	0.003	3
sec-butilbenzen	0.01	0.02	0.02	0.005	4	0.01	0.03	0.02	0.01	5
1,2-Diklorobenzen	t.l.a.	0.03	0.02	0.01	3	0.01	0.02	0.01	0.002	6
p-izopropiltoluen	0.03	0.12	0.06	0.03	7	0.02	0.13	0.06	0.04	7
n-butilbenzen	0.02	0.04	0.03	0.01	4	0.01	0.02	0.02	0.005	7
Naftalin	0.01	0.06	0.03	0.02	5	0.01	0.03	0.02	0.01	6

					Batı Kapı	1-Dış Hav	va			
LIOD			Günd	lüz	-			Gec	e	
000	Min.	Mak.	Ort.	S.S.	Tespit edilen örnek sayısı	Min.	Mak.	Ort.	S.S.	Tespit edilen örnek sayısı
Kloroform	0.06	0.10	0.08	0.02	7	0.06	0.11	0.08	0.02	7
1,2-dikloroetan	0.06	0.14	0.10	0.03	6	0.04	0.10	0.07	0.02	7
Benzen	0.21	1.13	0.66	0.36	7	0.21	0.78	0.50	0.22	7
Karbon tetraklorür	0.22	0.42	0.34	0.08	7	0.24	0.42	0.37	0.08	7
Trikloroetilen	0.04	0.92	0.38	0.32	7	0.03	0.16	0.11	0.05	7
Dibromometan	0.05	0.05	0.05	0.003	3	0.02	0.02	0.02	0.005	3
Bromodiklorometan	0.04	0.04	0.04	0.00	3	0.02	0.02	0.02	0.00	3
Toluen	0.92	7.38	3.24	2.26	7	0.91	2.71	1.74	0.73	7
1,1,2-trikloroetan	0.05	0.05	0.05	t.l.a.	1	0.02	0.05	0.03	0.01	4
Dibromoklorometan	0.07	0.32	0.19	0.08	7	0.04	0.15	0.10	0.04	7
Tetrakloroetilen	0.13	1.60	0.61	0.49	7	0.22	0.55	0.41	0.12	7
Klorobenzen	t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.		0.01	0.01	0.01	0.002	2
Etilbenzen	0.16	0.56	0.32	0.15	7	0.15	0.43	0.25	0.09	7
m,p-Ksilen	0.51	1.83	1.09	0.54	7	0.51	1.73	0.92	0.39	7
Bromoform	0.42	1.92	1.09	0.51	7	0.30	0.94	0.63	0.26	7
Stiren	0.03	0.14	0.07	0.05	5	0.01	1.32	0.31	0.47	7
o-Ksilen	0.20	0.69	0.41	0.19	7	0.19	0.51	0.31	0.11	7
İzopropilbenzen	0.02	0.05	0.03	0.01	6	0.01	0.02	0.02	0.01	6
Propilbenzen	0.04	0.12	0.07	0.03	7	0.03	0.08	0.05	0.02	7
1,2,4-trimetilbenzen	0.04	0.14	0.08	0.04	7	0.03	0.09	0.06	0.02	7
tert-butilbenzen	0.03	0.07	0.05	0.02	4	t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.	t.l.a.	
1,3,5-trimetilbenzen	0.17	0.59	0.33	0.17	7	0.13	0.38	0.25	0.09	7
1,4-Diklorobenzen	0.01	0.09	0.04	0.03	6	0.01	0.01	0.01	t.l.a.	1
sec-butilbenzen	0.01	0.02	0.01	0.01	4	0.01	0.04	0.02	0.01	5
1,2-Diklorobenzen	0.02	0.03	0.02	0.004	3	0.01	0.03	0.01	0.01	7
p-izopropiltoluen	0.03	0.12	0.06	0.04	6	0.02	0.17	0.06	0.05	7
n-butilbenzen	0.01	0.03	0.03	0.01	5	0.01	0.03	0.02	0.01	6
Naftalin	0.02	0.05	0.04	0.01	5	0.01	0.03	0.02	0.01	7

Tablo 8. UOB'lerin Batı Kapısı dış hava konsantrasyonları (µg/m³)

Benzen, toluen, etilbenzen, ksilenler (BTEX) ve 1,3,5trimetilbenzen gibi aromatik UOB'ler insan sağlığı açısından önemlidir [31, 32]. Aromatik UOB'ler, fosil yakıtların yanması (örn. benzinli ve dizel motorlar) ve benzinin buharlaşması gibi çeşitli kaynaklar tarafından atmosfere yayılmaktadır [22, 33, 34]. Örnekleme döneminde kampüs kapılarında ölcülen ortalama ana giriş BTEX konsantrasyonu (benzen, toluen, etilbenzen, m/p-ksilen ve oksilen konsantrasyonlarının toplamı) sırasıyla Doğu Kapı iç ortam gündüz 6.2 \pm 2.9 µg/m³ (ortalama \pm standart sapma), Doğu Kapı iç ortam gece 7.0±1.2 µg/m³, Doğu Kapı dış hava gündüz 5.0±2.9 µg/m³, Doğu Kapı dış hava gece 3.7±1.3 µg/m³, Batı Kapı iç ortam gündüz 12.5±3.4 µg/m³, Batı Kapı iç ortam gece 9.1±3.3 µg/m³, Batı Kapı dış hava gündüz $5.7\pm3.0 \,\mu\text{g/m}^3$, Batı Kapı dış hava gece $3.7\pm1.3 \,\mu\text{g/m}^3$ olarak bulunmuştur. Malezya'nın Kuala Lampur kentinde yapılan araştırmada BTEX'in ortalama konsantrasyonunun yaklaşık $49.56 \pm 23.71 \ \mu g/m^3$ olduğu, toluen'in $2.76 \pm 2.05 \ \mu g/m^3$ ila 22.31±11.54 µg/m3 arasında değişen ortalama seviyesiyle ana kirletici olduğu ve en kirli alanların sırasıyla yol kenarları, benzin istasyonları, petrokimya endüstrileri ve havaalanları olduğu tespit edilmiştir [35].

BTEX konsantrasyonları her iki ana giriş kapısındaki güvenlik kulübelerinde bazı günlerde gece bazı günler gündüz saatlerinde yüksek ölçülmüştür. BTEX'in hem yakıt hem de sigara kaynaklı bileşikler [21, 22, 36] olması iç ortam havasında gece ve gündüz saatleri arasında bu düzensizliğe neden olmuştur. Dış hava konsantrasyonları her iki ana giriş kapısında genel olarak gece saatlerinde düşmüştür. BTEX konsantrasyonları kapalı otopark (benzen 366 μ g/m³, toluen 374 μ g/m³, Σ BTEX 1246 μ g/m³) ve benzin istasyonlarında (benzen 1731 μ g/m³, toluen 1995 μ g/m³, Σ BTEX 5352 μ g/m³) tespit edilen konsantasyonların [30] oldukça altındadır. Tablo 5, 6, 7 ve 8 'de verilen benzen ve toluen konsantrasyonları Cezayir'de yol kenarlarında tespit edilen benzen (2.42 μ g/m³) ve toluen (2.49 μ g/m³) konsantrasyonları [29], üniversite kampüsü benzen (2.18 μ g/m³), toluen (7.89 μ g/m³), etilbenzen (0.85 μ g/m³) ve ksilenler (2.62 μ g/m³) konsantrasyonları [15] ile benzerlik göstermiştir.

BTEX konsantrasyonlarının örnekleme noktalarında günlere göre değişimi Tablo 9'da verilmiştir. Dış hava gündüz BTEX konsantrasyonu Pazar günleri kampüse araç girişinin en az olduğu gün olması nedeniyle konsantrasyonların belirgin olarak düşmesine neden olmuştur. Hafta sonları güvenlik görevlilerinin UOB'lere maruz kalma olasılıkları daha düşüktür [37]. Tablo 5, Tablo 6, Tablo 7 ve Tablo 8'de görüldüğü gibi her iki ana giriş kapısında hem iç ortam havasında hem de dış hava da sırasıyla toluen, ksilen ve benzen konsantrasyonları en yüksek ölçülen bileşiklerdir. Toluen, araç egzozu, solvent kullanımı, benzin buharlaşması, fosil yakıt yanması vb. emisyon kaynaklarındaki en baskın türdür [29, 30, 36, 38]. 2000/69/EC Direktifine göre dış havadaki yıllık ortalama benzen konsantrasyonunun 5 μg/m³'ü gecmemesi gerekmektedir [39]. Benzen konsantrasyonu dış havadaki ölçümlerde bu limit değeri aşmamıştır.

BTEX Konsantrasyonu		Doğu	Карı		Batı Kapı					
	İç Ortam		Dış Hava		İç Or	tam	Dış Hava			
	Gündüz	Gece	Gündüz	Gece	Gündüz	Gece	Gündüz	Gece		
Pazartesi	7.8	8.7	6.4	5.9	9.8	5.7	7.8	6.2		
Salı	8.7	7.7	6.2	4.3	13.3	15.6	7.5	3.9		
Çarşamba	5.1	6.8	4.4	3.0	17.7	9.4	6.2	2.5		
Perşembe	4.0	6.8	3.1	4.6	6.9	7.2	3.6	4.3		
Cuma	10.8	7.8	10.3	3.4	13.5	9.9	10.0	3.9		
Cumartesi	4.7	6.0	3.2	2.5	13.7	9.4	2.9	2.2		
Pazar	2.7	5.0	1.6	2.3	12.9	6.4	2.1	3.1		

Tablo 9. BTEX konsantrasyonlarının örnekleme günlerine göre değişimi (µg/m³)

UOB'ler arasındaki oranlar, emisyon kaynaklarını belirlemek için izleyici olarak kullanılabilir. Sanayileşmeniz az olduğu şehirlerin için (UOB kaynağı araç trafiği) Toluen/Benzen (T/B) oranı l ila 2 arasında değişmektedir [40, 41, 42]. Doğu ve Batı Kapısı'nda gündüz saatlerinde T/B oranı hem dış hava da hem de iç ortamda gece saatlerine göre yüksektir. Kampüse araç girişinin en az olduğu Pazar gününde bu oran diğer günlere göre azalmış (Şekil 4 ve Şekil 5), BTEX dış hava konsantrasyonunun düşük olduğu Çarşamba ve Perşembe gündüz saatlerinde oran gece saatlerine göre düşmüştür.(Tablo 9).

3.2 Solunum yoluyla maruz kalma için sağlık riski değerlendirmesi

Kampüs ana giriş kapılarında görevli personel, kanserojen olduğu bilinen UOB'lere maruz kalmaktadır. Bu nedenle ana giriş kapılarındaki araç egzozu kaynaklı UOB emisyonlarıyla ilişkili sağlık riskleri değerlendirilmiştir. Mevcut birim risk faktörleri kullanılarak Tablo 3'de verilen on iki UOB (benzen, kloroform, 1,2-dikloroetan, karbon tetraklorür, trikloroetilen, 1,1,2-trikloroetan, bromoform, etilbenzen, stiren, dibromometan, 1,4-diklorobenzen ve naftalin) için yaşam boyu kanser riski değerlendirmesi yapılmıştır (Tablo 10). Toplam kanser riski bu on iki bileşiğin kanser riskleri toplanarak hesaplanmıştır (Denklem 3). Yaşam boyu UOB'lere maruz kalmanın yol açtığı kanserojen riskler, Bölüm 2.5'de belirtildiği üzere 1.0×10⁻⁴ ila 1.0×10⁻⁶ değeri aralığında tespit edilmiştir. Bu durumda UOB'lere maruz kalan güvenlik görevlileri için toplam kanser riski muhtemeldir. Güvenlik görevlileri için belirlenmiş yaşam boyu kanser riski değerleri benzin istasyonu çalışanları risk değerlerinin (1.4x10⁻⁵-8.0x10⁻⁵) [43], (2.2×10^{-5}) [19] oldukça altında kalmıştır.

Tahmini kanser riski belirlenen UOB'lerin bireysel olarak değerlerine bakıldığında gece saatleri risk değeri iç ortamda kloroform için 4.0x10⁻⁷ ile 7.7x10⁻⁶ ve benzen için 4.2x10⁻⁷ ile 3.8x10⁻⁶ arasında tespit edilmiştir. Kloroform ve benzen için, iç ortamda gece saatlerinde görevli personel için örnekleme yapılan günlerin %80'inde maruziyet nedeniyle kanser riski muhtemeldir. Diğer UOB'ler için kabul edilebilir risk seviyesinin altındadır. Gündüz dış hava için belirlenen her bir UOB için kanser risk değeri kabul edilebilir risk seviyesinin altındadır. Gündüz saatlerinde tespit edilen UOB'ler için kanser riski değerlerine bakıldığında, iç ortam havasında kloroform için 3.1x10⁻⁷ ile 4.5x10⁻⁶ arasında ve benzen için 2.3x10⁻⁷ ile 3.3x10⁻⁶ arasında değişmiştir. Dış havada gündüz saatlerin için kabul edilebilir risk seviyesinin altındadır. Gece saatlerinde güvenlik kulübesinde kapı ve pencere kapalı olarak görev yapan personel, iç ortamda içilen sigara nedeniyle kanserojen risk değeri artış göstermektedir. Gündüz saatlerinde ise pencerenin sürekli açık olması bu riski daha düşük seviyelere çekmektedir. Ancak her iki durumda da iç ortamdaki araç trafiğinden farklı bir kaynak risk yaratmaktadır.



Şekil 4. Doğu kapısı iç ortam ve dış hava T/B oranı



Şekil 5. Batı Kapısı iç ortam ve dış hava T/B oranı

Taulan Vanan Disk	Gün	düz	Gece			
Topiam Kanser Kiski	İç ortam	Dış Hava	İç ortam	Dış Hava		
Pazartesi-Doğu Kapı	4.3×10 ⁻⁶	2.6×10 ⁻⁶	5.6×10 ⁻⁶	2.8×10 ⁻⁶		
Pazartesi-Batı Kapı	3.5×10 ⁻⁶	2.3×10 ⁻⁶	2.5×10 ⁻⁶	2.4×10 ⁻⁶		
Salı-Doğu Kapı	4.3×10 ⁻⁶	2.7×10 ⁻⁶	9.2×10 ⁻⁶	2.4×10 ⁻⁶		
Sah-Batı Kapı	6.2×10 ⁻⁶	2.7×10 ⁻⁶	6.5×10 ⁻⁶	2.1×10 ⁻⁶		
Çarşamba-Doğu Kapı	3.1×10 ⁻⁶	2.3×10 ⁻⁶	5.3×10 ⁻⁶	1.6×10 ⁻⁶		
Çarşamba-Batı Kapı	5.8×10 ⁻⁶	2.5×10 ⁻⁶	3.9×10 ⁻⁶	1.4×10^{-6}		
Perşembe-Doğu Kapı	2.6×10 ⁻⁶	1.99×10 ⁻⁶	4.99×10 ⁻⁶	1.7×10 ⁻⁶		
Perşembe-Batı Kapı	2.3×10 ⁻⁶	2.0×10 ⁻⁶	2.3×10 ⁻⁶	1.2×10 ⁻⁶		
Cuma-Doğu Kapı	5.3×10 ⁻⁶	2.7×10 ⁻⁶	7.2×10 ⁻⁶	2.0×10 ⁻⁶		
Cuma-Batı Kapı	3.9×10 ⁻⁶	2.7×10 ⁻⁶	4.5×10 ⁻⁶	1.8×10 ⁻⁶		
Cumartesi-Doğu Kapı	3.7×10 ⁻⁶	1.9×10 ⁻⁶	9.8×10 ⁻⁶	1.5×10 ⁻⁶		
Cumartesi-Batı Kapı	5.8×10 ⁻⁶	1.9×10 ⁻⁶	3.6×10 ⁻⁶	1.4×10 ⁻⁶		
Pazar-Doğu Kapı	5.7×10 ⁻⁶	1.6×10 ⁻⁶	7.5×10 ⁻⁶	1.9×10 ⁻⁶		
Pazar-Batı Kapı	5.2×10 ⁻⁶	1.4×10 ⁻⁶	3.4×10 ⁻⁶	1.7×10 ⁻⁶		

Tablo 10. Güvenlik görevlilerinin UOB'lere soluma yoluyla maruziyeti ile oluşan yaşam boyu kanser riski

Ayrıca kampüs ana giriş kapılarında dış hava ve iç ortam için tehlike indeksi (HI) bulguları Tablo 11'da sunulmaktadır. Tehlike indeksinin belirlenmesi için Tablo 3'de verilmiş olan on üç UOB için RfC değerleri dikkate alınmış ve her bir UOB için kronik toksik risk (kanserojen olmayan risk) değerlendirmesi (HQ) yapılmıştır. Hem iç ortam hem de dış hava için UOB türlerinin HQ'sunun 1'den küçük olduğunu ve kanserojen olmayan riskin kabul edilebilir düzeyde olduğu değerlendirmesi yapılmıştır. Otopark calısanları için yapılan hava kalitesi ölcümlerinde kanserojen olmayan riskler kabul edilebilir sınırlar dahilinde (HQ<1) ve benzen, toluen, etilbenzen ve ksilen için sırasıyla 0.36, 0.01, 0.006 ve 0.105 [20] olarak tespit edilmiş ve benzer şekilde Tınaztepe Kampüsünde güvenlik görevlileri için de kanserojen olmayan risk konusunda daha az endişe yaratacağı sonucuna varılmıştır.

Tablo 11. Örnekleme alanlarındaki UOB'ler için tahmini toplam kronik toksik (kanserojen olmayan) risk değeri

	Tehlike İndeksi (HI)							
Örnekleme Zamanı	Gi	indüz	Gece					
	İç Dış Hava Ortam		İç Ortam	Dış Hava				
Pazartesi-Doğu Kapı	0.08	0.09	0.05	0.05				
Pazartesi-Batı Kapı	0.08	0.07	0.03	0.04				
Salı-Doğu Kapı	0.09	0.08	0.03	0.03				
Salı-Batı Kapı	0.13	0.09	0.07	0.02				
Çarşamba-Doğu Kapı	0.05	0.05	0.03	0.01				
Çarşamba-Batı Kapı	0.11	0.05	0.04	0.01				
Perşembe-Doğu Kapı	0.02	0.02	0.04	0.03				
Perşembe-Batı Kapı	0.02	0.03	0.04	0.03				
Cuma-Doğu Kapı	0.12	0.12	0.07	0.06				
Cuma-Batı Kapı	0.12	0.12	0.05	0.04				
Cumartesi-Doğu Kapı	0.11	0.11	0.04	0.03				
Cumartesi-Batı Kapı	0.21	0.16	0.05	0.04				
Pazar-Doğu Kapı	0.02	0.01	0.03	0.02				
Pazar-Batı Kapı	0.05	0.02	0.04	0.02				

4 Sonuçlar

Büyükşehirlerde ulaşımın toplu taşıma yada özel araçlar ile sağlanması zorunlu hale gelmiştir. Nüfusun artışı ile birlikte araç sayısında artış görülmektedir. Üniversite kampüsleri hem personel hem de öğrenci sayılarının yoğun olduğu ve bununla bağlantılı olarak araç trafiğinin yaşandığı alanlardır. Kampüs ana girişlerinde güvenlik kontrollerinin yapıldığı noktalarda sürekli personel görevlendirilmekte, personel güvenlik kontrolü sırasında hızı yavaşlayan yada duruş-kalkış aktivitesi yapan araçların egzozlarından çıkan kirleticilere maruz kalmaktadır. Araç trafiği kaynaklı kirleticilerin başında uçucu organik bileşikler gelmektedir.

Çalışmada kampüs ana giriş kapılarında, güvenlik personelinin görev alanlarında dış hava ve iç ortamda uçucu organik bileşik konsantrasyonları belirlenmiş ve bu kirleticilerin personel açısından sağlık risk değerlendirmesi yapılmıştır.

Toplam uçucu organik bileşik konsantrasyonları araç giriş ve çıkışının yoğun olduğu 08:00-16:00 saatleri arasında dış havada (bariyerlerin bulunduğu yani araçların duruş kalkış yaptığı ve güvenlik görevlilerini araç girişini kontrol ettiği noktada) iç ortamdan ve 16:00-08:00 saat aralığına göre yüksek ölçülmüştür.

BTEX bileşikleri araç trafiği kaynaklı en yaygın UOB'lerdir. Kampüs ana giriş kapılarında yapılan ölçümler literatürü desteklemiş, toluen, benzen ve ksilen bileşikleri en yüksek konsantrasyona sahip UOB'ler olmuştur. Ayrıca T/B oranı da 2 değerinden yüksek çıkarak araç egzozu kaynaklı kirlenmeyi göstermiştir. Ancak iç ortamda özellikle gece saatlerinde de oranın 2'den yüksek bulunması sigara dumanının da katkısı olduğunu göstermiştir.

Çalışma, kampüs ana giriş kapılarında görevli personelin iç ortamda bulunduğu gece ve gündüz saatlerinde kanser riski taşıdığını, iç ortamda sigara içmenin kanser riski değerini arttırdığını ortaya koymuştur. Kampüs giriş ve çıkışları sırasında arabaların durup kalkması yada yavaş bir hızla geçmeleri sırasında oluşan egzoz gazı emisyonları kanser riski yada toksik kronik risk açısından bir tehlike yaratmamıştır.

Teşekkür

Dokuz Eylül Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü Hava Kirliliği Laboratuvarı'na UOB analizlerinde, Hasan Altıok ve Ersan Günel'e örnekleyicilerin kurulumunda gösterdikleri destek için teşekkür ederiz.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

- [1] Council Directive 1999/13/EC of 11 March 1999 on the limitation of emissions of volatile organic compounds due to the use of organic solvents in certain activities and installations, 1999.
- [2] A. Guenther, T. Karl, P. Harley, C. Wiedinmyer, P. I. Palmer and C. Geron. Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature). Atmospheric Chemistry and Physics. 6, 3181–3210, 2006. https://doi.org/10.5194/acp-6-3181-2006.
- [3] J. Williams and R. Koppmann. Volatile Organic Compounds in the Atmosphere: An Overview, in: Volatile Organic Compounds in the Atmosphere. Blackwell Publishing Ltd., Oxford, UK, 2007.
- [4] H. Hellen, H. Hakola and T. Laurila. Determination of source contributions of NMHCs in Helsinki (60°N, 25°E) using chemical mass balance and the Unmix multivariate receptor models. Atmospheric Environment. 37, 1413–1424, 2003. http://dx.doi.org/ 10.1016/S1352-2310 (02)01049-X.
- [5] S. Demir, A. Saral, F. Ertürk, S. L., Kuzu, B. İ. Goncaloğlu and G. Demir. Effect of diurnal changes in VOC source strengths on performances of receptor models. Environmental Science and Pollution Research International. 19, 5, 1503-1514, 2011. http://dx.doi.org/ 10.1007/s11356-011-0636-8.
- [6] I. Schifter, M. Magdaleno, L. Díaz, B. Krüger, J. León, M. E. Palmerín, R. Casas, A. Melgarejo and E. López-Salinas. Contribution of the gasoline distribution cycle to volatile organic compound emissions in the metropolitan area of Mexico City. Journal of the Air & Waste Management Association. 52, 535–541, 2002. http://dx.doi.org/ 10.1080/10473289.2002.10470803.
- [7] V. A. Lanz, B. Buchmann, C. Hueglin, R. Locher, S. Reimann and J. Staehelin. Factor analytical modeling of C2–C7 hydrocarbon sources at an urban background site in Zurich (Switzerland): changes between 1993–1994 and 2005–2006. Atmospheric Chemistry and Physics. 8, 1, 907-955, 2008. http://dx.doi.org/10.5194/acpd-8-907-2008.
- [8] R.J. Yokelson, T.J. Christian, T. G. Karl and A. Guenther. The tropical forest and fire emissions experiment: laboratory fire measurements and

synthesis of campaign data. Atmospheric Chemistry and Physics. 8, 13, 3509–3527, 2008. https://doi.org/ 10.5194/ acp-8-3509-2008.

- [9] A. Latella, G. Stani, L. Cobelli, M. Duane, H. Junninen, C. Astorga and B. R. Larsen. Semicontinuous GC analysis and receptor modelling for source apportionment of ozone precursor hydrocarbons in Bresso, Milan, 2003. Journal of Chromatography. A. 15, 1071, 1-2, 29–39, 2005. https://doi.org/10.1016/j. chroma.2004.12.043.
- [10] C. H. Lai, K. S. Chen, Y. T. Ho, Y. P. Peng and Y. M. Chou. Receptor modeling of source contributions to atmospheric hydrocarbons in urban Kaohsiung, Taiwan. Atmospheric Environment. 39, 25, 4543– 4559, 2005. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005. 03.044.
- [11] H. Pekey, B. Pekey, D. Arslanbaş, Z. Bozkurt, G. Doğan and G. Tuncel. Source Identification of Volatile Organic Compounds and Particulate Matters in an Urban and Industrial Areas of Turkey. Ekoloji, 24, 94, 1-9, 2015. https://doi.org/10.5053/ekoloji.2015.941.
- [12] X. Cao, Z. Yao, X. Shen, Y. Ye and X. Jiang. On-road emission characteristics of VOCs from light-duty gasoline vehicles in Beijing, China. Atmospheric Environment, 124, 146–115, 2015. https://doi.org/10. 1016/j.atmosenv.2015.06.019.
- [13] Environmental Protection Agency. Integrated Risk Information System (IRIS). Integrated risk information for benzene (monograph on the internet). Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency,2014.
- [14] L. Zhang, J. Wang, X. Hu, J. Zhou, M. Zhao, J. Zhang, Y. Bo, Y. Huang and Y. Zhang. VOCs and PM concentrations in underground parking garages of the commercial center and high-rise residential buildings. Air Quality Atmosphere & Health. 14, 1117–1131, 2021. https://doi.org/10.1007/s11869-021-01003-z.
- [15] S. Yurdakul, M. Civan and G., Tuncel. Volatile organic compounds in suburban Ankara atmosphere, Turkey: Sources and variability. Atmospheric Research, 120– 121, 298-311, 2013. https://doi.org/10.1016/j.atmosres .2012.09.015.
- [16] Z. Bozkurt, G. Doğan, D. Arslanbaş, B. Pekey, H. Pekey, Y. Dumanoğlu, A. Bayram and G. Tuncel. Determination of the personal, indoor and outdoor exposure levels of inorganic gaseous pollutants in different microenvironments in an industrial city. Environmental Monitoring and Assessement. 187, 9, 590, 2015. https://doi.org/10.1007/s10661-015-4816-8.
- [17] M. A. Zahed, S. Salehi, M. A. Khoei, P. Esmaeili, L. Mohajeri. Risk assessment of Benzene, Toluene, Ethyl benzene, and Xylene (BTEX) in the atmospheric air around the world: A review. Toxicol In Vitro. 12, 98, 105825, 2024. https://doi.org/10.1016/j.tiv.2024.1058 25.
- [18] National Ambient Air Quality Standards (40 CFR part 50), NAAQS Table, Environmental Protection Agency, 1990.
- [19] N. Shinohara, Y. Okazaki, A. Mizukoshi and S. Wakamatsu. Exposure to benzene, toluene,

ethylbenzene, xylene, formaldehyde, and acetaldehyde in and around gas stations in Japan. Chemosphere. 222, 923–931, 2019. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere. 2019.01.166.

- [20] W. Loonsamrong, N. Taneepanichskul, S. Puangthongthub and T. Tungsaringkarn. Health risk assessment and BTEX exposure among car park workers at a parking structure in Bangkok, Thailand, Journal of Health Research. 29, 4, 285-92, 2015. https://doi.org/10.14456/jhr.2015.12.
- [21] A. Müezzinoğlu, M. Odabaşı and L. Onat. Volatile organic compounds in the air of Izmir, Turkey. Atmospheric Environment, 35, 753–760, 2001. https:// doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00420-9.
- [22] T. Elbir, B. Cetin, E. Cetin, A. Bayram and M. Odabası. Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) and Their Sources in the Air of Izmir, Turkey. Environmental Monitoring and Assessment. 133, 149– 160, 2007. https://doi.org/10.1007/s10661-006-9568-z.
- [23] ASTM D3686-20, Standard Practice for Sampling Atmospheres to Collect Organic Compound Vapors (Activated Charcoal Tube Adsorption Method), 2020.
- [24] DC EPA/600/Z-92/001, Guidelines for Exposure Assessment. U.S. Environmental Protection Agency, Risk Assessment Forum, Washington, 1992.
- [25] Exposure Factors Handbook: 2011, United States Environmental Protection Agency (EPA), Edition, 600,US, 2011.
- [26] IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans List of Classifications vols. 1 123,2019.
- [27] California OEHHA Lists New Chemicals in Proposition 65 Chemical List, 2019.
- [28] CEP, U.S. EPA'S Cumulative Exposure Project, 1990.
- [29] R. Kerbachi, M. Boughedaoui, L. Bounoua and M. Keddam. Ambient air pollution by aromatic hydrocarbons in Algiers. Atmospheric Environment. 40, 21, 3995-4003, 2006. https://doi.org/10.1016/j.atm osenv.2006.02.033.
- [30] A. P. Soldatos, E. B. Bakeas and P. A. Siskos. Occupational Exposure to BTEX of Workers in Car Parkings and Gasoline Service Stations in Athens, Greece. Fresenius Environmental Bulletin, 12, 9,1064-1070, 2003.
- [31] W.P.L. Carter. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds. Journal of Air Waste Management Association. 44, 881–899, 1994. https:// doi.org/10.1080/1073161X.1994.10467290.
- [32] M. A. Parra, L. Gonzalez, D. Elustondo, J. Garrigo, R. Bermejo and J. M. Santamaria. Spatial and temporal trends of volatile organic compounds (VOC) in a rural area of northern Spain. Science of the Total Environment. 370, 157–167, 2006. https://doi.org/10. 1016/j.scitotenv.2006.06.022.
- [33] I. L. Gee and C. J. Sollars. Ambient air levels of volatile organic compounds in Latin American and Asian cities. Chemosphere, 36, 11, 2497–2506, 1998. https://doi. org/10.1016/S0045-6535(97)10217-X.

- [34] K. Na, K. C. Moon and Y. P. Kim. Source contribution to aromatic VOC concentration and ozone formation potential in the atmosphere of Seoul. Atmospheric Environment, 39,30, 5517–5524, 2005. https://doi.org /10.1016/j.atmosenv.2005.06.005.
- [35] M. T. Latif, H. H. Abd Hamid, F. Ahamad, M. F. Khan, M. S. M. Nadzir, M. Othman, M. Sahani, M. I. A. Wahab, N. Mohamad and R. Uning. BTEX compositions and its potential health impacts in Malaysia. Chemosphere, 237, 124451, 2019. https:// doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124451.
- [36] F. Soleimani, S. Dobaradaran, G. E. De-la-Torre, T. C. Schmidt, and R. Saeedi. Content of toxic components of cigarette, cigarette smoke vs cigarette butts: A comprehensive systematic review. The Science of the Total Environment, 20, 813, 152667, 2022. https://doi. org/10.1016/j.scitotenv.2021.152667.
- [37] N. Taneepanichsku, W. Loonsamrong, T. Tungsaringkarn, B. Gelaye and M. A. Williams. Occupational exposure to BTEX compounds among enclosed multi-storey car park workers in central Bangkok area. Indoor and Built Environment, 27, 5, 622-629, 2018. https://doi.org/10.1177/1420326X166 89408.
- [38] K. Na, Y. P. Kim, I. Moon and K. C. Moon. Chemical composition of VOC major emission sources in the Seoul atmosphere. Chemosphere. 55, 585–594, 2024. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.01.010.
- [39] Directive 2000/69/EC of the European Parliament and of the Council of 16 November 2000 relating to limit values for benzene and carbon monoxide in ambient air, Official Journal of the ECL, 313, 12–21, 2000.
- [40] B. Barletta, S. Meinardi, I J. Simpson, S. Zou, F. Sherwood Rowland and D. R. Blake. Ambient mixing ratios of nonmethane hydrocarbons (NMHCs) in two major urban centers of the Pearl River Delta (PRD) region: Guangzhou and Dongguan. Atmospheric Environment. 42, 4393-4408, 2008. https://doi.org/10. 1016/j.atmosenv.2008.01.028.
- [41] J. Zhu, R. Newhook, L. Marro and C. C. Chan. Selected volatile organic compounds in residential air in the city of Ottawa, Canada. Environmental Science and Technology. 39, 3964–3971, 2005. https://doi.org/10. 1021/es050173u.
- [42] A. N. Baghani, R. Rostami, H. Arfaeinia, S. Hazrati, M. Fazlzadeh and M. Delikhoon. BTEX in indoor air of beauty salons: risk assessment, levels and factors influencing their concentrations. Ecotoxicology and Environmental Safety. 159, 102–108, 2018. https://doi. org/10.1016/j.ecoenv.2018.04.044.
- [43] S. Chaiklieng, P. Suggaravetsiri and H. Autrup. Risk assessment on benzene exposure among gasoline station workers. International Journal of Environmental Research and Public Health. 16, 14, 2545, 2019. https://doi.org/10.3390/ijerph16142545.





NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 563-579 Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araștırma makalesi / Research article

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



Betonarme binalarda sismik izolatör ve viskoz sönümleyici kullanılmasının deprem davranışına etkisinin nümerik olarak incelenmesi

Numerical investigation of the effect of using seismic isolators and viscous dampers on earthquake behavior in reinforced concrete buildings

Burak Çakıl¹, Ömer Faruk Osmanlı^{2,*}, Muhammet Karaton³

^{1,2,3} Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 23119 Elazığ Türkiye

Öz

Depreme dayanıklı bina tasarımı, yapısal hasarı ve can kaybını azaltmayı amaçlayan inşaat mühendisliğinin kritik bir alanıdır. Pasif kontrol sistemleri can kaybını ve yapısal hasarları önemli ölçüde azaltmaktadır. Ancak bu sistemlerin birlikte kullanımı üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışmada, betonarme binalarda kullanılan yapısal kontrol sistemleri incelenmiş ve farklı sistemlerin birlikte kullanılmasının deprem tepkileri üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. 10 katlı bir betonarme bina icin ankastre mesnetli, ankastre mesnet + viskoz sönümleyicili, sismik izolatörlü ve sismik izolatörlü + viskoz sönümleyicili sistemler modellenmistir. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne uygun olarak SAP2000 programında gerçekleştirilmiştir. Bulgular, sismik izolatörlerin ve viskoz sönümleyicilerin birlikte kullanımının kat deplasmanlarını önemli ölçüde azalttığını ortaya koymaktadır. Göreli kat deplasmanları dikkate alındığında, viskoz sönümleyicilerin ve sismik izolatörlerin birlikte kullanıldığı yapılarda, sadece viskoz sönümleyicili yapılara göre %30'dan fazla azalma gözlemlenmiştir. Sismik izolatör sisteminin kullanıldığı yapı sistemleri, kat ivme değerleri açısından viskoz sönümleyici kullanılan yapı sistemlerine kıyasla daha fazla azalma sağlamaktadır. Ayrıca, bu sistemlerin dikkate alınan tüm parametreler üzerinde tekil olarak da etkili olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Betonarme binalar, Pasif kontrol sistemleri, Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör, Viskoz sönümleyici

1 Giriş

Türkiye'nin aktif bir deprem kuşağında yer alması, yapı mühendisliğinde deprem güvenliğini daima öncelikli bir mesele haline getirmiştir. Ülkede geçmişte yaşanan büyük depremler, binaların depremlere karşı dayanıklılığını sağlama gereksinimini yeniden gündeme getirmiştir [1,2]. Depremin yarattığı can ve mal kayıplarını minimuma indirmek amacıyla, yapıların sismik performansını iyileştiren yeni mühendislik yaklaşımlarına duyulan ihtiyaç giderek büyümektedir. Bu bağlamda, yapısal kontrol sistemleri, deprem etkilerini azaltmak ve binaların güvenliğini artırmak için son yıllarda yaygın olarak

Abstract

Seismic-resistant building design is a critical aspect of civil engineering aimed at minimizing structural damage and loss of life. Passive control systems significantly reduce loss of life and structural damage. However, studies on the combined use of these systems are limited. In this study, structural control systems used in reinforced concrete buildings were examined and the effects of using combined different systems on earthquake responses were compared. A 10-story reinforced concrete building was modeled with fixed support, fixed support + viscous dampers, seismic isolation, and seismic isolation + viscous dampers. Nonlinear time-history analyses were conducted using the Turkish Seismic Code and SAP2000 software. The results demonstrate that combining seismic isolators and viscous dampers significantly reduces both story displacements and inter-story drifts. Considering the relative floor displacements, a decrease of more than 30% was observed in structures where viscous dampers and seismic isolators were combined, compared to structures with only viscous dampers. Structures utilizing seismic isolation systems demonstrate a significant reduction in floor acceleration values compared to structures employing viscous dampers. Furthermore, it has been observed that these systems have a significant individual impact on all considered parameters.

Keywords: Reinforced concrete structures, Passive control systems, Lead rubber bearing, Viscous damper

kullanılan yenilikçi çözümler sunmaktadır. Yapısal kontrol sistemleri, deprem sırasında binaların maruz kaldığı kuvvetleri kontrol etmek veya bu kuvvetlerin yapısal elemanlar üzerindeki etkilerini azaltmak amacıyla kullanılan teknolojilerdir. Temelde pasif, aktif, yarı aktif ve hibrit sistemler olarak sınıflandırılan bu sistemlerin her biri farklı koşullarda etkili olmaktadır. Pasif kontrol sistemleri, bir enerji harcamadan veya dışarıdan bir müdahale olmadan yapının deprem gibi dış kuvvetlere karşı titreşimlerini azaltarak çalışır. Pasif kontrol sistemleri arasında en yaygın kullanılan yöntemlerden biri viskoz sönümleyicilerdir [3]. Viskoz sönümleyiciler, yapının hareketi sırasında ortaya

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ofosmanli@firat.edu.tr. (Ö. F. Osmanlı) Geliş / Received: 07.12.2024 Kabul / Accepted: 18.02.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngmuh.1597724

çıkan enerjiyi sönümleyerek yapının hasar görmesini engeller. Ayrıca, sismik izolasyon sistemleri de pasif kontrol yöntemleri arasında dikkat çekmektedir. Bu sistemler, binayı temelden ayırarak depremin neden olduğu yatay hareketleri binaya daha az ileterek yapının görece daha az etkilenmesini sağlar [4,5]. Depremler sırasında, özellikle yüksek katlı binaların güvenliği ve stabilitesi, sadece yapının malzeme özelliklerine bağlı değildir; avnı zamanda yapı sisteminin tasarımı ve kullanılan mühendislik çözümleri de büyük bir öneme sahiptir. Bu noktada pasif kontrol sistemleri, hem maliyet etkinliği hem de uygulama kolaylığı ile öne çıkmaktadır. Viskoz sönümleyiciler ve sismik izolasyon sistemlerinin bir arada kullanılması, yapıların titreşim performansını önemli ölçüde artırarak, deprem güvenliği açısından büyük bir avantaj sağlar [6]. Bu tür sistemler, özellikle deprem kuşağında yer alan Türkiye gibi ülkelerdeki yapı projelerinde yaygın olarak kullanılmalıdır. Viskoz sönümleyicilerin binaların titreşimlerini azaltmadaki başarısı, mekanik prensipler ve yapısal analizlerle desteklenmiştir. Constantinou ve Symans [7] enerji sönümleyicilerin yapısal performansı artırmadaki rolünü detaylı bir şekilde ele almış, sönümleyicilerin yapıların göreli kat ötelemelerini, katlardaki ivmeleri ve plastik kesit azaltarak dayanıklılığı dönmelerini artırabileceğini belirtmiştir. Özellikle viskoz sönümleyicilerin deprem anındaki enerji sönümleme kapasitesinin yüksek olduğu vurgulanmış ve bu sistemlerin, yapıların dinamik davranışlarını naşıl olumlu etkilediği üzerinde durulmuştur. Germen [8] pasif kontrol sistemlerinin dinamik yükler altındaki etkinliğini incelemistir. Bu calısmada, özellikle yüksek katlı binalar gibi büyük yapılarda pasif kontrol sistemlerinin maliyet etkinliği ve uzun vadeli performansı vurgulanmıştır. Çeşitli uluslararası uygulamalardan elde edilen veriler ışığında, pasif kontrol sistemlerinin kullanıldığı projelerde daha düşük bakım maliyetleri ve artan yapısal güvenlik sağlandığı görülmüştür. Germen ayrıca, bu sistemlerin depremlerin yanı sıra rüzgar yükleri gibi diğer dinamik yükler karşısında da etkili olduğunu belirtmiştir. Işık [9] sürtünmeli izolatörler ile viskoz sönümleyicilerin bir arada kullanıldığı sistemlerin deprem yükleri altındaki davranışlarına odaklanmıştır. Bu çalışmada, sürtünme katsayısının değiştirilmesiyle yapıların farklı deprem koşulları altında nasıl tepki verdiği araştırılmıştır. İki farklı yapı modeli üzerinde yapılan analizlerle, sürtünmeli izolatörlerin ve viskoz sönümleyicilerin uyumlu bir şekilde kullanıldığında, yapıların enerji sönümleme kapasitesinin nasıl arttığı detaylandırılmıştır. Işık'ın bulguları, bu iki sistemin birlikte kullanımının yapısal güvenlik açısından önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir. Ras ve Boumechra [10] viskoz sönümleyici eklenen binaların performansını inceleyerek, bu tür sistemlerin yapısal güvenliği nasıl iyileştirdiğini göstermiştir. Çalışmalarında, sönümleyici kullanılan binalarda yer değiştirme oranlarının %62 oranında azaldığı, en çok gerilen elemanlarda ise moment ve kesme kuvvetlerinde %45'ten fazla azalma sağlandığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, sönümleyici kullanılan binaların daha az hasar görme eğiliminde olduğunu ve büyük deprem yükleri altında bile stabilitesini koruyabileceğini ortaya koymuştur. Özellikle çok katlı

binalarda bu tür sistemlerin sağladığı güvenlik avantajları çalışmada detaylı olarak analiz edilmiştir. Mohebbi vd. [11] doğrudan yer değiştirmeye dayalı bir tasarım yöntemi kullanarak, viskoz sönümleyicilerin üst yapıların dinamik performansını nasıl iyileştirdiğini analiz etmişlerdir. Öztürk [12] Türkiye'deki mevcut okul yapılarının viskoz sönümleyicilerle güclendirilmesi üzerine bir calısma gerceklestirmistir. Üc bloklu bir okul binası üzerinde vapılan analizlerde, viskoz sönümleyicilerin kullanıldığı modellerde burulma katsayılarının ve göreli kat ötelemelerinin azaldığı tespit edilmiştir. Özellikle düzensiz yapı planına sahip binalarda sönümleyici elemanların kullanılmasıyla, yapının daha dengeli bir şekilde yük taşıdığı ve sismik taleplerin etkin bir şekilde azaltıldığı gösterilmiştir. Ayrıca, bu çalışmada sönümleyici elemanların sürekli katlara yerleştirilmesi gerektiği belirtilmiş, bu yerleşimin özellikle burulma etkisi yüksek yapılarda daha etkili sonuçlar verdiği vurgulanmıştır.

Geleneksel yöntemlerle inşa edilen ankastre mesnetli binalara kıyasla sismik izolasyon sistemleri ve viskoz sönümleyici kullanılarak inşa edilen binaların sismik tepkileri önemli ölçüde azalmaktadır [13, 14]. Bu azalma, yerleştirme kullanılan yöntem, cihaz türü ve konfigürasyonlarına göre değişkenlik göstermektedir. Literatürdeki çalışmalarda genellikle ankastre mesnetli yapı ile pasif kontrol sistemlerinden herhangi birinin kullanılması durumu karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Pasif kontrol sistemlerinin beraber kullanılması üzerine yapılan çalışmalar oldukca sınırlıdır [6]. Bu calısmada, vapısal pasif kontrol sistemlerinden kursun cekirdekli kaucuk izolatör ve viskoz sönümleyicinin beraber kullanılması durumu farklı kombinasyonlarla karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu amaçla 10 katlı betonarme bir bina farklı mesnetlenme yöntemleri ile modellenmiş ve doğrusal olmayan sismik analizler gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, bina ankastre mesnetli olarak modellenmiştir. Daha sonra, aynı bina ankastre mesnetle birlikte viskoz sönümleyicili olarak modellenmiş ve analizleri yapılmıştır. Üçüncü modelde bina, sismik izolatörlü olarak tasarlanmıs; son olarak ise bina, sismik izolatörle birlikte viskoz sönümleyicili olarak modellenmiştir. Sismik izolatör türü olarak hem uygulamada hem de literatürdeki çalışmalarda yaygın olarak kullanılması sebebiyle kurşun çekirdekli kauçuk izolatör seçilmiştir. Viskoz sönümleyici olarak ise yine uygulamada yaygın olarak kullanılan bir firmanın sönümleyici tiplerinden biri seçilmiştir. Bu dört farklı yapı modelinin zaman tanım alanında doğrusal olmayan nümerik analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda, toplam deplasman, göreli kat deplasman ve katlarda meydana gelen ivme sonuçları karşılaştırılmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 Yapısal kontrol sistemleri

Yapısal kontrol sistemleri, deprem kuvvetleri karşısında yapıların sönümleme kapasitelerini artırmayı hedeflemektedir. Doğal afet durumlarında işlevini sürdürecek olan köprüler, hastaneler ve enerji santralleri gibi kritik yapıların tasarımında farklı bir yaklaşım gereksinimi ortaya çıkmıştır. "Yapı kontrol sistemi" adı verilen bu sistemler, binalarla birlikte hareket eden ve yapım aşamasında veya sonrasında yerleştirilen cihazlar aracılığıyla dinamik kuvvetlere karşı direnç gösterebilen bir mekanizmaya sahiptir. Bu cihazlar, deprem nedeniyle oluşan deplasman ve kesit zorlanmalarını belirli bir seviyede tutarak yapının daha güvenli hale gelmesini sağlar [15].

Yapısal kontrol sistemleri 4 temel gruba ayrılmaktır ve bu sınıflandırma Şekil 1' de gösterilmektedir.

- I. Pasif kontrol sistemler
- II. Aktif kontrol sistemler
- III. Karma kontrol sistemler
- IV. Yarı aktif kontrol sistemler

Çalışmada pasif kontrol sistemleri kullanılacağından diğer yapısal kontrol sistemlerine ayrıca değinilmemiştir.

2.2 Pasif kontrol sistemleri

Bu sistemler, yapıya eklenen özel elemanlar aracılığıyla sisteme giren enerjiyi ya 1s1ya dönüştürür ya da enerjiyi üzerine alarak sönümleme sağlar. Bu sistemlerin hesaplamaları basit olup, maliyetleri de aktif kontrol sistemlerine nazaran düşük seviyededir [16]. Pasif kontrol sistemlerinde dışarıdan bir kuvvet uygulanmadığı için bir güç kaynağına ihtiyaç duyulmaz. Ancak, bu sistemler aktif kontrol yöntemleri kadar etkili değildir. Yapılar, ömürleri boyunca karşılaşabilecekleri olası deprem büyüklükleri dikkate alınarak tasarlanır; ancak tasarlanan seviyeden daha büyük bir deprem meydana geldiğinde yapıda büyük deplasmanlar oluşabilir. Pasif kontrol sistemleri, sismik izolasyon sistemler ve pasif enerji sönümleyiciler olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Sismik izolasyon sistemleri ise genellikle temel ile yapı arasına yerleştirilerek, zeminden gelen kuvvetlerin yapıya aktarımını sınırlar. Pasif enerji sönümleyiciler ise sisteme eklenen araçlarla yapının enerji yutma kapasitesini artırır [9]. Bu çalışmada, kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler ve viskoz sönümleyiciler üzerinde durulacağı için diğer yapısal kontrol sistemlerine ayrıca yer verilmemiştir.

2.2.1 Kurşun çekirdekli kauçuk tipi izolatörler (LRB)

Kurşun çekirdekli kauçuk tip izolatörler (LRB), ilk olarak 1970'li yılların sonlarına doğru Yeni Zelanda'da tanıtılmış ve kullanılmaya başlanmıştır [18]. O zamandan itibaren bu izolatörler, Japonya ve ABD gibi ülkelerde sismik izolasyon amacıyla geniş çapta kullanılmıştır [19]. Şekil 2' de izolatörün kesit görünümü verilmiştir. Yapısal açıdan incelendiğinde, düşük sönüm sağlayan kauçuk mesnetlerin merkezine kurşun çekirdek eklenerek sönüm oranı artırılan elastomer esaslı bir sistem olduğu görülmektedir. Bu sistemin sönüm oranı %15 ile %35 arasında değişmektedir. Kurşun kauçuk mesnetlerin yatay kuvvet-deformasyon ilişkisi ise Şekil 3' de gösterildiği üzere iki aşamalı bir davranış sergilemektedir [20]. Şekil 3' de K_{eff} izolatörün etkin rijitliğini, K_d akma sonrası rijitliği,

 d_v akma yer değiştirmesini ve Q_d ise yerdeğiştirmenin

sıfır olduğu andaki kuvvet kesişim değerini göstermektedir ve kurşunun akma dayanımı ile kurşun çekirdeğin kesit alanı çarpımı yardımıyla elde edilmektedir.



Şekil 2. LRB tipi izolatörün kesit görünümü [21]



Şekil 1. Yapısal kontrol sistemleri [17]

LRB tipi izolatörlerde, kurşun elemanı elastomer mesnetin rijitliğini artırıcı bir etkide bulunur. Bu mesnetler, düşük yük seviyelerinde, hem yatay doğrultuda hem de dikey doğrultuda sert bir davranış sergilerler. Kurşun çekirdek, dışarıdan çelik levha katmanlarıyla sarılır ve kayma gerilmesi altında şekil değiştirerek enerji yutma kapasitesine sahiptir. Kurşunun akma dayanımı 10 MPa olup, bu değerin üzerine çıkıldığında mesnetin yatay rijitliği önemli ölçüde düşer. Kurşunun plastik şekil değiştirmesi ile ortaya çıkan sönüm, histeretik bir döngü ile modellenmektedir [22].



Şekil 3. LRB tipi izolatörün kuvvet-deplasman davranışı [23]



Şekil 4. LRB tipi izolatörün kuvvet yer değiştirme ilişkisi [24]

Kurşun çekirdek, mesnetin enerji yutma kapasitesini artırarak yatay yer değiştirmeyi sınırlar. LRB tipi izolatörler, kurşunun sönümleyici etkisi ile kauçuğun dengeleyici özelliklerini birleştirir. Bu kombinasyon, deprem sırasında mesnette biriken enerjiyi kullanarak, deprem sonrası yapıyı eski haline döndürebilecek bir kuvvet sağlar. Kompozit bir yapıya sahip olan kurşun çekirdekli kauçuk mesnet, kurşunun ve kauçuğun özelliklerini bir araya getiren bir davranış sergiler (Şekil 4). Ancak, kurşun çekirdekli izolatörün deformasyona uğradıktan sonra test edilemiyor olması, bu izolatör türünün en önemli dezavantajı olarak ifade edilmektedir [25].

Kauçuk izolatör kullanılarak inşa edilen yapıların lineer olmayan analizlerinde sismik izolatörler için kullanılan parametrelerin TBDY-2018'e göre hesabında ilk olarak izolatörün etkin rijitliği ($K_{e\!f\!f}$) aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır [26]:

$$K_{eff} = \frac{F}{D} \tag{1}$$

Burada F izolatöre etki eden yatay kuvveti, D ise bu kuvvet etkisi altında meydana gelen yatay yerdeğiştirmeyi göstermektedir. Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin akma dayanımı (F_y) ise yaklaşık olarak karakteristik dayanıma

 (F_0) eşit olup,

$$F_Q \cong F_y = A_p \tau_{yp} \tag{2}$$

denklemi yardımıyla hesaplanmaktadır. Bu denklemde A_p kurşun çekirdeğin alanını, τ_{yp} ise kurşun malzemenin kayma akma gerilmesini göstermektedir [26]. Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin başlangıç rijitliği (k_1), akma sonrası rijitlik (k_2) elde edildikten sonra hesaplanmaktadır ve başlangıç rijitliği, yaklaşık olarak akma sonrası rijitliğin 10 katı olarak belirlenmektedir [27, 28]. Akma sonrası rijitlik değeri Denklem 3 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$k_2 = G_v(A_r/T_r) \tag{3}$$

Bu denklemde G_v elastomer malzemenin kayma modülünü, A_r yüke maruz elastomer katmanlardan yalnızca birinin yüzey alanını, T_r ise toplam elastomer kalınlığını göstermektedir. Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin düşey rijitlik (k_v) hesabında ise Denklem 4 kullanılmaktadır.

$$k_{v} = \frac{E_{v}A_{r}}{T_{r}} \tag{4}$$

Burada E_v düşey rijitlik modülünü göstermektedir [26].

2.2.2 Viskoz sönümleyiciler

Viskoz sönümleyiciler genellikle bir piston ve içinde silikon ya da yağ bulunan bir silindirden oluşur. Piston, yağ içerisinde hareket ettiğinde deprem kuvvetlerine karşı sönümleme sağlanır. Bu cihazların yapıya entegre edilmesiyle kat ötelenmeleri %30 ile %70 arasında azaltılabilir. Şekil 5' te bu sistemin en kesiti gösterilmektedir [8].



Şekil 5. Viskoz sönümleyici sistemlerin en kesiti [8]



Şekil 6. Viskoz sönümleme duvarının çalışma mekanizması [8]

Ayrıca, "viskoz sönümleme duvarı" adı verilen bir tasarım da bulunmaktadır. Bu sistemde, çelik bir plak, içerisinde viskoz sıvı olan dikdörtgen bir çelik konteynerin içinde hareket eder. Bu çelik plak üstteki döşemeye, konteyner ise alt döşemeye sabitlenir. Bu düzenleme Şekil 6' da gösterilmiştir [29].

Viskoz sönümleyicilerde ortamın sıcaklığı yükseldikçe enerji sönümleme kapasitesi azalır. Viskoz sıvının viskozitesi arttıkça, sönümlenen enerji miktarı da artar. Viskoz sönümün dinamik reaksiyon üzerindeki tesiri Şekil 7' de gösterilmiştir [8].

Viskoz sönümleyiciler göreli hız farkına dayanarak bir kuvvetle tepki verirler. Bu cihazlarda sıklıkla akışkanlar, araç amortisörlerindeki gibi kullanılır. Uygulanan kuvvetin hızı düşük olduğunda çok az direnç gösterirler, ancak hız arttıkça direnç de artar. Viskoz sönümleyiciler, Denklem 5' de verilen bağıntıyla tanımlanabilir [30].

$$F_{\rm D} = CV^{\alpha} \tag{5}$$

Bu denklemde F_D sönüm kuvveti, V akışkanın rölatif hızı, C sönüm katsayısı ve α ise hız üstel karakter olarak adlandırılmaktadır. Uygulamada, α sabitinin 0.3-1 aralığında alınabileceği belirtilmiştir. α katsayısı 1 olarak ayarlandığında sönümleyici doğrusal, daha düşük değerlerde ise doğrusal olmayan olarak sınıflandırılır. Aynı sönüm sabitindeki hız bağımlı sönümleyicilerde, α katsayısı düştükçe sönümlenen enerji miktarı da azalır. Şekil 8' de, eşit enerji sönümleme kapasitesine sahip sönümleyicilerde, C ve α parametrelerinin değişimi gösterilmektedir [31].



Şekil 7. Viskoz sönümün dinamik reaksiyon üzerindeki tesiri [8]



Şekil 8. C ve α parametrelerinin eşit enerji sönümleme kapasitesine sahip sönümleyicilerde değişimi [31]

Denklem 5 yardımıyla tanımlanan viskoz sönümleyiciler titreşim frekansının 4 Hz den düşük olduğu sistemler için kullanılmaktadır ve saf (pure) viskoz sönüm modeli olarak adlandırılmaktadır [32]. Bu model Şekil 9' da verilmiştir. Daha yüksek frekans değerlerine sahip sistemler için ise Maxwell modeli kullanılmaktadır. Bu model ise yüksek frekans değerinden kaynaklanan rijitliği temsil eden yay modeli ile temsil edilmektedir ve Şekil 10' da gösterilmiştir. Maxwell modelinde ise sönüm kuvveti F_D Denklem 6 yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$F_D = \lambda \frac{dF_D(t)}{dt} = C_0 \frac{du_d(t)}{dt}$$
⁽⁶⁾

Bu denklemde, $dF_D(t)$ kuvvetin zamana göre değişimini $du_d(t)$ eksenel rölatif hızı, λ viskoz sönümleyicideki geri bırakma (gevşeme) zamanını göstermektedir. C_0 ise frekansın sıfır olduğu andaki sönüm katsayısını ifade etmektedir [32].



Sekil 9. Saf (pure) viskoz modeli [32]



Şekil 10. Maxwell modeli [32]

Viskoz sönümleyicilerin en önemli avantajlarından biri, düşük hızlarda çok az direnç göstererek yapılarda rijitlik artışına neden olmamalarıdır. Doğrusal sönümleyicilerde, atalet kuvvetlerinin maksimum olduğu an ile sönümleyicinin tepki kuvvetlerinin maksimum olduğu an farklıdır. Bu faz farkı Şekil 11' de gösterilmektedir [33].
Doğrusal sönümleyicilerde maksimum sönümleyici kuvvetleri ve maksimum atalet kuvvetleri ters fazlı olurken, lineer olmayan sönümleyicilerde ve hızın yüksek olduğu durumlarda, bu iki kuvvetin maksimum noktaları faz olarak birbirine yaklaşır. Bu da sönümleyici kuvvetler ile yapı atalet kuvvetleri arasındaki etkileşimi artırır. Bu ilişki Şekil 12' de gösterilmektedir [31].



Şekil 11. Deplasman ve hız fazları [31]



Şekil 12. Yapı ve sönümlenen enerji ile sönümleyici arasındaki etkileşimin değişimi [31]

2.3 Yapıların modellenmesi

Bu çalışma kapsamında, aynı kat planına sahip toplam dört tip yapı, TBDY-2018 [26] esas alınarak modellenmiştir. Binaların her biri 10 katlı, konut tipi betonarme yapılardır ve kat yüksekliği 3 m, toplam yapı yüksekliği ise 30 m olarak belirlenmiştir. Kat oturum alanı 324 m² olan bu yapılar, ankastre mesnetli, ankastre mesnet + viskoz sönümleyicili, sismik izolatörlü ve sismik izolatörlü + viskoz sönümleyicili olarak dört farklı şekilde oluşturulmuştur. Yapıların taşıyıcı sistemi, 65 cm x 65 cm kesitinde kolonlar ve 40 cm x 70 cm kesitinde kirişlerle tasarlanmış, döşeme kalınlığı ise 15 cm olarak belirlenmiştir. Kullanılan beton C30/37 sınıfında olup elastisite modülü $E_c=32000$ MPa, donatı çeliği ise S420 sınıfında olup elastisite modülü $E_s=210000$ MPa'dır. Kat kalıp planı Şekil 13' te verilmiştir.

Modelleme ve analizlerde SAP2000 sonlu elemanlar programı [34] kullanılmış, yapı elemanları çubuk sonlu eleman modeli ile idealize edilmiştir. Zemin sınıfı ZD, bina önem katsayısı I=1, ve hareketli yük katılım katsayısı n=0.3 olarak dikkate alınmıştır. Yapı üzerindeki ölü yük 2 kN/m² ve hareketli yük 2 kN/m² olarak tanımlanmıştır. Dinamik analizler, TBDY-2018'de belirtilen zaman tanım alanında analiz yöntemiyle gerçekleştirilmiş, deprem ivme kayıtları bu yönetmelik doğrultusunda seçilmiş ve elastik tasarım spektrumuna uygun olarak ölçeklendirilmiştir.

Analiz sonuçlarında, yapıların toplam kat deplasmanları, göreli kat deplasmanları ve katlarda meydana gelen ivme değerleri değerlendirilmiştir. Ayrıca, sismik izolatörler için literatürde ve uvgulamada sıklıkla kullanılan kurşun çekirdekli kauçuk izolatör seçilmiştir. Viskoz sönümleyiciler için ise uygulamada yaygın olarak kullanılan viskoz sönümleyici belirlenmiş ve bu sönümleyicinin üretildiği firmanın paylaşmış olduğu parametreler dikkate alınmıştır. izolatör parametreleri TBDY-2018'e göre Sismik hesaplanmış, viskoz sönümleyiciler için ise uygulamada yaygın olarak kullanılan firmaya ait veri föyünden alınan optimum tasarım parametreleri tercih edilmiştir. [26, 35]. Bu kapsamda, farklı yapı tiplerinin deprem performansı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.



Şekil 13. Modellenecek yapının kalıp planı (cm)



Şekil 14. Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 elastik tasarım spektrum eğrisi

Elazığ ili Sivrice ilçesi 38.483225° enlem, 39.311038° boylam konumunda tasarlanacak yapının analizinde kullanılacak olan elastik tasarım spektrumları AFAD Sismik Tehlike Haritası veri tabanından alınmıştır [36]. Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2) için AFAD Sismik Tehlike Haritasından faydalanılarak elde edilen S_{DS} =1.462 ve S_{D1} =0.742 değerleri belirlenmiştir. DD-2 düzeyi elastik tasarım spektrumu Şekil 14' te gösterilmiştir. 10 katlı konut yapısı tasarlanırken yapının taşıyıcı sistemi süneklik düzeyi yüksek çerçeveli sistem, döşeme sistemi ise plak döşeme olarak modellenmiştir. Yapı analizinde analiz programı olarak SAP2000 programı kullanılmıştır. Yönetmeliğimizde belirtildiği gibi, 11 adet deprem kaydı kullanılarak SeismoMatch' de bu depremlerin ivme kayıtları Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2' ye göre ölçeklendirilmiştir [37]. Ölçeklendirilen depremlerin ivme-zaman grafikleri Şekil 15 ile Şekil 25 arasında sunulmuştur. DD-2 düzeyinde oluşan davranış spektrum eğrisi ise Şekil 26' da belirtilmiştir.



Şekil 15. Chi Chi depremi ivme-zaman grafiği



Şekil 16. Elazığ depremi ivme-zaman grafiği



Şekil 17. Friuli depremi ivme-zaman grafiği



Şekil 18. Hollister depremi ivme-zaman grafiği



Şekil 19. Imperial Valley depremi ivme-zaman grafiği



Şekil 20. Kobe depremi ivme-zaman grafiği



Şekil 21. Kocaeli depremi ivme-zaman grafiği



Şekil 22. Landers depremi ivme-zaman grafiği



Şekil 23. Loma Prieta depremi ivme-zaman grafiği



Şekil 24. Northridge depremi ivme-zaman grafiği



Şekil 25. Trinidad depremi ivme-zaman grafiği



Şekil 26. DD-2 düzeyi davranış spektrum eğrisi

ivme-zaman Depremlerin grafikleri yeniden oluşturulmuş ve TBDY-2018' de belirtildiği gibi SAP2000 sonlu elemanlar programında yapılara zaman tanım alanında uygulanarak doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapıların mimarisinde, kolon yerleri ve kesitleri değiştirilmemiştir. Dört yapının da mimari özellikleri aynıdır. Yapının bulunduğu bölgedeki zemin sınıfı, literatürdeki yapılan araştırmalar referans alınarak ZD olarak kabul edilmiştir [38, 39]. Ölü ve hareketli yükler, yapının tasarımı açısından kolaylık sağlaması amacıyla üniform olarak uygulanmıştır. Her dört yapıda da duvar yükü kullanılmamıştır.

2.3.1 Ankastre mesnetli yapının modellenmesi

Bölüm 2.3' de verilen parametrelere göre modellenen ankastre mesnetli yapının sonlu elemanlar modeli Şekil 27' de verilmiştir.



Şekil 27. Ankastre mesnetli yapının sonlu elemanlar modeli

Tablo 1' de, kütle katılım oranlarına bağlı olarak değişen periyotlar, mod numaralarıyla beraber tablo şeklinde sunulmuştur. Kütle katılım oranlarına bakıldığında 1. modun yapısal harekete katkısının x yönünde %79, ikinci modun katkısının y yönünde %80 mertebesinde olduğu görülmektedir. Yapının zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizi gerçekleştirilirken, kütle katılım oranı yüksek olan birinci ve ikinci modların periyot değerlerine göre %5 oranında sönüm uygulanmıştır.

Tablo 1. Ankastre mesnetli yapının modal kütle katılım oranları

Mod	Periyot(s)	x doğrultusu	y doğrultusu	z doğrultusu
1	1.140929	0.79119	0	0
2	0.98726	0	0.79781	0
3	0.944682	0	0	8.316E-20
4	0.360498	0.10186	1.859E-18	2.037E-17

2.3.2 Sismik izolatörlü yapının modellenmesi

Bölüm 2.3' de verilen parametrelere göre tasarlanan kurşun çekirdekli sismik izolatörlü yapının sonlu elemanlar modeli Şekil 28' de verilmiştir. İzolatörde kullanılacak parametrelerin hesabı için TBDY-2018 dikkate alınmıştır. İzolatöre ait parametreler Tablo 2' de verilmiştir. İzolatörler zemin katta her kolonun orta kısmına konulmuştur. Toplamda 20 adet sismik izolatör kullanılmıştır.

 Tablo 2. Sismik izolatör için hesaplanan parametreler [26]

Yalıtım Birimi Özellikleri								
Parametre Birim DD-2 DD-1								
Düşey rijitlik(K _{V)}	kN/mm	911.544	911.544					
Efektif rijitlik(Keff)	kN/mm	3.105	1.11					
Akma dayanımı(F _{Q)}	kN	166.93	61.802					
Akma sonrası rijitlik(K2)	kN/mm	2.494	1.042					
Akma öncesi rijitlik(K ₁₎	kN/mm	24.939	10.418					
Akma deplasman1(D _{v)}	mm	7.437	6.592					



Şekil 28. Sismik izolatörlü yapının sonlu elemanlar modeli

Tablo 3' te, kütle katılım oranlarına göre değişen doğal titreşim periyotları, mod numaralarıyla birlikte gösterilmiştir. Kütle katılım oranları göz önüne alındığında, birinci modun yapısal harekete x yönünde %97, ikinci modun ise y yönünde %98 oranında katkıda bulunduğu görülmektedir. Yapının zaman tanım alanı analizinde, kütle katılım oranı en yüksek olan birinci ve ikinci modların periyot değerlerine %5 oranında sönüm uygulanmıştır.

Tablo 3. Sismik izolatörlü yapının modal kütle katılım oranları

Mod	Periyot(s)	x doğrultusu	y doğrultusu	z doğrultusu
1	1.937196	0.97092	0	0
2	1.846301	0	0.97961	0
3	1.707141	0	0	0
4	0.525264	0.02266	0	2.167E-18

2.3.3 Ankastre + viskoz sönümleyicili yapının modellenmesi

Bölüm 2.3' de verilen parametrelere göre tasarlanan ankastre mesnetli yapının sonlu elemanlar modeli Şekil 29' da verilmiştir. Viskoz sönümleyici için gereken parametreler, uygulamada en sık kullanılan sönümleyici parametrelerinden hazır olarak alınmıştır. Viskoz sönümleyicilere ait parametreler Tablo 4' te verilmiştir. Viskoz sönümleyiciler simetrik olacak şekilde, x doğrultusundaki orta açıklığa 1 adet, y yönündeki 2 orta açıklığının her birine ise 1' er adet koyulmuştur. Toplamda 60 adet viskoz sönümleyici kullanılmıştır.

Tablo 4. Viskoz sönümleyici için kullanılan parametreler[35]

Rijitlik(kN/m)	Sönüm katsayısı(kNs/m)	Sönüm üstel sabiti(α)
313200	3132	0.4
010200	0102	011



Şekil 29. Ankastre + viskoz sönümleyicili yapının sonlu elemanlar modeli

Tablo 5' te, kütle katılım oranlarına göre değişen doğal titreşim periyotları, mod numaralarıyla birlikte gösterilmiştir. İncelemeler sonucunda, birinci modun yapısal harekete x yönünde %79, ikinci modun ise y yönünde %80 oranında katkı sağladığı tespit edilmiştir. Yapının zaman tanım alanında yapılan analizde, kütle katılım oranı en yüksek olan birinci ve ikinci modların periyot değerlerine %5 oranında sönüm uygulanmıştır.

Tablo 5. Ankastre + viskoz sönümleyicili yapının modalkütle katılım oranları

Mod	Periyot(s)	x doğrultusu	y doğrultusu	z doğrultusu
1	1.140929	0.79119	0	0
2	0.98726	0	0.79781	0
3	0.944682	0	0	8.316E-20
4	0.360498	0.10186	1.859E-18	2.037E-17

2.3.4 Sismik izolasyonlu + viskoz sönümleyicili yapının modellenmesi

Bölüm 2.3' de belirtilen özelliklere göre tasarlanan kurşun çekirdekli sismik izolatörlü + viskoz sönümleyicili yapının sonlu elemanlar modeli Şekil 30' da verilmiştir. İzolatörde kullanılacak parametreler sismik izolatörlü yapının modelinde kullanılan sismik izolatörün aynısıdır. Seçilen viskoz sönümleyici' de ankastre + viskoz sönümleyicili yapının modellenmesinde kullanılan viskoz sönümleyici ile aynıdır. Viskoz sönümleyiciler simetrik olacak şekilde, x doğrultusundaki orta açıklığa 1 adet, y yönündeki 2 orta açıklığın ise her birine 1' er adet koyulmuştur. Her kata aynı şekilde yerleştirilmiştir. Toplamda 60 adet viskoz sönümleyici kullanılmıştır.

Tablo 6' da, kütle katılım oranlarına bağlı olarak değişen periyotlar, mod numaralarıyla birlikte tablo şeklinde sunulmuştur. Yapılan incelemeler sonucunda, birinci modun yapısal harekete x yönünde %97, ikinci modun ise y yönünde %98 düzeyinde katkı sağladığı tespit edilmiştir. Yapının zaman tanım alanındaki analiz sırasında, kütle katılım oranı en yüksek olan birinci ve ikinci modların periyot değerlerine %5 oranında sönüm uygulanmıştır.



Şekil 30. Sismik izolatörlü + Viskoz sönümleyicili yapının sonlu elemanlar modeli

Tablo 6. Sismik izolatörlü + Viskoz sönümleyicili yapının modal kütle katılım oranları

Mod	Periyot(s)	x doğrultusu	y doğrultusu	z doğrultusu
1	1.937196	0.97092	0	0
2	1.846301	0	0.97961	0
3	1.707141	0	0	0
4	0.525264	0.02266	0	2.167E-18

3 Bulgular ve tartışma

Yapılara, TBDY-2018' de belirtildiği gibi 11 adet deprem kaydı x ve y yönlerinde etki ettirilerek analizleri gerçekleştirilmiştir.

Kat seviyesi-deplasman sonuçlarının karşılaştırılması;

Analizlerin sonucunda, kat seviyelerine göre elde edilen deplasman değerleri her depremin x-y doğrultuları için ayrı ayrı olmak suretiyle Şekil 31 - Şekil 52' de görülmektedir. Ayrıca 11 depremin kat seviyelerine göre ortalama deplasman değerleri hem x hem de y doğrultuları için sırasıyla Şekil 53 ve Şekil 54' te sırasıyla gösterilmektedir.



Şekil 31. Chi Chi depremi x doğrultusu kat-deplasman grafiği



Şekil 32. Chi Chi depremi y doğrultusu kat- deplasman grafiği



Şekil 33. Elazığ depremi x doğrultusu kat- deplasman grafiği

Elazığ Depremi Kat-Deplasman(y)



Şekil 34. Elazığ depremi y doğrultusu kat- deplasman grafiği

Friuli Depremi Kat-Deplasman(x)



Şekil 35. Friuli depremi x doğrultusu kat- deplasman grafiği



Şekil 36. Friuli depremi y doğrultusu kat- deplasman grafiği



Şekil 37. Hollister depremi x doğrultusu kat- deplasman grafiği



Şekil 38. Hollister depremi y doğrultusu kat- deplasman grafiği



Şekil 39. Imperial Valley depremi x doğrultusu katdeplasman grafiği



Şekil 40. Imperial Valley depremi y doğrultusu katdeplasman grafiği



Şekil 41. Kobe depremi x doğrultusu kat- deplasman grafiği

Kobe Depremi Kat-Deplasman(y)



Şekil 42. Kobe depremi y doğrultusu kat- deplasman grafiği

Kocaeli Depremi Kat-Deplasman(x) 10 9 8 7 Ankastre Kat Seviyesi 6 5 Sismik İzolatörlü 4 Ankastre + Viskoz Sönümleyici 3 2 Sismik İzolatör + Viskoz Sönümleyici 1 0 200 300 400 0 100

Şekil 43. Kocaeli depremi x doğrultusu kat- deplasman grafiği

Deplasman (mm)



Şekil 44. Kocaeli depremi y doğrultusu kat- deplasman grafiği



Şekil 45. Landers depremi x doğrultusu kat- deplasman grafiği



Şekil 46. Landers depremi y doğrultusu kat- deplasman grafiği



Şekil 47. Loma Prieta depremi x doğrultusu katdeplasman grafiği



Şekil 48. Loma Prieta depremi y doğrultusu katdeplasman grafiği





Northridge Depremi Kat-Deplasman(y)





Loma Prieta Depremi Kat-Deplasman(x)

Trinidad Depremi Kat-Deplasman(x) 10 9 8 Ankastre 7 Kat Seviyesi 6 5 Sismik İzolatörlü 4 Ankastre + Viskoz 3 Sönümleyici 2 Sismik İzolatör + 1 Viskoz Sönümleyici 0 0 100 200 300 400 Deplasman (mm)

Şekil 51. Trinidad depremi x doğrultusu kat- deplasman grafiği



Şekil 52. Trinidad depremi y doğrultusu kat- deplasman grafiği



Şekil 53. 11 depremin ortalaması x doğrultusu katdeplasman grafiği



Şekil 54. 11 depremin ortalaması y doğrultusu katdeplasman grafiği

Analizlerin sonuçları, yapıların deplasman değerlerinin ortalama nasıl değiştiğini incelemek amacıyla tablo halinde sunulmuştur. Tablo 7' de, ankastre mesnetli yapının her deprem ve her kat seviyesindeki deplasman değerleri ile ankastre + viskoz sönümleyicili yapının her deprem ve her kat seviyesindeki deplasman değerlerindeki farkların ortalaması yüzde olarak karşılaştırılmıştır. Ankaştre meşnetli vapıda, viskoz sönümlevici; farkların ortalamalarına göre deplasman değerlerinde x yönünde %26.19 oranında, y yönünde ise %35.91 oranında azalma sağlamıştır. Benzer şekilde, sismik izolatörlü yapının her deprem ve her kat seviyesindeki deplasman değerleri ile sismik izolatör + viskoz sönümleyicili yapının her deprem ve her kat seviyesindeki deplasman değerleri karşılaştırılmıştır. Sismik izolatör ve viskoz sönümleyicinin beraber kullanılması durumunda, farkların ortalamalarına göre, x yönünde %16.13 oranında; y yönünde ise %27.36 oranında yalnızca izolatör kullanılan yapıya göre azalma sağlamıştır.

Tablo 7. Kat seviyelerine göre deplasman değerlerindeki ortalama farklar

	Ortalama					
Kat Seviyesi	Ankastre ile Ankastre + Viskoz Sönümleyicili		Sismik İzolatörlü ile Sismik İzolatörlü + Viskoz Sönümleyicili			
	x	V V	X	v V		
0	0	0	0	0		
1	24.96	35.60	26.57	41.54		
2	25.97	37.09	23.20	37.51		
3	26.86	37.94	20.43	34.02		
4	27.67	38.73	18.23	31.20		
5	28.42	39.38	16.64	29.00		
6	29.20	40.06	15.50	27.31		
7	30.14	40.68	14.77	26.11		
8	30.99	41.35	14.34	25.29		
9	31.68	41.90	14.02	24.72		
10	32.18	42.25	13.72	24.28		
Ortalama	26.19	35.91	16.13	27.36		

Tablo 8. Kat seviyelerine göre deplasman değerlerindeki maksimum farklar

	Maksimum				
Kat Seviyesi	Ankastre ile Ankastre + Viskoz Sönümleyicili		Sismik İzolatörlü ile Sismik İzolatörlü + Viskoz Sönümleyicili		
	rai	-K(70) V	ran v	X(70) V	
0	0	0	0	0	
1	41.22	49.51	34.71	48.48	
2	41.92	49.68	29.99	44.35	
3	42.53	48.03	26.71	40.31	
4	43.03	49.59	24.57	38.36	
5	43.49	50.81	23.03	36.87	
6	43.97	50.82	21.92	35.81	
7	44.44	50.90	21.13	35.14	
8	44.92	51.07	20.56	34.85	
9	45.33	51.36	20.12	34.70	
10	45.62	51.65	19.72	34.60	
Maksimum	45.62	51.65	34.71	48.48	

Yapılara ayrı ayrı etki ettirilen 11 deprem sonucunda oluşan deplasman değerleri arasındaki farkların maksimum değerlerinin nasıl değiştiği ise Tablo 8' de verilmiştir. Ankastre mesnetli yapının her deprem ve her kat seviyesindeki deplasman değerleri ile ankastre + viskoz sönümleyicili yapının her deprem ve her kat seviyesindeki deplasman değerleri arasındaki farkların yüzde olarak maksimum değeri her kat icin karsılaştırılmıştır. Farkların maksimum değerlerine göre, ankastre mesnetli yapıda; viskoz sönümleyici, deplasman değerlerinde x yönünde 10.katta %45.62 oranında, y yönünde ise 10. katta %51.65 oranında azalma sağlamıştır. Benzer şekilde, sismik izolatörlü yapının her deprem ve her kat seviyesindeki deplasman değerleri ile sismik izolatör + viskoz sönümleyicili yapının her deprem ve her kat seviyesindeki deplasman değerleri arasındaki farklar karşılaştırılmıştır. Farkların maksimumlarına göre, sismik izolatörlü yapıda; viskoz sönümleyici, deplasman değerlerinde x yönünde 1.katta %34.71 oranında, y yönünde ise 1. katta %48.48 oranında azalma sağlamıştır. Sonuç olarak viskoz sönümleyicinin ankastre mesnetli yapılarda deplasmanı son katta daha efektif azaltırken, sismik izolatörlü yapılarda deplasmanı izolatör seviyesinde daha efektif azalttığı ortaya konulmuştur. Bu sonuçlar, viskoz sönümleyicilerin hem ankastre mesnetli yapılar hem de izolatörlü yapıların deplasman değerleri için etkili olduğunu göstermiştir.

Göreli-deplasman sonuçları karşılaştırılması;

Yapıda kullanılan sismik izolatörler, zemin kat kolonlarının orta bölgelerinde konumlandırıldığından, izolatör seviyesinde oluşan deplasmanlar ve izolatör seviyesine göre birinci katta meydana gelen göreli deplasmanlar dikkate alınmamıştır. Diğer katlarda oluşan göreli kat deplasmanları dikkate alındığında ise sismik izolatörlü yapılarda, ankastre mesnetli yapılara göre önemli ölçüde azalmalar gözlemlenmiştir. Analizlerin sonuçları, vapıların göreli kat-deplasman değerlerinin ortalama nasıl değiştiğini incelemek amacıyla tablo halinde sunulmuştur. Tablo 9' da, ankastre mesnetli yapının her deprem ve kat seviyelerindeki göreli kat-deplasman değerleri ile sismik izolatörlü yapının göreli kat-deplasman değerlerindeki farkların ortalaması yüzde olarak karşılaştırılmıştır. Farkların ortalamalarına göre, sismik izolatörlü yapıda ankastre mesnetli yapıya göre göreli kat-deplasman değerlerinde x yönünde %56.82 oranında, y yönünde ise %61.19 oranında azalma görülmüştür. Benzer şekilde, ankastre + viskoz sönümleyicili yapının her deprem ve kat seviyelerindeki göreli kat-deplasman değerleri ile sismik izolatör + viskoz sönümleyicili yapının göreli kat-deplasman değerlerindeki farkların ortalaması yüzde olarak karşılaştırılmıştır. Farkların ortalamalarına göre, sismik izolatörlü + viskoz sönümleyicili yapıda ankastre + viskoz sönümleyicili yapıya göre göreli kat-deplasman değerlerinde x yönünde %34.29 oranında; y yönünde ise %30.28 oranında azalma sağlanmıştır. Bu sonuclar, sismik izolasyon sistemlerinin hem ankastre mesnetli yapılar hem de viskoz sönümleyici kullanılan yapıların göreli kat deplasman değerleri için etkili olduğunu göstermiştir.

Tablo 9. Kat seviyelerine göre göreli kat-deplasmandeğerlerindeki ortalama farklar

	Ortalama					
Kat Seviyesi	Ankastre ile Sismik İzolatörlü Fark (%)		Ankastre + Visko Sönümleyicili ile Sisı İzolatörlü + Visko Sönümleyicili			
			Fark (%)			
	Х	у	Х	у		
0						
1						
2	48.09	55.51	32.05	31.24		
3	55.74	60.78	38.48	35.18		
4	58.56	61.98	39.79	34.55		
5	59.23	62.42	39.52	34.12		
6	59.30	63.07	38.44	33.45		
7	59.34	62.77	36.97	32.35		
8	58.47	62.56	34.58	29.56		
9	57.46	62.08	29.54	25.84		
10	55.15	59.52	19.21	16.28		
Ortalama	56.82	61.19	34.29	30.28		

Kat seviyesi - ivme sonuçları karşılaştırılması;

Nümerik analizlerde kullanılan tüm modeller için hem x hem de y doğrultuları için kat ivme değerleri karşılaştırılmış ve sonuçlar grafik halinde x ve y doğrultuları için sırasıyla Şekil 55 ve 56' da verilmiştir. Bu grafiklerden görüldüğü üzere ankastre mesnetli yapıya viskoz sönümleyici veya sismik izolatör eklenmesi durumunda her iki doğrultu için de kat ivme değerleri genel olarak önemli ölçüde azalmaktadır. Hem sismik izolatör hem de viskoz sönümleyici kullanılan modelde ise kat ivme değerleri genel olarak yine azalmaktadır. Yapısal kontrol sistemlerinin bina içerisindeki yerleşimi ve sismik izolatörlerin bulunduğu katta yüksek deplasmanlara müsaade etmesi alt katlardaki ivme değerlerindeki artış sebep olmuştur.



Şekil 55. 11 depremin ortalaması x doğrultusu kat- ivme grafiği



Şekil 56. 11 depremin ortalaması y doğrultusu kat- ivme grafiği

Tüm bulgular değerlendirildiğinde literatürdeki çalışmalara kıyasla viskoz sönümleyicilerin yapının farklı yönlerine tek veya çift olarak yerleştirilmesi ve bu düzenlemelerin izolatörle berber kullanıldığında yapının deprem tepkileri detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, viskoz sönümleyiciler ve kurşun çekirdekli kauçuk sismik izolatörlerin, 10 katlı betonarme bir binanın deprem etkisi altında sismik davranışının nasıl etkilediği kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Ankastre mesnetli, viskoz sönümleyicili, sismik izolatörlü ve bu iki sistemin kombinasyonundan oluşan binaların sismik tepkileri incelenmiştir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) esas alınarak yapılan zaman tanım alanı analiz sonuçları, kat deplasmanları ve göreli kat deplasmanları

Ankastre mesnetli yapılara viskoz sönümleyici eklenmesi, yapıda meydana gelen ortalama deplasman değerlerinde x yönünde %26.19, y yönünde ise %35.91 oranında azalma sağlamıştır. Sismik izolatörlü yapılarda ise viskoz sönümleyicinin eklenmesiyle, yapıda meydana gelen ortalama deplasman değerlerinde x yönünde %16.13, y yönünde ise %27.36 oranında azalma elde edilmiştir. Maksimum kat deplasman farkları incelendiğinde, viskoz sönümleyicilerin ankastre mesnetli yapılarda son katta %45.62 (x yönünde) ve %51.65 (y yönünde) oranında, sismik izolatörlü yapılarda ise izolatör seviyesinde %34.71 (x yönünde) ve %48.48 (y yönünde) oranında azalma sağladığı belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre, viskoz sönümleyicilerin hem izolatör kullanılmayan hem de izolatör kullanılan yapılarda etkili olduğu belirlenmiştir. Ancak bu etkiler ankastre mesnetli yapılarda üst katlarda daha yüksek mertebelerdeyken izolatörlü yapıda daha düşük kat seviyelerinde gerçekleşmektedir. Göreli kat deplasmanları açısından bakıldığında, sismik izolatörlerin ankastre mesnetli yapılara göre x yönünde %56.82, y yönünde ise %61.19 oranında azalma sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca, viskoz sönümleyicilerin ve sismik izolatörlerin birlikte kullanıldığı yapılarda, sadece viskoz sönümleyicili yapılara göre x yönünde %34.29, y yönünde ise %30.28 oranında azalma gözlemlenmiştir. Kat ivme değerleri açısından değerlendirme yapıldığında, ankastre mesnetli yapıya viskoz sönümleyici, sismik izolatör veya her ikisinin birlikte eklenmesi durumunda her kat ivme değerleri genel olarak önemli ölçüde azalmaktadır.

Bu bulgular, sismik izolatörlerin ve viskoz sönümleyicilerin birlikte kullanıldığında betonarme yapı performansını önemli ölçüde artırdığını ortaya koymaktadır. Çalışmanın bulguları, yapısal kontrol sistemlerinin, depreme dayanıklı yapı tasarımında kritik bir öneme sahip olduğunu vurgulamaktadır. Viskoz sönümleyiciler ve sismik izolatörler, betonarme binaların deprem sırasında maruz kalacağı deplasmanları ve göreli kat deplasmanlarını azaltarak, yapısal hasarları ve dolayısıyla can ve mal kayıplarını minimize edebilir. Sismik izolasyon sistemleri uygulamada ve literatürde yüksek katlı betonarme yapılarda genellikle kullanılmamaktadır. Bu sistemlerin viskoz sönümleyicilerle beraber kullanılmasının özellikle yüksek

katlı betonarme binaların deprem tepkilerine etkisi hem uygulama mühendisleri için hem de bu konu üzerinde çalışan araştırmacılar için önemli bir araştırma konusudur. Bu tür yapısal kontrol sistemlerinin, özellikle yüksek betonarme binalarda ve deprem riski yüksek bölgelerde kullanımı, yapıların güvenliğini artırarak toplumların deprem sonrası toparlanma sürecini hızlandırabilir. Gelecekte yapılacak olan çalışmalarda, farklı bina yüksekliklerine, farklı kat planlarına ve farklı zemin özelliklerine sahip betonarme binalarda yapısal kontrol sistemlerinin beraber kullanılması ve bu sistemlerin ekonomik ve farklı tip yapı sistemleri için uygulanabilirliği konularının incelenmesi faydalı olacaktır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

- O. İnce, Structural damage assessment of reinforced concrete buildings in Adıyaman after Kahramanmaraş (Türkiye) Earthquakes on 6 February 2023. Engineering Failure Analysis, 156, 107799, 2024. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107799
- [2] A. Özmen, O. İnce, Ö.F. Taş, M. Atar, O.E. Ozbulut, E. Sayın, Seismic performance assessment of structures in Malatya Province after 6 February 2023 Turkey earthquake sequences. Natural Hazards, 1-34, 2024. https://doi.org/10.1007/s11069-024-07017-x
- [3] A.R. Zare, M. Ahmadizadeh, Design of passive viscous fluid control systems for nonlinear structures based on active control. Journal of Earthquake Engineering, 23(6), 1033-1054, 2019. https://doi.org/10.1080/13632469.2017.1342295
- [4] M. Komur, T. Karabork, I. Deneme, Nonlinear Dynamic Analysis of Isolated and Fixed-Base Reinforced Concrete Structures. Gazi University Journal of Science, 24(3), 463-475, 2011.
- [5] C. Zhang, A. Ali, L. Sun, Investigation on low-cost friction-based isolation systems for masonry building structures: Experimental and numerical studies. Engineering Structures, 243, 112645, 2021. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112645
- [6] A.H. Deringöl, E.M. Güneyisi, Influence of nonlinear fluid viscous dampers in controlling the seismic response of the base-isolated buildings. Structures, 34, 1923-1941, 2021. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.106
- [7] M.C. Constantinou, M.D. Symans, Seismic response of structures with supplemental damping. The Structural Design of Tall Buildings, 2(2), 77-92, 1993. https://doi.org/10.1002/tal.4320020202
- [8] Z. Germen, Yapısal kontrol sistemleri. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [9] T. Işık, Yapılarda sürtünmeli elemanlar ile viskoz sönümleyicilerin birlikte uygulanması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006. http://hdl.handle.net/11527/6941

- [10] A. Ras, N. Boumechra, Study of nonlinear fluid viscous dampers behaviour in seismic steel structures design. Arabian Journal for Science and Engineering, 39, 8635-8648, 2014. https://doi.org/10.1007/s13369-014-1460-5
- [11] M. Mohebbi, M. Noruzvand, H. Dadkhah, K. Shakeri, Direct displacement-based design approach for isolated structures equipped with supplemental fluid viscous damper. Journal of Building Engineering, 45, 103684, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103684
- [12] D. Öztürk, Viskoz sönümleyici elemanların mevcut bir okul yapısının sismik davranışı üzerindeki etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2022. https://hdl.handle.net/11499/39687
- [13] J.W. Jung, M.K. Kim, J.H. Kim, Experimental study on the floor responses of a base-isolated frame structure via shaking table tests. Engineering Structures, 253, 113763, 2022.

https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113763

- [14] M. Dolce, D. Cardone, F.C. Ponzo, Shaking-table tests on reinforced concrete frames with different isolation systems. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 36(5), 573-596, 2007. https://doi.org/10.1002/eqe.642
- [15] M. Dikmen, Deprem etkisindeki bitişik binalarda çarpışma etkisini önlemek için viskoz sönümleyicilerin optimum tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2017.
- [16] E. Sansarcı, Yapısal kontrol sistemleri ve sıvı sönümleyicilerin yapılarda kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002.
- [17] Ü. Aldemir, E. Aydın, An active control algorithm to prevent the pounding of adjacent structures. In: Vibration Problems ICOVP 2005. Springer Netherlands, 33-38, 2007. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5401-3_7
- [18] W.H. Robinson, A.G. Tucker, A lead-rubber shear damper. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 10(3), 151-153, 1977. https://doi.org/10.5459/bnzsee.10.3.151-153
- [19] I. Skinner, W.H. Robinson, G.H. McVerry, An Introduction to Seismic Isolation; John Wiley and Sons Inc, 1993, New York, NY, USA.
- [20] B. Çakıl, Betonarme Bir Dubleks Binanın Sismik İzolasyonsuz ve İzolasyonlu Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2023.
- [21] M. Çağlar Camgöz, Taban İzolasyonlu Sistemler. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002. http://hdl.handle.net/11527/10854
- [22] E. Sevim, Sismik İzolatörlerin Bina Türü Yapıların Dinamik Davranışına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016.
- [23] G.P. Warn, K.L. Ryan, A review of seismic isolation for buildings: historical development and research needs. Buildings, 2(3), 300-325, 2012. https://doi.org/10.3390/buildings2030300

- [24] T. Toprak, Burulma Düzensizliği Olan Yapılarda Sismik İzolasyon Kullanımının Deprem Yükleri Altındaki Davranışa Olan Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012. http://hdl.handle.net/11527/6643
- [25] F. Naeim, J.M. Kelly, Design of Seismic Isolated Structures, John Wiley & Sons Inc, 1999, USA.
- [26] TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- [27] Z. Kanbir, C. Alhan, G. Özdemir, Üstyapı sönüm oranının deprem etkisindeki kurşun çekirdekli elastomer yalıtım birimli binalardaki etkilerinin araştırılması. Politeknik Dergisi, 25(2), 655-665, 2022.
- [28] E. Güngör, E. Yıldırım, K.E. Demirhan, Köprülerde Kullanılan Kurşun Çekirdekli Kauçukizolatörler İçin Ce Sertifikalandırılması ve Üretim Kontrol Değerlendirilmesi. 4. Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu, 1-2 Kasım, 2019, Ankara.
- [29] S.S. Tezcan, A. Erkal, Seismic base isolation and energy absorbing devices. Yüksek Öğrenim Eğitim ve Araştırma Vakfı, 2002.
- [30] D. Lee, D.P. Taylor, Viscous damper development and future trends. The structural design of tall buildings, 10(5), 311-320, 2001. https://doi.org/10.1002/tal.188
- [31] M. D. Güler, Üç Katlı Çelik Bir Yapının Performansının Belirlenmesi ve Viskoz Sönümleyiciler İle Güçlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015. http://hdl.handle.net/11527/13861
- [32] Y. Durgun, Mevcut betonarme yapıların deprem performanslarının belirlenmesi ve viskoz akışkanlı sönümleyiciler ile güçlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016. http://hdl.handle.net/11527/25572.
- [33] H.K. Mıyamoto, A.S. Gılanı and A Wada. State of the art design of steel moment frame buildings with dampers. Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering. pp. 12-17, Beijing, China, 2008.
- [34] SAP2000. Integrated finite element analysis and design of structures, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, USA.
- [35] Taylor Devices. Taylor Fluid Viscous Damper C-Values Datasheet, North Tonawanda, NY 14120, https://www.taylordevices.com/
- [36] Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması. Erişim tarihi: 01.04.2020. https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml
- [37] SeismoArtif. A Computer Program for Generating Artificial Earthquake Accelerograms Matched to a Specific Target Response Spectrum. 2020. https://seismosoft.com/products/seismoartif/
- [38] K.Ö. Çetin, M Ilgaç, G Can, E Çakır, B Söylemez. Preliminary report on engineering and geological effects of the January 24, 2020 magnitude 6.7 earthquake in Elaziğ, Turkey, 2020.

[39] E Çakır, K.Ö. Çetin, M Ilgaç, G Can, A Elsaid, B Söylemez, F Cuceoglu, Z Gülerce, S Aydin, A Askan, M Gor. Geotechnical aspects of reconnaissance findings after 2020 January 24th, M6.8 Sivrice–Elazig– Turkey earthquake. Bulletin of Earthquake Engineering, 19, 2021. https://doi.org/10.1007/s10518-021-01112-1



NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 580-587



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

Araștırma makalesi / Research article

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



Statistical analysis of mechanical properties of waste glass powder substituted glass fiber mortars by ANOVA

Atık cam tozu ikameli cam elyaf içeren harçların mekanik özelliklerinin ANOVA ile istatistiksel analizi

Mehmet Timur Cihan ^{1,*} (¹), Veysel Akyüncü²

^{1,2} Tekirdağ Namık Kemal University, Çorlu Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, 59860, Tekirdağ Türkiye

Abstract

Using waste in the cement and concrete industry helps reduce costs and the need for large storage spaces for waste disposal. In particular, disposing of waste glass powder (WGP) from the glass industry requires significant storage capacity. Therefore, utilizing WGP as a raw material in construction is both an environmentally and economically viable solution. This study examined the workability, flexural strength, compressive strength, and splitting tensile strength of glass fiber-reinforced mortars containing WGP. A face-centered composite design was used to determine 13 test points. The fiber ratio was selected at 0%, 0.3%, and 0.6% by weight of the mixture, while WGP substitution levels were 0%, 7.5%, and 15% by weight of cement. The results indicate that adding glass fiber and WGP reduces flow value, flexural strength, compressive strength, and splitting tensile strength. However, at higher glass fiber ratios, the negative effect of WGP on flow value and compressive strength is less pronounced. The R² values for flow value, flexural strength, compressive strength, and splitting tensile strength were 0.9983, 0.9586, 0.9069, and 0.8526, respectively, indicating a strong correlation between the tested parameters and the predictive model.

Keywords: Glass fiber, Waste glass powder, ANOVA, Flow value, Flexural strength, Compressive strength, Splitting tensile strength

1 Introduction

As sustainability becomes a priority in the construction industry, emphasis is being placed on recycling waste to produce environmentally friendly cement-based or cementfree materials [1]. Glass is versatile due to its properties, such as transparency and inertness [2]. The glass is completely recyclable. However, there are still limitations due to quality criteria in glass production [1]. Therefore, non-recyclable glass waste is disposed of in landfills [1]. The amount of glass landfilled worldwide is estimated at approximately 200 million tons annually [3]. In addition, approximately 400000 tons of glass waste is buried annually in the three largest cities of Turkey (Istanbul, Izmir, and Ankara) [4].

Öz

Atıkların çimento ve beton endüstrisinde kullanılması, maliyetin ve atık bertarafı için büyük depolama alanlarına olan ihtiyacın azaltılmasına yardımcı olur. Özellikle cam endüstrisinden çıkan atık cam tozunun (WGP) bertaraf edilmesi önemli bir depolama kapasitesi gerektirmektedir. Bu nedenle, WGP'nin inşaatta hammadde olarak kullanılması hem çevresel hem de ekonomik açıdan uygulanabilir bir çözümdür. Bu çalışmada, WGP içeren cam lif takviyeli harçların işlenebilirliği, eğilmede çekme, basınc ve varmada cekme davanımları incelenmistir. Yüzev merkezli kompozit tasarım 13 test noktasını belirlemek için kullanılmıştır. Lif oranı karışımın ağırlığına göre %0, %0.3 ve %0.6 olarak seçilirken, WGP ikame seviyeleri çimentonun ağırlığına göre %0, %7.5 ve %15 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, cam lif ve WGP ilavesinin yayılma değerini, eğilmede çekme, basınç ve yarmada çekme dayanımını azalttığını göstermektedir. Bununla birlikte, daha yüksek cam lif oranlarında, WGP'nin yayılma değeri ve basınç dayanımı üzerindeki olumsuz etkisi daha az belirgindir. Yavılma değeri, eğilmede cekme, basınç ve yarmada çekme dayanımı için R² değerleri sırasıyla 0.9983, 0.9586, 0.9069 ve 0.8526 olup test edilen parametreler ile tahmini model arasında güçlü bir korelasyon olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Cam lifi, Atık cam tozu, ANOVA, Yayılma değeri, Eğilmede çekme dayanımı, Basınç dayanımı, Yarmada çekme dayanımı

Waste glass cullet is used as an aggregate source (coarse aggregate [5] or fine aggregate [6,7]) in the construction industry [8,9]. However, it is known that they have adverse effects, such as a decrease in workability/strength [6,7] and alkali-silica reaction (ASR) [10]. In addition, waste glass powder (WGP) is also used for sustainable production in the construction industry. In particular, it is used for geopolymer production [11] and lightweight aggregate manufacturing [12,13].

Concrete is the most widely used building material and has low tensile strength. Different types of fibers, such as steel, polypropylene, aspect, and glass [14], are used to improve the tensile strength of concrete [15]. Glass fibers

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mehmetcihan@nku.edu.tr (M. T. Cihan) Geliş / Received: 01.10.2024 Kabul / Accepted: 24.02.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngmuh.1558323

delay the development of micro-cracks in the early age of concrete and thus increase the tensile strength and toughness of concrete [16]. The mechanical properties of glass fiber reinforced concretes generally depend on the fiber content, water/cement ratio, void content, sand content, fiber distribution, fiber length, and curing conditions. Glass fiber is chosen to help prevent shrinkage cracks from forming.

In mortars using glass fiber with a length of 12 mm and a diameter of 14 µm, compressive strength decreases with increasing fiber ratio, but flexural strength increases [17–19]. Using more than 0.5% glass fiber (l/d-length/diameter of 6-8 mm/78 µm) in shotcrete reduces tensile strength in bending [20]. In the case of using glass fiber with an 1/d of 3 mm/12-13 µm in mortars, no significant change is observed in flexural and compressive strengths [21].

In studies with high controllable and uncontrollable effect variables, central composite design is frequently used within the scope of response surface methodology [22]. A face-centered composite design was preferred within the scope of this study. This design determines the optimum effect levels of controllable variables on the response variable. One of the most important advantages of the facecentered composite design is that it increases applicability by keeping the experimental points within cubic boundaries [22]. This feature prevents the experimental conditions from reaching extreme values. This allows data to be produced for the desired variation intervals of controllable effect variables. In addition, it allows the creation of second-degree (quadratic) models, and nonlinear interactions between variables can be determined. Especially in experimental and observational studies, ANOVA (analysis of variance) is preferred to determine the effect levels of the variables on response variables at different variation intervals [22].

Using waste materials in the cement and concrete industry is crucial for reducing both disposal costs and the need for large storage areas. Waste glass powder (WGP), a byproduct of the glass industry, requires significant storage space, making its utilization in construction materials an important area of research. This study aims to evaluate the effects of WGP and glass fiber on mortars' workability and mechanical properties. By analyzing flow value, flexural strength, compressive strength, and splitting tensile strength, the research provides valuable insights into the feasibility of WGP fiber-reinforced incorporating in mortars. Additionally, statistical analysis was conducted to assess the observed effects' significance and the predictive models' reliability.

Material and method 2

2.1 Material

CEM I 42.5 R cement, standard sand (conforming to TS EN 196-1 [23]), distilled water, glass fiber (GF, length, 3 mm), and 300 µm under-sieve waste glass powder (WGP) were used in specimen production. Distilled water with standard content was used to minimize the variability in the experimental results depending on the content of the mixture water. The chemical composition of cement and WGP is given in Table 1. Moreover, the elements in the WGP content were determined by SEM-EDX and shown in Table 2. As

expected, Si is the highest element by weight in the WGP. The specific gravity and specific surface value of cement are 3.12 and 4129 cm²/g, respectively. WGP's particle structure and granulometry curve were determined using SEM imaging and sieve analysis. The granulometry curve and SEM images are shown in Figure 1 and Figure 2, respectively. Moreover, the constituent materials for each run point are given in Table 3.

Table 1. Chemical composition of cement and WGP

Composition (%)	CEM I 42.5 R	WGP	
CaO	64.24	8.55	
SiO ₂	17.73	73.10	
Al_2O_3	4.15	1.03	
Fe ₂ O ₃	2.98	1.43	
MgO	0.90	3.87	
SO ₃	3.26	0.27	
Na ₂ O	0.35	8.51	
K ₂ O	0.69	0.02	
Cl	0.02	0.01	
H ₂ O	-	1	
Loss of ignition	4.00	2.37	
Free lime	1.82	-	
Insoluble residue	0.37	-	

Table 2. The elements in the WGP Na

Mg Al

Si

K

Ca

Fe

Elements O



Figure 1. Grading curve for WGP

WGP can trigger pozzolanic reactions [24]. The 75 µm grain size is the threshold value for the pozzolanic reactivity of WGP [25,26]. When the WGP grading curve (Figure 1) is analyzed, it is seen that 60% of the WGP used is coarser than 63 µm. This indicates that the pozzolanic effect of WGP will be low. In general, WGP is known to have an angular shape and sharp edges [27,28]. When Figure 2 (SEM images) is examined, it is seen that the WGPs used in the study also have an angular form and sharp edges. WGP particles have higher aspect ratios and a smoother texture than Portland cement particles [24,29,30].



Figure 2. SEM images for WGP (400, 200, 100, and 50 μ m)

Run	Space	Cement	Standard	Distilled	Glass	Glass
	type		sand	water	powder	fiber
		g	g	g	g	g
1, 3, 4,	Center	1248.8	4050	675	101.3	18.23
6,13						
2	Axial	1147.5	4050	675	202.5	18.23
5	Axial	1248.8	4050	675	101.3	0
7	Factorial	1350	4050	675	0	0
8	Factorial	1350	4050	675	0	36.45
9	Axial	1248.8	4050	675	101.3	36.45
10	Factorial	1147.5	4050	675	202.5	36.45
11	Factorial	1147.5	4050	675	202.5	0
12	Axial	1350	4050	675	0	18.23

2.2 Method

In the experimental study, glass fiber (GF) ratio (by weight of mix, 0%, 0.3%, and 0.6%), waste glass powder (WGP) substitution ratio (by weight of cement, 0%, 7.5%, and 15%) were selected as effect variables. The run points were determined using a face-centered composite design. The central composite design is named differently depending on the distance of the axial test points from the center point (α) [22]. In the face-centered composite design, it is 1. This means that for two effect variables, the axial points are placed at the centers of the surfaces. For two effect variables, the geometric view of the face-centered composite design is shown in Figure 3. The face-centered composite design enhances applicability, ensuring that experimental points remain within cubic boundaries [22]. In the experimental study, 5, 4, and 4 test points were selected for the center, axial, and factorial regions (as shown in Figure 3), respectively, and 13 run points were determined. The coded values of the variation intervals of the effect variables are given in Table 4.



Figure 3. Geometric view of the face-centered composite design for two effect variables

 Table 4. Variation intervals of effect variables and coded values

values						
Effect	Unit	Type	Min *	May *	Code	d values
variables	Umt	Type	IVIIII.	IVIAA.	Low	High
A: WGP ratio	%	Num.*	0.00	15.00	$-1 \leftrightarrow 0.00$	$+1 \leftrightarrow 15.00$
B: GF ratio	%	Num.*	0.00	0.60	$\textbf{-1} \leftrightarrow 0.00$	$+1 \leftrightarrow 0.60$
Num · Nun	orica	1 Min	Minin	aum M	av · Mavi	mum

Num.: Numerical, Min.: Minimum, Max.: Maximum

The mortar specimens were prepared according to TS EN 196-1 [23]. They were initially subjected to 24-hour sealing curing, followed by immersion in lime-saturated water at

 20 ± 1 °C until the testing date. To determine the flexural and compressive strength, 39 specimens ($40\times40\times160$ mm) were produced, with three specimens for each run point. Additionally, 13 specimens (100×100 mm) were prepared for splitting tensile strength, with one specimen for each run point.

Flow value (mm), flexural strength (MPa), splitting tensile strength (MPa), and compressive strength (MPa) were selected as response variables. The flow-table, flexural, compression, and splitting tensile tests were performed according to TS EN 1015-3 [31], TS EN 196-1 [23], TS EN 196-1 [23], and TS EN 12390-6 [32] standards, respectively.

In the flow-table test, fresh mortar was placed into the cone in two stages, with each stage compacted by tamping 10 times using a rod. After 15 drops over 60 seconds, the diameters of the spread mortar were measured. The average diameter (flow value) was then calculated using measurements along the x- and y-axis directions.

Mortar samples were loaded at three points for flexural strength, with their lateral faces positioned perpendicular to the loading surface and supporting pins. The span length was 100 mm. Each divided sample was fractured by placing it between head blocks measuring 40×40 mm for compressive strength.

The splitting tensile test was carried out by applying a compressive load perpendicular to the axis of 100×100 mm specimens. The specimen split in the middle due to the tensile stresses that occurred when the load was applied.

The effect levels of the variables on the response were determined by ANOVA [22]. The Box-Cook method [33] was used to determine whether a transformation should be applied to the results to determine the effect levels accurately. In addition, the suitability of the obtained models was evaluated using fit statistics [34]. Statistical calculations within the scope of the study were performed using Design Expert [34].

Table 5. Run points and experimental results

3 Results and discussion

The test results (flow value, flexural strength, compressive strength, and splitting tensile strength) performed on the specimens produced for 13 run points obtained from the face-centered composite design are given in Table 5.

Table 5 shows that the flow values vary in the 10-16 cm range. The flow value decreases as the waste glass powder and glass fiber ratio increases. The flexural strength, splitting tensile strength, and compression strength values vary in the 6.26-7.57 MPa, 2.36-3.74 MPa, and 27.37-42.05 MPa ranges, respectively.

The design summary for the response variables is given in Table 6. The Box-Cook method was used to determine whether a converter would be required on the results to determine the effect levels correctly. The study determined that the power transducer should be applied only to compressive strength results. The most suitable exponent was obtained as -2.51 in this power transformation and applied to the compressive strength results. The design summary shows that only the model obtained for the spreading table value is quadratic, and the other response variables are linear.

The ANOVA results for the responses are given in Table 7. The p-value <0.1 indicates that the term added to the model has a significant effect level. Therefore, it is seen that all terms used in the models have a significant effect level (Table 6). In addition, the p-value of the response variables' models is <0.0001, which shows that the models are significant.

The models obtained in terms of coded values for flow value, flexural strength, compressive strength, and splitting tensile strength are given in Equation 1, Equation 2, Equation 3, and Equation 4, respectively. The models are given according to the coded values to allow the relative effects to be determined by comparing the coefficients.

Effect variables]		
Run	Space type	A: WGP ratio	B: GF ratio	Flow value	Flexural strength	Compressive strength	Splitting tensile strength
		%	%	cm	MPa	MPa	MPa
1	Center	7.5	0.3	13.00	7.00	30.83	3.13
2	Axial	15.0	0.3	11.75	6.62	29.09	2.79
3	Center	7.5	0.3	13.00	6.98	32.57	2.88
4	Center	7.5	0.3	13.00	7.08	33.25	2.92
5	Axial	7.5	0.0	15.40	7.27	39.99	3.74
6	Center	7.5	0.3	13.00	7.10	33.02	3.02
7	Factorial	0.0	0.0	16.25	7.57	42.05	3.58
8	Factorial	0.0	0.6	10.50	7.42	33.19	3.15
9	Axial	7.5	0.6	11.00	6.77	28.34	2.66
10	Factorial	15.0	0.6	10.00	6.26	27.37	2.36
11	Factorial	15.0	0.0	13.75	6.58	33.08	2.92
12	Axial	0.0	0.3	13.00	7.53	40.42	3.33
13	Center	7.5	0.3	13.00	7.04	30.68	2.98

Table 6. Design summary for response variables

Responses	Units	Obs.*	Analysis	Min.*	Max.*	Mean	Transform	Model
Flow value	cm	13	Polynomial	10	16.25	12.82	None	Quadratic
Flexural strength	MPa	13	Polynomial	6.26	7.57	7.02	None	Linear
Compressive strength	MPa	13	Polynomial	27.37	42.05	33.37	Power	Linear
Splitting tensile strength	MPa	13	Polynomial	2.36	3.74	3.04	None	Linear

Obs.: Observations, Min.: Minimum, Max.: Maximum

Table 7. ANOVA for response variables

	Fle	ow value	Flexu	ral strength	Compressive strength		Splitting tensile strengtl	
Source	p-value	Significance	p-value	Significance	p-value	Significance	p-value	Significance
Model	< 0.0001	significant	< 0.0001	significant	< 0.0001	significant	< 0.0001	significant
A-Glass powder ratio	< 0.0001	significant	< 0.0001	significant	< 0.0001	significant	0.0004	significant
B-Glass fiber ratio	< 0.0001	significant	0.0009	significant	< 0.0001	significant	0.0003	significant
AB	< 0.0001	significant	-	-	-	-	-	-
A ²	< 0.0001	significant	-	-	-	-	-	-
B ²	0.0058	significant	-	-	-	-	-	-

Flow value =
$$12.99 - 0.7083 \cdot A - 2.32 \cdot B + 0.50 \cdot AB$$

- $0.6009 \cdot A^2 + 0.2241 \cdot B^2$ (1)

 $Flexural strength = 7.02 - 0.5082 \cdot A - 0.1622 \cdot B$ (2)

Compressive strength^{-2.51}

$$= 0.0002 + 4.7179 \cdot 10^{-5} \cdot A + 4.8751$$
(3)
 $\cdot 10^{-5} \cdot B$

Splitting tensile strength = $3.04 - 0.3309 \cdot A - 0.3461 \cdot B$ (4)

The fit statistics of the models obtained for the response variables are given in Table 8. The highest R^2 value (0.9828) was obtained for the flow value. The R^2 values for flexural, compressive, and splitting tensile strengths were 0.9113, 0.8374, and 0.7248, respectively. Adjusted R^2 and estimated R^2 values were also determined. It is seen that the estimated R^2 values for all response variables are in reasonable agreement with the adjusted R^2 values (i.e., their difference is less than 0.2 [34]).

Table 8. Fit statistics

Responses	R ²	Adjusted R ²	Predicted R ²
Flow value	0.9983	0.9971	0.9828
Flexural strength	0.9586	0.9504	0.9113
Compressive strength	0.9069	0.8882	0.8374
Splitting tensile strength	0.8526	0.8232	0.7248

The variation between the predicted values and the observations (actual) is shown in Figure 4. The best overlap between the measured and predicted values is seen in the flow value variable, where R^2 is the highest. The predictability of the flexural strength is higher than the splitting tensile strength because the use of glass fiber affects the indirect tensile strength at different levels. In particular, it is known that indirect tensile strengths are much more sensitive to glass fiber distribution.

The interaction plots of the response variables depending on waste glass powder and glass fiber are shown in Figure 5. The decrease in the flow value is primarily attributed to adding glass fiber (GF) to the mixture, which increases internal friction and reduces workability. When the WGP ratio is 0% and 15%, adding GF decreases the flow value by approximately 6 cm and 4 cm, respectively. However, at a GF ratio of 0% and 0.6%, WGP addition results in a smaller reduction of approximately 2 cm and 1 cm, respectively. Interestingly, when the GF ratio is 0.6%, incorporating WGP at a rate of 7.5% slightly enhances the flow value, suggesting a potential balancing effect between these components.

The change in the GF ratio leads to only a 0.5 MPa decrease in flexural strength across all WGP ratios, indicating that fiber reinforcement maintains overall structural integrity despite slight reductions. However, as the WGP ratio increases, a more noticeable decrease of approximately 1 MPa in flexural strength is observed at 0% and 0.6% GF ratios. This reduction suggests that while WGP contributes to sustainability by incorporating waste materials, its higher proportions may compromise flexural performance, necessitating an optimal balance for practical applications.

Similarly, the interaction plot of the compressive strength shows that increasing the GF ratio decreases the compressive strength across all WGP ratios. This decrease is significant, with approximately 10 MPa and 5 MPa reductions for GF ratios of 0% and 0.6%, respectively. Such a decline highlights the trade-off between fiber reinforcement and compressive capacity, which must be carefully considered in load-bearing structural applications. In addition, the obtained model indicates that the 95% confidence widens at lower WGP and GF ratios, suggesting greater variability in mechanical performance under these conditions.

Regarding splitting tensile strength, the change in the GF ratio results in a minor decrease of 0.5 MPa at all WGP ratios. However, increasing the WGP ratio further reduces splitting tensile strength by approximately 0.7 MPa at 0% and 0.6% GF ratios, reinforcing the trend of declining tensile performance with higher WGP content. When GF is 0%, increasing the WGP ratio from 0% to 7.5% leads to a 4.5% improvement in splitting tensile strength. This indicates that WGP, at controlled levels, may offer some benefits in tensile performance. Moreover, as expected, the splitting tensile strength was lower than the flexural strength, which aligns with conventional structural behavior.

These results underscore the complex interplay between GF and WGP in influencing mechanical properties. While GF enhances flexural performance to some extent, it compromises compressive and splitting tensile strengths. Likewise, WGP, when used strategically, can contribute to sustainability without severely compromising structural integrity. Therefore, optimizing the balance between these materials is crucial for developing durable and sustainable construction materials.



Figure 4. Predicted and actual values for (a) flow value, (b) flexural strength, (c) compressive strength and (d) splitting tensile strength



Figure 5. Interaction plots for (a) flow value, (b) flexural strength, (c) compressive strength and (d) splitting tensile strength

4 Conclusion

In the study, the effects of glass fiber (0%, 0.3%, and 0.6%) and waste glass powder (0%, 7.5%, and 15%) substitution on the mechanical properties (flow value, flexural strength, compressive strength, and splitting tensile strength) of the mortars were investigated. The following results were obtained.

- The addition of glass fiber reduces the flow value. With the addition of GF (0.6%) at 0%, 7.5%, and 15% WGP ratios, the flow value decreases by 35.4%, 28.6%, and 27.3%, respectively. Adding WGP reduces the negative effect of glass fiber on the flow values. Using WGP in mortars with 0% GF causes a decrease of 15.4% in the flow value. However, the use of WGP in mortars with 0.6% GF does not cause a change in the flow value.
- While adding glass fiber a bit reduces the flexural strength, adding WGP reduces it much more.
- GF addition causes a decrease in compressive strength at all WGP ratios.
- Adding glass fiber and waste glass powder generally reduces splitting tensile strength. However, when 7.5% waste glass powder is added without any glass fiber (0% GF), the splitting tensile strength increases by 4.5%.
- The predictability of the flow value, flexural strength, and compressive strength is high depending on the glass fiber and waste glass powder (R^2 values are 0.9983, 0.9586, and 0.9069, respectively).
- The predictability of the splitting tensile strength is lower than other mechanical properties ($R^2 = 0.8526$). It can be said that this situation is due to the variability of the glass fiber distribution in the mortar specimens.

Generally, adding glass fiber to mortars negatively affects their mechanical properties. However, the adverse effects of glass fiber can be reduced by adding a certain amount of WGP to the mixture (approximately 7.5%). In future studies, it is essential to conduct studies that consider other variables affecting the properties of glass fiber mortars, especially the distribution of fibers in the sample regarding the usability of waste glass powder in glass fiber mortars.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): %17

References

- [1] Y. Jiang, T.C. Ling, K.H. Mo, and C. Shi, A critical review of waste glass powder – Multiple roles of utilization in cement-based materials and construction products, J Environ Manage, 242, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.098.
- [2] J.X. Lu, B.J. Zhan, Z.H. Duan, and C.S. Poon, Using glass powder to improve the durability of architectural

mortar prepared with glass aggregates, Mater Des, 135, 2017. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.09.016.

- [3] M. Mirzahosseini, and K.A. Riding, Influence of different particle sizes on reactivity of finely ground glass as supplementary cementitious material (SCM), Cem Concr Compos, 56, 2015. https://doi.org/ 10.1016/j.cemconcomp.2014.10.004.
- [4] V. Aydeniz, Cam Atık Geri Dönüşümü ve Geliştirme Çalışmaları, n.d. https://turktay.com/images/upload/06f31d963cc52c08 d1bdb5e67cc1f84a.pdf (accessed September 13, 2024).
- [5] K. Afshinnia, and P.R. Rangaraju, Impact of combined use of ground glass powder and crushed glass aggregate on selected properties of Portland cement concrete, Constr Build Mater, 117, 2016. https://doi.org/ 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.072.
- [6] T.C. Ling, and C.S. Poon, Stress-strain behaviour of fire exposed self-compacting glass concrete, Fire Mater, 37, 2013. https://doi.org/10.1002/fam.2131.
- [7] E.E. Ali, and S.H. Al-Tersawy, Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self compacting concrete, Constr Build Mater, 35, 2012. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.117.
- [8] T.C. Ling, C.S. Poon, and S.C. Kou, Feasibility of using recycled glass in architectural cement mortars, Cem Concr Compos, 33, 2011. https://doi.org/ 10.1016/j.cemconcomp.2011.05.006.
- [9] C. Zhou, M. Li, Q.D. Nguyen, X. Lin, A. Castel, Y. Pang, Z. Deng, T. Shi, and C. Mai, Application of waste glass powder for sustainable concrete: design, performance, perspective, Materials, 18, 2025. https://doi.org/10.3390/ma18040734.
- [10] S.B. Park, and B.C. Lee, Studies on expansion properties in mortar containing waste glass and fibers, Cem Concr Res, 34, 2004. https://doi.org/ 10.1016/j.cemconres.2003.12.005.
- [11] R. Redden, and N. Neithalath, Microstructure, strength, and moisture stability of alkali activated glass powderbased binders, Cem Concr Compos, 45, 2014. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.011.
- [12] S.A. Memon, T.Y. Lo, and H. Cui, Utilization of waste glass powder for latent heat storage application in buildings, Energy Build, 66, 2013. https://doi.org/ 10.1016/j.enbuild.2013.07.056.
- [13] V. Ducman, A. Mladenovič, and J.S. Šuput, Lightweight aggregate based on waste glass and its alkali-silica reactivity, Cem Concr Res, 32, 2002. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00663-9.
- [14] S.P. Muñoz Pérez, J.F. Santisteban Purizaca, S.M. Castillo Matute, et al., Glass fiber reinforced concrete: overview of mechanical and microstructural analysis, Innov. Infrastruct. Solut. 9, 116, 2024. https://doi.org/ 10.1007/s41062-024-01429-1.
- [15] H.Z. Hassan, and N.M. Saeed, Fiber reinforced concrete: a state of the art, Discov Mater 4, 101, 2024. https://doi.org/10.1007/s43939-024-00171-w.

- [16] E.J. Barbero, Introduction to composite materials design, third edition, 2017. https://doi.org/ 10.1201/9781315296494.
- [17] A. Çavdar, Investigation of freeze-thaw effects on mechanical properties of fiber reinforced cement mortars, Compos B Eng, 58, 2014. https://doi.org/ 10.1016/j.compositesb.2013.11.013.
- [18] T. Simões, H. Costa, D. Dias-da-Costa, and E. Júlio, Influence of type and dosage of micro-fibres on the physical properties of fibre reinforced mortar matrixes, Constr Build Mater, 187, 2018. https://doi.org/ 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.058.
- [19] L. Fenu, D. Forni, and E. Cadoni, Dynamic behaviour of cement mortars reinforced with glass and basalt fibres, Compos B Eng, 92, 2016. https://doi.org/ 10.1016/j.compositesb.2016.02.035.
- [20] M. Rezania, H. Moradnezhad, M. Panahandeh, M.J. Rahimpoor Kami, A. Rahmani, and B.V. Hosseini, Effects of Diethanolamine (DEA) and Glass Fibre Reinforced polymer (GFRP) on setting time and mechanical properties of shotcrete, Journal of Building Engineering, 31, 2020. https://doi.org/10.1016/ j.jobe.2020.101343.
- [21] M.T. Cihan, and Y.E. Avşar, Predictability of the Mechanical Properties of Glass Fibrous Mortar, Arab J Sci Eng, 48, 2023. https://doi.org/10.1007/s13369-022-07018-7.
- [22] R.H. Myers, D.C. Montgomery, and C.M. Anderson-Cook, Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using ... - Raymond H. Myers, Douglas C. Montgomery, Christine M. Anderson-Cook - Google Books, Wiley (2009).
- [23] TSE, TS EN 196-1 Methods of testing cement Part 1: Determination of strength, Turkish Standards Institute, Ankara, 2016.
- [24] C. Shi, Y. Wu, C. Riefler, H. Wang, Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders, Cem Concr Res, 35, 2005. https://doi.org/10.1016/ j.cemconres.2004.05.015.

- [25] L.A. Pereira-De-Oliveira, J.P. Castro-Gomes, and P.M.S. Santos, The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components, Constr Build Mater, 31, 2012. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.110.
- [26] R. Idir, M. Cyr, and A. Tagnit-Hamou, Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet, Cem Concr Compos, 33, 2011. https://doi.org/10.1016/ j.cemconcomp.2010.09.013.
- [27] M. Liu, Incorporating ground glass in self-compacting concrete, Constr Build Mater, 25, 2011. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.092.
- [28] M. Mirzahosseini, and K.A. Riding, Influence of different particle sizes on reactivity of finely ground glass as supplementary cementitious material (SCM), Cem Concr Compos, 56, 2015. https://doi.org/10.1016/ j.cemconcomp.2014.10.004.
- [29] A. Karamberi, and A. Moutsatsou, Participation of coloured glass cullet in cementitious materials, Cem Concr Compos, 27, 2005. https://doi.org/10.1016/ j.cemconcomp.2004.02.021.
- [30] J. xin Lu, Z. Hua Duan, and C.S. Poon, Combined use of waste glass powder and cullet in architectural mortar, Cem Concr Compos, 82, 2017. https://doi.org/10.1016/ j.cemconcomp.2017.05.011.
- [31] TSE, TS EN 1015-3 Methods of test for mortar for masonry- Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table), Turkish Standards Institute (2000).
- [32] TSE, TS EN 12390-6 Testing hardened concrete Part 6: Tensile splitting strength of test specimens, Turkish Standards Institute (2024).
- [33] G.E.P. Box, and D.R. Cox, An Analysis of Transformations, Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 26, 1964. https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1964.tb00553.x.
- [34] N. Kaemingk, Stat-Ease, Statease (2018).



NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 588-596



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

Araștırma makalesi / Research article

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



Farklı tatlandırıcılar ve kaymak kullanımı ile üretilen Höşmerim tatlısının akrilamid içeriği ve bazı özellikleri

Acrylamide content and some properties of Höşmerim dessert produced by using clotted cream and different sweeteners

Gamze Mutlu¹, Sümeyra Uğur^{2,*}, Bedia Şimşek³

^{1,2,3} Süleyman Demirel Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta Türkiye

Öz

Geleneksel bir tatlı olan Höşmerim, bu çalışmada peynir yerine kaymak kullanılarak ve aspartam, stevia, şeker ve şeker-stevia karışımı tatlandırıcılar ile üretilmiştir. Höşmerim tatlılarına, depolamanın 1. ve 10. günlerinde fizikokimyasal, mikrobiyolojik ve duyusal analizleri ile Kromatografi-Kütle GC-MS (Gaz Spektrometresi) cihazında akrilamid analizi yapılmıştır. Höşmerim örneklerinin renk değerleri arasındaki istatistiksel fark bulunmuştur (p<0.05). Höşmerim önemli tatlisi örneklerinin akrilamid miktarı, en yüksek 0.39±0.01 mg/kg olarak tespit edilmistir. Depolama süresince stevia-seker karışımı ve yalnız stevia ilaveli Höşmerim örneklerinin akrilamid içerikleri en düşük düzeyde belirlenmiştir. Höşmerim örneklerinde genel kabul edilebilirlik puanı, sırası ile en yüksekten başlayarak şeker, stevia, şeker-stevia karışımı ve aspartam ilaveli Höşmerim olarak tespit edilmiştir. Bu çalışma, geleneksel tatlılarımızdan olan Höşmerimde stevianın tek başına ya da farklı oranlarda şeker ile karıştırılarak kullanıldığında akrilamid oranının son derece düsük olarak belirlenebileceğini, ancak duyusal kabulünün şeker ilavesi kadar iyi olmadığını ortaya koymuştur.

Anahtar kelimeler: Kaymak, Höşmerim, Aspartam, Stevia, Akrilamid

1 Giriş

Türkiye'de ve dünyada içerisinde süt ürünleri bulunduran, global ve geleneksel olarak üretilen ve tüketilen tatlılardan biri de Höşmerimdir [1]. Höşmerim; un, tereyağı, şeker, tuzsuz taze peynir/kaymak ile yapılan bir tatlıdır [2]. Balıkesir ve birçok yörede Höşmerim üretiminde peynir (tuzsuz ve taze), kullanılırken; Tekirdağ yöresinde ise yumurta kullanılmamakta ve irmik yerine un kullanılmaktadır. Çanakkale ve Biga yörelerinde ise peynir pıhtısının suyu uzaklaştırıldıktan sonra pıhtı biraz kavrulmakta ve üzerine irmik, şeker gibi diğer bileşenler ilave edilmektedir. Üretilen tatlı daha sonra sıcak olarak tüketilmektedir [3, 4]. İç Anadolu (özellikle Konya ve Ankara) bölgesinde ise Höşmerim üretiminin en önemli farklılığı, peynir yerine kaymak kullanılmasıdır. Kaymak

Abstract

In this study, the traditional dessert Höşmerim was produced with clotted cream instead of cheese and sweeteners such as sugar, stevia, aspartame, and a sugarstevia mixture. On the first and tenth days of storage, the Höşmerim desserts were examined for physicochemical, microbiological, and sensory analyses, as well as acrylamide analysis using a GC-MS (Gas Chromatography-Mass Spectrometry) device, on the 1st and 10th days of storage. The statistical difference between the color values of the Hösmerim samples is significant (p<0.05). The samples of Hösmerim dessert had the greatest acrylamide concentration, measuring 0.39±0.01 mg/kg. The acrylamide content of the Hösmerim samples having a stevia-sugar mixture and those containing solely stevia was found to be at its lowest level during the storage period. The overall acceptance scores of the Höşmerim samples were ordered from highest to lowest: sugar, stevia, sugar-stevia mixture, and aspartame-added Höşmerim. This study has demonstrated that when stevia is used alone or in varying amounts with sugar in our traditional dessert, Höşmerim, the acrylamide level can be incredibly low; yet its sensory acceptability is not as good as that of added sugar.

Keywords: Clotted cream, Höşmerim, Aspartame, Stevia, Acrylamide

unla istenilen kıvama kadar kavrulduktan sonra içerisine süt ve şeker ilave edilmektedir [5]. Son yıllarda Geleneksel Mutfak Sanatlarının yaşatılması ve sürdürülebilir turizmin sağlanması amacıyla yöresel yemek kültürü üzerine yapılmış araştırmalarda dikkat çekicidir. Bir çalışmada, Ankara ili Höşmerim tatlılarının genel özellikleri belirlenirken Höşmerim kelimesinin "Hoş" ve "Maram" kelimelerinden yani tatlı ve kaymak kelimelerinden ortaya çıktığı belirtilmiştir. Bu anlamda her ne kadar yörelerde Höşmerim tatlısı peynir tatlısı olarak bilinse de ismini içerisinde de kullanılan kaymaktan almaktadır [6].

Gıdalarda geleneksel olarak kullanılan bal, pekmez, yerine pancar şekerinin kullanılması ile değişen geleneksel Türk tatlıları son yıllarda bazı doğal ve yapay tatlandırıcılarında kullanılmaya başlamasıyla yeni bir değişim süreci içinde olarak değerlendirilebilir [7]. Sukroz,

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sumeyraugr@gmail.com (S. Uğur) Geliş / Received: 21.11.2024 Kabul / Accepted: 26.02.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngumuh.1587053

stevia gibi tatlandırıcılar doğal tatlandırıcı grubunda yer alırken, sakkarin, siklamat, dulcin, aspartam gibi tatlandırıcılar yapay tatlandırıcı grubunda yer almaktadır [8, 9]. *Stevia rebaudiana* bitkisinden elde edilen stevia; sakkarozdan daha tatlı olması, ısı ve pH stabilitesinin yüksek olmasının yanında metalimsi bir tat bırakmaması nedeni ile birçok gıdanın (sıcak-soğuk içecek, şekerleme sanayi, fırıncılık ürünleri, bazı süt ürünleri gibi) üretiminde kullanılmaktadır [10]. Gıda İlaç Birliği (FDA) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO) verilerine göre aspartam günlük alım miktarının 40-50 mg/kg (vücut ağırlığı) aralığında olduğu bildirilmiştir [11].

Höşmerim tatlısı ile ilgili bazı araştırmalar yapılmıştır. Seçim [1] Höşmerim tatlısının kurumadde içeriğini %57-59, yağ oranını %21-23, %laktik asit düzeyini 0.4-0.6 ve %kül değerini 0.6-1 olarak belirtmiştir. Farklı helva tiplerinde toksik ve mikro olarak nitelendirilen elementlerin tespit edildiği bir çalışmada Höşmerimlerin en düşük seviyede mikro element içerdikleri ifade edilmiştir [12]. Balıkesir ilinde satışa ve tüketime sunulan Höşmerim (peynir helvası) tatlılarının mikrobiyolojik özelliklerinin incelendiği araştırmalarda, Escherichia coli ye örneklerde rastlanmazken, Listeria monocytogenes ve diğer gıda kaynaklı patojenler için bu tatlının bir risk grubunda olabileceği belirtilmiştir [13, 14]. Ayrıca Höşmerimin kalite özelliklerini iyileştirmek amacıyla; farklı tatlandırıcı (stevia, laktitol gibi), farklı katkı maddesi (amaranth unu, lor, inek, koyun, keçi peyniri gibi) ve farklı starter kültür (Lactococcus lactis, Lactococcus. cremoris, Lactobacillus bulgaricus, Streptococcus thermophilus, Lactobacillus acidophilus, Streptococcus filant) ilaveli Hösmerim denemeleri yapılarak fiziksel, kimyasal, mikrobiyolojik ve duyusal özelliklerin tespit edildiği çalışmalar da bulunmaktadır [1, 3, 15, 16].

Karbonhidrat ve protein içerikli gıdaların hazırlanma şekillerine göre ısıl işlemler (kavurma, kızartma, fırınlama gibi) sırasında yüksek sıcaklık etkisi ile (120°C ve daha yüksek) bir aminoasit olan asparajin ile indirgen şekerlerin reaksiyonu sonucu akrilamid adı verilen bileşik oluşmaktadır. Gıdalarda kanserojenik bir bileşik olarak bilinen akrilamid miktarı; pH değeri, uygulanan ısıl işlemin sıcaklık derecesi ve süreye bağlı olarak miktarı değişebilmektedir. Akrilamid, patates ve mısır cipsi, fırın ürünleri (ekmek, kek, bisküvi, kraker vb.), kahvaltılık tahıl ürünleri, kavrulmuş kuruyemiş (ayçiçeği çekirdeği, fındık, badem, soya fasulyesi, vb.) ve helva gibi gıdalarda bulunabilmektedir [17, 18]. Tahin helvalarında akrilamid miktarının ölçülebilir değerin altında olduğu belirtilirken peynir helvası için yapılan tek araştırmada bulunan değer Avrupa Birliği tarafından bildirilen yasal sınırlardan daha yüksek olarak tespit edilmiştir [19, 20].

Höşmerim tatlısı yüksek sıcaklıkta uzun süre kavrularak üretilen şeker ve protein içeren bir ürün olmasından dolayı akrilamid içeriği önemlidir. Bu alanda kaymak kullanılarak üretilen Höşmerim tatlısının akrilamid içerikleri üzerine yapılmış bir araştırmaya rastlanmamıştır. Ayrıca Höşmerim tatlısının sadece kaymaktan üretildiği, yapay ve doğal tatlandırıcıların değerlendirildiği helva ya da höşmerim ismi ile bilenen bir tatlı üzerine herhangi bir araştırmada bulunmamaktadır. Bu çalışmada, geleneksel tatlılarımızdan olan Höşmerim tatlısının peynir yerine kaymak kullanılarak (sıvı yağ kullanılmadan sadece kaymak ile) İç Anadolu Bölgesinin yapım teknikleri ve malzemeleri dikkate alınarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekerli ürün kullanmayı tercih etmeyenler için doğal ve yapay tatlandırıcılar (stevia ve aspartam) kullanılarak geleneksel Höşmerim tatlısının diyabetik, diyetetik ve akrilamid içeriği düşük alternatif bir ürün olarak üretilebilirliğini değerlendirmek amacıyla yapılan bu çalışmada, tatlandırıcıların ve kaymağın Höşmerim tatlısına etkileri fizikokimyasal, mikrobiyolojik ve duyusal analizler ile değerlendirilmiştir.

2 Materyal ve metot

2.1 Materyal

Çalışmada kullanılan kaymak (%60 yağ) (Isparta Ünsüt Süt ve Süt Ürünleri İşletmesi), un (Karaman Un), stevia (Takita tablet; steviol glikozit RebA, laktoz, sodyum bikarbonat, sodyum sitrat, L-lösin, sodyum karboksi metil selüloz), aspartam (Canderal tablet), pastörize süt ve şeker piyasadaki firmalardan temin edilmiştir. Kaymaklı Höşmerim tatlısı Süleyman Demirel Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında (Isparta-Türkiye) üretilmiştir.

2.2 Metot

2.2.1 Kaymaklı Höşmerim üretimi

Kaymaklı Höşmerim üretiminde Can [2] ve Ünal [3] yöntemlerinden çalışmalarında bildirilen üretim yararlanılmıştır. Öncelikle kaymak (1250 g) ve un (625 g) 120±10°C'de 20 dakika kavrulmuştur. Daha sonra süt (500 ml) ilave edilmiştir. Hazırlanan karışım daha sonra 4 bölüme ayrılmıştır. İlk kısma tatlandırıcı olarak stevia (12.5 g)/toz şeker (625 g) karışımı (KH), ikinci kısma sadece toz şeker (1250 g) (SH), üçüncü kısma stevia (25 g)(TH) ilave edilmiştir. Tüm kısımlara 120±10°C, 20 dakika daha pişirme işlemi uygulanmıştır. Ayrılan dördüncü kısma aspartam (20 g) (AH) eklenmiştir. Aspartam yüksek sıcaklıklardan etkilendiği için ürün sıcaklığı yaklaşık 30°C düştüğünde eklenmiştir ve diğer örneklere uygulanan tekrar bir pişirme işlemi bu örneğe uygulanmamıştır [21]. Üretim akış şeması Şekil 1'de, kaymak ve farklı tatlandırıcılar kullanılarak üretilen Höşmerim tatlısı görünümleri Şekil 2'de verilmiştir. Araştırmada kullanılan tatlandırıcıların duyusal olarak tatlılık düzeyleri eşit olmadığı için, yapılan ön denemeler sonucunda alışılmış şeker tatlılığı ile aynı seviye tatlılık oluşacak şekilde stevia ve aspartam kullanılmaya çalışılmıştır. Çalışma üç kez yinelenerek gerçekleştirilmiştir. Höşmerim örnekleri depolanmış (4±2°C) ve depolamanın ilk ve son günü (10. gün) kurumadde (%), pH, titrasyon asitliği (%), su aktivitesi, kül (%), yağ (%), protein (%), akrilamid, tekstür ve renk ile mikrobiyolojik ve duyusal analizleri yapılmıştır.



Şekil 1. Farklı tatlandırıcılar ile Höşmerim tatlısı (Kaymaklı) üretimi [2,3,21]



Şekil 2. Kaymak ve farklı tatlandırıcılar kullanılarak üretilen Höşmerim tatlısı görünümleri (AH; aspartam ilaveli, KH; stevia ve şeker ilaveli, SH; şeker ilaveli, TH; stevia ilaveli)

2.2.2 Fizikokimyasal analizler

Höşmerim örneklerinin kurumadde (%KM), pH (Weilheim, Almanya), % titrasyon asitliği, su aktivitesi (aw) (Novasina, Lab Touch, İsviçre) ve kül (%) tayinleri yapılmıştır [3, 22]. Örneklerin %yağ değeri Gerber metodu, protein değeri (%) (Gerhardt Dumatherm, Almanya) Dumas metodu ile 6.25 faktörü ile çarpılarak belirlenmiştir [23, 24].

2.2.3 Akrilamid analizi

Höşmerim örneklerinde akrilamid analizi Ölmez vd. [20], çalışması modifiye edilerek ve GC-MS (Gaz Kromatografi-Kütle Spektrometresi-Agilent 7890A GC 5975C MS) kullanılarak yapılmıştır. 1 g Höşmerim örneği üzerine, 10 ml %0.1 formik asit eklenerek 0°C'de 20 dk santrifüjlenmiştir. Sulu ekstrakttan alınarak (2 ml) önce fitreden (0.45 µm'lik) daha sonra aseton (2 ml) ve formik asit (%0.1, 2 ml) SPE (CarboPrep [™] 200) tüpünden geçirilmiştir. SPE tüpü su ile yıkanarak (1 ml), 1 dk kurutma amaçlı vakumlanmıştır. Daha sonra süzüntü viale alınarak cihaza enjekte edilmiştir. DB-Wax kolon (30 m x 0.25 mm; film kalınlığı 0.2 µm) kullanılmış örnek 60°C'de 60 saniye bekleme sonrası 20°C/dk'lık artışla 240°C'de 20 dakika tutulmuştur. Enjeksiyonda kullanılan helyum (1 ml min⁻¹, mod (SIM) (m/z = 71), hacim 1 μ L sırasıyla dedektör ve enjektör sıcaklığı 240°C ve 250°C olarak ayarlanmıştır. Akrilamid miktarını hesaplamada kullanılan kalibrasyon eğrisi Şekil 3'te, elde edilen standart kromatogram ait grafik ise Sekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 3. Akrilamid standardı ile oluşturulan kalibrasyon grafiği



Şekil 4. Akrilamid standardına ait kromatogram

2.2.4 Fiziksel analizler

2.2.4.1 Tekstür analizi

Höşmerim örneklerinin tekstür değerlerinin (sertlik ve yapışkanlık) belirlenmesinde tekstür analiz cihazından (Texture Stable Micro Systems, TA-XT Plus, İngiltere) yararlanılmıştır. Höşmerim tatlısı örneği bir beher içerisine (100 ml) hava boşluğu olmayacak şekilde doldurulmuştur. Kap üzerine 12 mm'lik prob 1 mm/s'lik hızla 10 mm derinliğe 1 kN kuvvet ile ölçüm gerçekleştirilerek sertlik ve yapışkanlık düzeyi ölçülmüştür [3].

2.2.4.2 Renk analizi

Höşmerim örneklerinin renk ölçümleri, renk analiz cihazı (Minolta CR 400 model Osaka, Japan) ile belirlenerek, elde edilen değerler (Y, Z) Denklem (1) ve (2)'de yerine yazılarak sarılık ve parlaklık değerleri bulunmuştur [2].

$$Sarılık = \frac{100x(Y - 0.847Z)}{Y}$$
(1)

$$Parlaklık = 3.338xZ - 3$$
(2)

2.2.5 Mikrobiyolojik analizler

Mikrobiyolojik analizler için örneklerin hazırlanmasında uygun dilüsyonlar oluşturulmuş ve koliform grubu mikroorganizmaların tespit edilmesinde Eosin Methylen Blue Agar (EMB); maya-küf grubu mikroorganizmaların belirlemesi amacıyla da Patato Dextrose Agar (PDA) ile sayımlar gerçekleştirilmiştir [2, 15, 25].

2.2.6 Duyusal analiz

Höşmerimlerin duyusal analizi depolama günlerinde (1. ve 10. gün) Süleyman Demirel Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümünde eğitimli 10 panelist (6 kadın, 4 erkek) tarafından yapılmıştır. Depolanan Höşmerim örnekleri (4 °C) duyusal analiz için oda sıcaklığına gelinceye kadar bekletilmiş ve her bir örnekten yaklaşık 30 g olacak şekilde hazırlanmıştır. Test parametreleri (görünüş, renk, yapı, tat ve koku) 1-5, parametrelerin detaylı değerlendirilmesi (renk; beyaz-sarı, mat-parlak, yapı-kıvam; sertlik, pütürlülük, yapışkanlık, taneli yapı, koku; yanık, un, ekşi ve hayvansal ürün kokusu) ve kabul edilebilirlik puanlaması 1-9 puan aralığında yapılmıştır [2].

2.2.7 İstatistiksel analizler

İstatistiksel değerlendirmeler, SPSS 17.0 programı yardımı ile Tukey HSD testi (p<0.05) kullanılarak yapılmıştır [26].

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Höşmerimlerin fizikokimyasal özellikleri

1'de kaymaklı Tablo Höşmerim örneklerinin %kurumadde oranları arasındaki istatistiksel fark önemli bulunmuştur. Stevialı (TH) örneğin %kurumadde değerinin depolama ile değiştiği (p<0.05), fakat şekerli (SH), aspartamlı (AH) ve stevia-şeker karışımlı (KH) örneklerin ilk gün örnekleri ile benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Depolama süresince en düşük %kurumadde içeriği stevialı (TH) örnekte görülürken, en vüksek %kurumadde iceriği sekerli (SH) örnekte görülmüstür. Aspartamlı (AH), stevialı (TH) ve stevia-şeker karışımlı (KH) Höşmerim örneklerinin %kurumadde oranı literatürdeki peynir helvası çalışmaları ile benzerlik gösterirken, şekerli Höşmerim (SH) örneğinin %kurumadde oranı daha fazla bulunmuştur [3, 15, 16]. Tatlılık derecelerine göre tatlandırıcı katım oranı değiştiğinden, %kurumadde değerleri de benzer şekilde farklılık göstermiştir. Ünal [3], tarafından farklı oranlarda şeker ve laktitol kullanılarak üretilen peynir helvalarının %kurumadde miktarlarında da benzer şekilde kurumadde azalması gözlenmiştir.

Kaymaklı höşmerim örneklerinin depolama süresince pH değerlerindeki değişim Tablo 1'de verilmiştir. Örneklerin pH değerleri arasındaki fark istatistiksel olarak önemli bulunmuştur (p<0.05). Şekerli (SH) örneğin pH değerinin depolamadan etkilenmediği fakat stevialı (TH), aspartamlı (AH) ve stevia-şeker karışımlı (KH) örneklerin etkilendiği belirlenmiştir. Bu durumun kurumadde içeriğinin şekerli üründe daha yüksek olması ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Şekerli (SH) Höşmerim örneğinin pH değeri yapılan peynir helvası çalışmaları ile benzerlik göstermektedir [3, 15, 16].

Höşmerimlerin titrasyon asitlik değeri incelendiğinde örnekler arasındaki istatistiksel farkın önemli olduğu belirlenmiştir (p<0.05). Tablo 1'de aspartamlı Höşmerim (AH) örneğinin asitlik değerinin depolama sürecinden etkilenmediği; kaymak ile üretilen Höşmerim tatlılarının asitlik değerinin (%0.05-0.10) Can [2], Ünal [3] ve Çetintaş [16] çalışmalarında bulunan titrasyon asitliği değerlerinden düşük olduğu belirlenmiştir. Bu durumun nedeninin Höşmerim üretiminde peynire göre daha düşük titrasyon asitliğine sahip olan yağ oranı yüksek kaymak kullanılması ile ilişkili olduğu tahmin edilmektedir.

Höşmerim yüksek sıcaklıkta pişirilen bir üründür ancak Tablo 1'de verilen su aktivitesi (aw) değerleri depolama süresince bu tatlının mikroorganizmalar için uygun bir ortam olabileceği yönündedir. Tablo 1 incelendiğinde; Aspartamlı ve stevialı Höşmerim (AH, TH) örnekleri benzer su aktivitesi sonuçları (0.95) verirken; şekerli Höşmerim örneğinin (SH) su aktivitesi değeri (0.85) nispeten daha düsük bulunmustur (p<0.05). Hösmerimde aspartam ve stevia ilavesinin su aktivitesi üzerinde etkisi olduğu düşünülmektedir. Bu durum sekerden kaynaklı örneklerin kurumadde içerikleri ile ilişkili olabilir. Hindistan cevizi marmelat üzerine yaptıkları çalışmada Kaya vd. [27], kurumadde arttıkça su aktivitesi değerlerinde bir düşme meydana geldiğini bildirmişlerdir. Farklı oranlarda amarant unu ve stevia ilaveli peynir helvası üzerine yapılan bir çalışmada amarant/stevia ilavesinin su aktivitesi üzerinde etkisi olmadığı ve örneklerin su aktivitesi değerlerinin 0.87-0.89 aralığında olduğu bildirilmiştir [16]. Kaymaklı Höşmerim örneklerinin su aktivitesi değerleri bu üzerinde bulunmustur. Burada aralığın Hösmerim üretiminde kullanılan peynirin su aktivitesi üzerine etkili olduğu farklılığın buna bağlı olabileceğini düşündürmüştür.

Örneklerin kül oranı depolama süresince istatistiksel olarak önemli bir değişim göstermemiştir. Ancak % kül değeri için örnekler arasındaki farklılıklar önemlidir (p<0.05) (Tablo 1). En yüksek kül oranı stevialı Höşmerimde (TH) görülürken; en düşük kül oranı aspartamlı Höşmerimde (AH) görülmüştür. Bu durum üzerinde ilave edilen stevia miktarının etkisi olabileceği düşünülmektedir. Kulthe vd. [28], yaptıkları çalışmada farklı oranlarda yağsız soya unu, seker yerine ise farklı oranlarda stevia yaprağı tozu kullanılarak üretilen bisküvilerde, %30 stevia ilave edilmesinin kül içeriklerini %0.07 oranında yükselttiğini bildirmiştir. Çetintaş [16], tarafından yapılan çalışmada amarant unu/stevia ilaveli peynir helvası örneklerinin kül oranı (%1.19-1.60) kaymaklı Höşmerim örneklerinin kül oranından daha yüksek olarak belirlenmiştir. Tablo 1 incelendiğinde, şekerli Höşmerim (%20.00) ve stevia-şeker karışımlı Höşmerim (%26.88) örnekleri şeker içerdikleri için kurumadde değerleri yüksek olup bu nedenle diğer stevialı Höşmerim (%35.63) ve aspartamlı Höşmerim (%36.13) örneklerine göre yağ oranları daha düşük belirlenmiştir (p<0.05). Daha önce yapılan çalışmalarda genellikle peynir helvası üzerinde çalışılmıştır [2, 3, 15, 16]. Kaymakta yağ oranının peynire göre fazla olması sebebiyle bu çalışmada Höşmerimde bulunan yağ oranı literatürdeki peynir helvası bulgularından daha yüksek belirlenmiştir.

Kaymaklı Höşmerim örneklerinin protein analiz sonuçları (Tablo 1) incelendiğinde; en yüksek protein oranı aspartamlı Höşmerimde (AH), en düşük protein oranı ise şekerli Höşmerimde (SH) bulunmuştur (p<0.05). Depolama süresince şeker ilaveli örnek dışında diğer tüm örneklerde protein oranı depolamanın ilk gününe göre düşük olarak tespit edilmiştir. Toplam kurumadde içerisindeki protein yağ ve karbonhidrat yüzdesi değiştiğinden ve protein toplam kurumaddde üzerinden hesaplandığından böyle bir değişiklik görüldüğü düşünülmektedir. Peynir helvası üzerine yapılan çalışmalarda, peynirlerde protein içeriğinin yüksekliği ile ilişkili olarak protein değerlerinin daha yüksek olduğu bildirilmiştir [3, 16]. Protein içeriği yüksek bir ürün takviyesi yapıldığı için protein artışı doğal olarak yüksek belirlenmiştir. Brennan ve Samyue [29], un, yağ, su seviyeleri ve pişirme ve depolamada oluşan parametrelerin biyokimyasal ve fizikokimyasal reaksiyonları (su buharlaşması, protein denatürasyonu ve Maillard reaksiyonu) etkilediğini ve ürün özelliklerini değiştirdiğini belirtmiştir.

3.2 Akrilamid içeriği

Depolama süresince en yüksek akrilamid değeri (Tablo 1) aspartamlı Höşmerim örneğinde (AH; 0.39 mg/kg), en düşük stevialı höşmerim örneğinde (TH; 0.08 mg/kg) belirlenmiştir (p<0.05). Avrupa Birliğinde izin verilen gıdalarda günlük akrilamid alım miktarı 0.5-0.8 µg/kg olarak verilmiştir [30]. Kaymaklı Höşmerim örneklerinin akrilamid değerleri belirtilen değerden büyük bulunmuştur. Ayrıca stevialı Höşmerim (TH) örneğinde akrilamid değeri su için izin verilen değerin üstünde saptanmıştır. Akrilamidin (monomerik form) yüksek sıcaklıkta karbonhidratların ve aminoasitlerin birlikte etkileşimi ile oluşan bir maddedir [31]. Bir çalışmada, helvada akrilamid değeri ortalama 0.093 mg/kg olarak bulunmuştur [20].

Fabla 1	V		r 🙂	·····		- 1-:	1	(-2)	
i adio 1	Кау	ymakii F	loşmerim	ornekieri	nin fiziko	okimyasai	sonuçıarı	(n=3)	

Fizikokimyasal	Kaymaklı	Depolama S	üresi (gün)*
Özellikler	Örnekleri†	1	10
	AH	67.93 ± 0.34^{d}	68.41±0.82 ^d
	KH	$74.49{\pm}0.90^{b}$	74.91±0.51 ^b
%Kurumadde	SH	79.17±0.10 ^a	79.41±0.37ª
	TH	67.68 ± 0.13^{d}	69.49±0.02°
	AH	6.17±0.04°	6.73±0.08 ^b
	KH	$6.74{\pm}0.04^{b}$	$7.00{\pm}0.09^{a}$
pН	SH	$6.70{\pm}0.10^{b}$	$6.66 {\pm} 0.16^{b}$
	TH	6.23±0.03°	7.11±0.09ª
	AH	$0.10{\pm}0.01^{cd}$	0.10±0.03 ^{cd}
	KH	$0.05{\pm}0.01^{cd}$	$0.08 {\pm} 0.01^{\rm bc}$
Titrasyon Asitliği (%)	SH	0.10±0.01ª	0.10±0.01°
	TH	$0.09{\pm}0.03^{\rm bc}$	0.07 ± 0.02^{b}
	AH	0.95±0.00ª	$0.95{\pm}0.00^{a}$
	KH	$0.89{\pm}0.00^{\rm b}$	$0.90{\pm}0.00^{b}$
Su Aktivitesi (a _w)	SH	0.85±0.01°	$0.85{\pm}0.00^{\circ}$
	TH	$0.95{\pm}0.00^{a}$	$0.95{\pm}0.00^{a}$
	AH	0.32±0.31 ^b	0.36±0.09 ^b
	KH	0.49±0.21 ^b	$0.66{\pm}0.04^{b}$
%Kül	SH	$0.36{\pm}0.03^{b}$	$0.48{\pm}0.03^{b}$
	TH	0.95±0.12ª	$1.03{\pm}0.02^{a}$
	AH	35.50±0.50ª	36.13±1.13ª
	KH	28.63±1.63 ^b	26.88 ± 1.88^{b}
%Yağ	SH	20.50±0.50°	$20.00 \pm 0.50^{\circ}$
	TH	33.38±0.63ª	35.63±0.63ª
	AH	$5.76{\pm}0.46^{ab}$	5.04 ± 0.42^{abc}
	KH	4.70±0.20°	$3.62{\pm}0.44^{de}$
%Protein	SH	2.55±0.20°	$4.59{\pm}0.49^{cd}$
	TH	5.96±0.09ª	$5.47{\pm}0.52^{abc}$
	AH	0.38±0.02ª	0.39±0.01ª
	KH	$0.17{\pm}0.02^{d}$	$0.17 {\pm} 0.01^{d}$
Akrilamid (mg/kg)	SH	0.27±0.01°	0.34 ± 0.02^{b}
	TH	0.08±0.01°	0.11±0.02°

*Harfler örnekler arasındaki farkın önemli olduğunu göstermektedir (p<0.05).

†AH; aspartam ilaveli, KH; stevia ve şeker ilaveli, SH; şeker ilaveli, TH; stevia ilaveli.

Yapılan çalışmalarda Höşmerim genellikle peynir gibi yüksek protein içeriğine sahip bir ürün ile şekerli olarak üretilmektedir. Kaymaklı Höşmerimlerin kaymak içeriğine bağlı olarak protein oranı düşüktür. Bu durum akrilamid miktarlarının peynirli Höşmerimlerden daha düşük oranlarda tespit edilmesi ile ilişkilendirilebilir.

3.3 Höşmerimlerin fiziksel özellikleri

3.3.1 Tekstür değerleri

Kaymaklı Höşmerim örneklerinin depolama süresince sertlik değerlerindeki değişim Tablo 2'de verilmiştir. Sertlik değeri üzerinde depolamanın ve tatlandırıcıların etkisi olduğu görülmektedir (p<0.05). Depolama süresince en düşük sertlik değeri stevia-şeker karışımlı Höşmerim örneğinde (5.99 N) belirlenirken, en yüksek sertlik değeri stevialı Höşmerim örneğinde (17.22 N) belirlenmiştir. Kaymaklı Höşmerimlerin sertlik değerleri literatürdeki peynir helvası çalışmaları ile benzerlik göstermektedir [1, 3, 16]. Tablo 2'de yapışkanlık değeri üzerinde depolamanın ve tatlandırıcıların etkisinin önemli olduğu görülmektedir (p<0.05). Şeker içeren Höşmerim örnekleri (SH ve KH) yüksek yapışkanlık değerine sahipken, stevialı Höşmerim örneği (TH) düşük yapışkanlık değeri göstermiştir. Literatürde benzer bulgulara rastlanmaktadır. Ünal [3], yaptığı çalışmada farklı oranlarda laktitol ve sakaroz ilavesiyle üretilen peynirli helvada oranlar arttıkça yapışkanlık değerlerinin arttığını belirtmiştir. Yapılan diğer bir çalışmada peynir helvasına stevia ilavesi ile yapışkanlık değerinde önemli bir etki olmadığı ancak amaranth unu

ilavesiyle yapışkanlık değerinde azalış olduğu sonucuna varılmıştır [16].

3.3.2 Renk değerleri

Sarılık değeri üzerinde depolamanın etkisinin ve örneklerde kullanılan tatlandırıcıların etkisinin önemli olduğu (p<0.05) görülmüştür. Höşmerim tatlıları arasında en sarı olan stevia ilave edilmiş TH örneği iken, şeker ilave edilmiş SH ve KH örneklerinin sonuçlarının birbirine benzer olduğu gözlenmiştir. Yapılan bir çalışmada inek, keçi ve koyun peyniri telemelerinden elde edilen şekerli höşmerim örneklerinin 14 günlük depolama süresince sarılık değeri 11.99 ile 34.40 aralığında saptanmıştır [1]. Çalışmamızdaki şekerli Höşmerim (SH) örneklerinin sarılık değeri bu çalışma ile benzerlik göstermektedir. Aspartam ve stevia ilavesi ile üretilen örneklerde kurumadde daha düsük ama vağ iceriği daha yüksek olduğu için şeker içeren örneklere göre değer daha yüksek olarak bu değer tespit edilmiştir. Erbay vd. [32], Hellim peynirleri üzerine yapmış oldukları araştırmada bu görüşü destekleyen veriler paylaşmışlardır. Höşmerimlerin parlaklık değeri (Tablo 2) üzerinde depolamanın ve tatlandırıcıların etkisinin önemli olduğu görülmüştür (p<0.05). Höşmerimler arasında en parlak olanın KH örneği; parlaklık özelliği en düşük olanın ise AH örneği olduğu tespit edilmiştir. Kullanılan Höşmerim içerisindeki şekerin parlaklık değeri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır. Höşmerimde farklı starter kültür kullanımının araştırıldığı bir çalışmada örneklerin ortalama parlaklık değerine yakın sonuçlar (-15,88 ile -27,49) elde edilmistir [2].

Tablo 2. Kaymaklı Höşmerim örneklerinin fizikokimyasal sonuçları (n=3)

Fiziksel Analizler	Kaymaklı	Depolama Süresi (gün)*			
	Höşmerim Örnekleri†	1	10		
	AH	8.48±0.58°	15.07±0.96 ^b		
	КН	5.99 ± 1.47^{d}	$15.42{\pm}1.46^{ab}$		
Sertlik (N)	SH	7.24 ± 0.43^{cd}	$7.76{\pm}1.98^{cd}$		
	TH	6.36 ± 1.31^{d}	17.22±0.04ª		
	AH	-0.630 ± 0.000^{d}	-0.59±0.006e		
	KH	-0.760±0.006°	-1.14±0.006ª		
Yapışkanlık (N)	SH	$-0.580{\pm}0.000^{ m f}$	-1.01 ± 0.000^{b}		
	TH	$-0.480{\pm}0.006^{h}$	-0.49 ± 0.006^{g}		
	AH	45.78±0.69ª	44.50±1.02ª		
	KH	34.61±0.84°	$39.98{\pm}1.46^{b}$		
Sarılık	SH	34.54±0.05°	36.33±1.68°		
	TH	46.22±0.06ª	46.53±0.77ª		
	AH	-24.80±1.90 ^{ab}	-30.43±1.86ª		
	KH	-5.49 ± 0.92^{f}	-16.29±1.39 ^{cd}		
Parlaklık	SH	-6.59±0.12°	-11.56±1.82 ^{de}		
	TH	-24.80±1.90 ^{ab}	-30.43±1.86ª		

*Harfler örnekler arasındaki farkın önemli olduğunu göstermektedir (p<0.05).

†AH; aspartam ilaveli, KH; stevia ve şeker ilaveli, SH; şeker ilaveli, TH; stevia ilaveli.

Duyusal	Kaymaklı Hösmorim	Depolama Sür	esi (gün)*	
Analiz Parametreleri	Örnekleri†	1	10	
	AH	3.60±0.25 ^b	$3.60{\pm}0.50^{b}$	
<u> </u>	KH	$4.50{\pm}0.10^{a}$	$3.90{\pm}0.45^{ab}$	
Gorunuş	SH	$4.40{\pm}0.25^{ab}$	$4.30{\pm}0.15^{ab}$	
	TH	$3.90{\pm}0.06^{\mathrm{ab}}$	$3.90{\pm}0.45^{ab}$	
	AH	$3.40{\pm}0.65^{ m bc}$	3.20±0.5°	
Dault	KH	4.60±0.15 ^a	$4.10{\pm}0.45^{abc}$	
Kenk	SH	$4.40{\pm}0.25^{ab}$	$4.30{\pm}0.15^{abc}$	
	TH	$4.00{\pm}0.00^{ m abc}$	$3.70{\pm}0.45^{abc}$	
	AH	3.40±0.25 ^b	3.50±0.1 ^b	
Vene	KH	$4.60{\pm}0.10^{a}$	3.90±0.06 ^{ab}	
rapi	SH	4.30±0.25 ^{ab}	4.30±0.35 ^{ab}	
	TH	3.70±0.2 ^{ab}	$3.50{\pm}0.9^{b}$	
	AH	2.80±0.35 ^d	$3.10{\pm}0.20^{d}$	
Tat	KH	$4.20\pm0.10^{ m abc}$	$4.00{\pm}0.10^{cd}$	
Iat	SH	4.60±0.06ª	$4.50{\pm}0.35^{ab}$	
	TH	$2.50{\pm}0.15^{d}$	$3.40{\pm}0.55^{cd}$	
	AH	3.40±0.00 ^b	3.70±0.10 ^{ab}	
Valm	KH	4.30±0.15ª	$4.00{\pm}0.15^{ab}$	
Кокц	SH	4.20±0.30 ^a	$4.10{\pm}0.45^{ab}$	
	TH	$3.40{\pm}0.06^{b}$	$3.90{\pm}0.45^{ab}$	
	AH	4.90±0.80 ^b	$5.80{\pm}0.30^{ab}$	
Kabul Edilabilialih	KH	$7.40{\pm}0.20^{a}$	$7.20{\pm}0.30^{ab}$	
Kabul Eulleolliflik	SH	7.90±0.25ª	8.00±0.45ª	
	TH	$4.80{\pm}0.10^{b}$	$5.70{\pm}1.80^{ab}$	

Tablo 3. Kaymaklı Höşmerim örneklerinin duyusal analiz sonuçları (n=3).

*Harfler örnekler arasındaki farkın önemli olduğunu göstermektedir (p<0.05).

†AH; aspartam ilaveli, KH; stevia ve şeker ilaveli, SH; şeker ilaveli, TH; stevia ilaveli.

3.4 Koliform ve maya-küf gelişimi

Farklı tatlandırıcılarla tatlandırılmış kaymaklı Höşmerim örneklerinde 10 günlük depolama süresince koliform bakteri gelişimi ve maya-küf gelişimi gözlenmemiştir.

3.5 Duyusal değerlendirme

Tablo 3'e göre, Höşmerimlerin duyusal özellikleri (görünüş, yapı, koku, tat ve kabul edilebilirlik) arasındaki fark önemli bulunmuştur (p<0.05). Değerlendirme sonucuna göre, Höşmerimlerin çoktan aza doğru beğeni sıralaması; şekerli Höşmerim (SH), şeker-stevia karışımlı Höşmerim (KH), aspartamlı Höşmerim (AH) ve stevialı Höşmerim (TH) şeklinde olmuştur. Şekerli (SH) ve stevia-şeker karışımlı (KH) Höşmerimlerde; kaymak kokusunun fazla, sarımsı, parlak, yumuşak, yapışkan, şekerli ve kaymaksı tadın belirgin olduğu saptanmıştır. Aspartamlı (AH) ve stevialı (TH) Höşmerimlerin ise; unumsu kokusunun daha fazla, pütürlü ve acımsı tadın daha az olduğu belirtilmiştir. Avrıca tüm Hösmerim örneklerinde yanığımsı tat ve eksi koku gibi olumsuz özelliklerin tespit edilmediği belirtilmiştir.

4 Sonuçlar

Bu çalışma ile geleneksel tatlılarımızdan olan peynir helvası/Höşmerimde peynir yerine farklı hammadde (kaymak) ve şeker yerine farklı tatlandırıcılar (aspartam, stevia ve stevia-şeker karışımı) eklenerek kaymak kullanımının ve tatlandırıcıların ürün özelliklerini nasıl etkilediği yapılan analizler ile tespit edilmiştir.

Çalışma sonucunda, kaymak ilaveli Höşmerimde tatlandırıcı olarak stevia veya aspartam kullanıldığında daha sert, daha az vapışkan, daha acık sarı renkli ve daha mat bir tatlı elde edilmistir. Pevnir kullanılarak üretilen Hösmerim tatlısına kıyasla kaymak kullanılarak üretilen höşmerimlerin akrilamid içeriğinin daha düşük olduğu, uygun koşullarda üretim ve paketlemeden sonra elde edilen Höşmerimin 10 gün boyunca kalitesini (fizikokimyasal, fiziksel, mikrobiyolojik duyusal) koruyabileceği ve ortaya konmuştur. Ayrıca aspartam ve doğruda stevia ilavesi ile üretilen tatlılarda duyusal beğeni şeker ile üretilenlere kıyasla çok daha düşük olmuştur. Şeker sadece tat vermekle kalmayıp kaliteyi belirleyen diğer özellikleri de (yapı, renk vb) etkilediği için şeker ilavesi yapılmadığında kurumadde

içeriğini destekleyecek yapı ve renk özelliklerini düzeltecek bazı katkı maddelerinin ilave edilmesinin de uygun olacağı düşünülmektedir. Bu alanda yapılacak yeni çalışmalar geleneksel ürünleri tüketmek isteyen ama sağlık sorunları nedeniyle tüketemeyen kişiler içinde faydalı olacaktır. Ayrıca geleneksel tatlılarımızın belirli bir üretim standardının olmaması ve reçetelerinin kişiden kişiye değişmesi nedeniyle daha sonra oluşturulabilecek standart, tebliğ vb. belgelerin oluşturulmasının gerekliliği ve önemi de bu çalışma ile bir kez daha ortaya çıkmaktadır.

Teşekkür

Çalışmayı, 4859-YL1-17 No'lu Proje ile destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederiz.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

- [1] Y. Seçim, İnek, koyun ve keçi peynirleri ile üretilen Höşmerim, künefe ve peynir helvasının bazı kalite kriterleri. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2017.
- [2] S. Can, Farklı starter kültürlerin ilavesi ile elde edilen telemenin Höşmerim kalitesine olan etkisinin belirlenmesi üzerine bir araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2007.
- [3] D. Ünal, Farklı oranlarda laktitol ve sakkaroz ilavesiyle hazırlanan Tekirdağ peynir helvalarının bazı özelliklerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2011.
- [4] T. Özcan, L. Y. Ersan, A. A. Bayizit ve P. Aydınol, II. Geleneksel Gıdalar Sempozyumu, sayfa 100-103, Van, Türkiye, 27-29 Mayıs, 2009.
- Y. Seçim and G. Uçar, Determination of microbiological, chemical, and sensory characteristics of hösmerim desserts derived from sheep, goat, and cow cheese. Eurasian Journal of Veterinary Sciences, 34 (3), 156-163, 2018. https://doi.org/10.15312/EurasianJVetSci.2018.195
- [6] A. Tuncer, A. Badem, Yöresel bir tatlı olan Ankara Höşmerimi ve genel özellikleri hakkında nitel bir çalışma. Uluslararası Akademik Çalışmalar Dergisi, 1(1), 38-46, 2021. http://dx.doi.org/10.29228/jacademia.52860
- [7] G. Akın, V. Özkoçak ve T. Gültekin, Geçmişten günümüze Geleneksel Anadolu Mutfak Kültürünün gelişimi. Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih Coğrafya Fakültesi Antropoloji Dergisi, 30, 33-52, 2015. https://doi.org/10.1501/antro_0000000319
- [8] N. Özbek ve G. Yentür, Gıdalarda aspartamın katkı maddesi olarak kullanılması. Gıda, 18(1), 67-71, 1993. https://dergipark.org.tr/tr/pub/gida/issue/6965/92875

- [9] M. Soliman, Stevia plant, natural concentrated sweetens. Egyptian Society of Sugar Technologists, 28th Annual Conference, December 2-4, 1997.
- [10] R. Cariño-Cortés, A. Hernández-Ceruelos, J. M. Torres-Valencia, M. González-Avila, M. Arriaga-Alba, E. Madrigal-Bujaidar, Antimutagenicity of stevia pilosa and stevia eupatoria evaluated with the ames test. Toxicol In Vitro, 21 (4), 691-697, 2007. https://doi.org/10.1016/j.tiv.2006.12.001
- [11] T. Baydar ve G. Şahin, Aspartam metabolizması ve toksisitesi. Türkiye Klinikleri Tıp Bilimleri, 17 (3), 141-152, 1997. https://www.turkiyeklinikleri.com/article/traspartam-metabolizmasi-ve-toksisitesi-7136.html
- [12] A. Korkmaz, M. M. Özcan ve M. M. Özcan, Determination of the distribution of macro-, micro- and toxic element contents in different halva samples produced by grinding sesame seeds. Journal of Agroalimentary Processes and Technologies, 30 (3), 293-299, 2024.

http://dx.doi.org/10.59463/JAPT.2024.2.25

- [13] Y. Cokal, A. Dagdelen, O. Cenet and U. Gunsen, Presence of *L. monocytogenes* and some bacterial pathogens in two turkish traditional foods, mihalic cheese and hosmerim dessert. Elsevier, Food Control, 26 (2), 337-340, 2012. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.01.058
- [14] M. Gökmen, L. Akkaya, R. Kara ve A. Önen, Balıkesir'de satışa sunulan bazı tüketime hazır gıdalarda Salmonella spp. ve Listeria monocytogenes'in yaygınlığı. Van Veterinary Journal, 27 (1), 31-36, 2016. https://dergipark.org.tr/tr/pub/vanvetj/issue/37751/4358 49.
- [15]Ö. Cengiz, Farklı oranlarda lor peyniri ve eritme tuzu ilavesiyle hazırlanan Tekirdağ peynir helvalarının çeşitli özelliklerinin belirlenmesi üzerine bir araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2006.
- [16]Ş. Çetintaş, Amaranth ve stevia ilavesinin peynirli helvanın bazı kalite özelliklerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2022.
- [17] M. Gölükcü ve H. Tokgöz, Gıdalarda akrilamid oluşum mekanizması ve insan sağlığı üzerine etkileri. Derim, 22 (1), 41-48, 2005. https://dergipark.org.tr/tr/pub/derim/issue/4558/62562
- [18] O. Yıldız, H. Şahin, M. Kara, R. Aliyazıcıoğlu, Ö. Tarhan ve S. Kolaylı, Maillard reaksiyonları ve reaksiyon ürünlerinin gıdalardaki önemi. Akademik Gıda, 8 (6), 44-51, 2010. https://dergipark.org.tr/tr/pub/akademikgida/issue/55828/764759
- [19] Z. Erdemli, Gıda kaynaklı akrilamidin fetotoksik etkileri ve akrilamid toksisitesine karşı koruyucu önlemler. İnönü Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Dergisi, 9(3), 1154-1167, 2021. https://doi.org/10.33715/inonusaglik.847535

- [20] H. Ölmez, F. Tuncay, N. Özcan and S. Demirel, A survey of acrylamide levels in foods from the Turkish market. Journal of Composition and Analysis, 21, 564-568, 2008. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfca.2008.04.011
- [21] G. Özkan, Aspartamın, bozunma ürünlerinin ve bazı gıda katkılarının yüksek performans sıvı kromatografi yöntemi ile tayini. Gıda, 23, 49-87, 1998. https://dergipark.org.tr/tr/pub/gida/issue/6842/91788
- [22] E. Dikmen, A. Ş. Şahin ve A. K. Yakut, Deneysel bir kurutma sistemi tasarımı ve çalışma parametrelerinin incelenmesi. Isi Bilimi ve Tekniği Dergisi, 32 (2), 81-88, 2012. https://dergipark.org.tr/tr/pub/isibted/issue/33965/3759 08
- [23] TS 1331, Tereyağı. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1995.
- [24] M. Olgun, Z. B. Başçiftçi, N.G. Ayter, İ. Kutlu, A. Akın ve Y. Karaduman, Ekmeklik buğday (Triticum aestivum L.) çeşitlerinde protein oranının üç farklı analiz yöntemine göre karşılaştırılması üzerine bir araştırma. Süleyman Demirel Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 8(2), 80-87, 2013. https://dergipark.org.tr/tr/pub/sduzfd/issue/29593/3175 03
- [25] A. Aydın, H. Aksu, N. Taskanal and U. Gunsen, Microbiological, physico-chemical and toxicological quality of traditional turkish cheese dessert. Journal of Food Quality, 32, 590-606, 2009. https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2009.00271.x
- [26] S.R. Hertzler and S.M. Clancy, Kefir improves lactose digestion and tolerance in adults with lactose

maldigestion. Journal of The American Dietetic Association, 103 (5), 582-587, 2003. https://doi.org/10.1053/jada.2003.50111

- [27] C. Kaya, E.E. Yücel, S. Topuz ve M. Bayram, Farklı tatlandırıcılar kullanılarak üretilen hindistan cevizi marmelatlarının bazı özelliklerinin belirlenmesi. Journal of New Results in Engineering and Natural Science, 19, 10-18, 2023. https://dergipark.org.tr/en/pub/jrens/issue/79158/13171 86
- [28] A. Kulthe, V. Pawar, P. Kotecha, U. Chavan and V., Bansode, Development of high protein and low calorie cookies. Association of Food Scientists & Technologists (India), 51(1), 153-157, 2011. https://doi.org/10.1007/s13197-011-0465-2
- [29] C.S. Brennan and E. Samyue, Evaluation of starch degradation and textural characteristics of dietary fiber enriched biscuits. International Journal of Food Properties, 7 (3), 647-657, 2004. https://doi.org/10.1081/JFP-200033070
- [30] A. Karagöz, Akrilamid ve gıdalarda bulunuşu. TAF Preventive Medicine Bulletin, 8 (2), 187-192, 2009.
- [31] Q. Hu, X. Xu, Y. Fu and Y. Li, Rapid methods for detecting acrylamide in thermally processed foods: A review. Food Control, 56, 135-146, 2015. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.03.021
- [32] Z. Erbay, N. Koca ve M. Üçüncü, Hellim peynirinin bileşimi ile renk ve dokusal özellikleri arasındaki ilişkiler. Gıda, 35 (5), 347-353, 2010. https://dergipark.org.tr/tr/pub/gida/issue/6889/92172



NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 597-606



Niğde Ömer Halisdemir Üni**ver**sitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araștırma makalesi / Research article

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



Competitive hybrid Jaya and β-Hill Climbing algorithm for high-cost optimization problems

Yüksek maliyetli optimizasyon problemleri için rekabetçi hibrit Jaya ve β-Hill Climbing algoritması

Gürcan Yavuz¹, Hatem Dumlu^{2*}, Yacoub Kadar Hassan³

1.2.3 Kütahya University, Computer Engineering Department, 43100, Kütahya, Türkiye

Abstract

Jaya algorithm is a population-based parameter-less optimization algorithm. It is frequently used in high-cost industrial and engineering problems. However, Jaya algorithm gets stuck in local optimum in some problems with constrained conditions. In this paper, we introduce a hybrid variant of Jaya to overcome the problem of getting stuck at the local optimum, the β -Hill Climbing local search algorithm is added to the Jaya algorithm and a hybrid Jaya algorithm (CT-JAYA-BH) is presented. Before deciding to use the β-Hill Climbing algorithm, Jaya was also combined with the Quasi Newton and Nelder-Mead local search algorithms. These variants were tested on the CEC 2015 benchmark set provided by IEEE. According to the results, the Jaya-β-Hill Climbing variant (CT-JAYA-BH) obtained the best results. A parameter analysis of CT-JAYA-BH was also performed to determine at which parameter values this variant achieved the best results. Moreover CT-JAYA-BH was compared with 14 different optimization algorithms using the CEC 2015 benchmark set. According to the results, the proposed CT-JAYA-BH algorithm outperforms the other algorithms with an average rank value of 1.87 in both 10 and 30 dimensions. The results show that CT-JAYA-BH is a highly competitive.

Anahtar kelimeler: Jaya, Local Search, β -Hill Climbing, CEC 2015

1 Introduction

Optimization is the process of maximizing profit, performance, output and efficiency or minimizing costs and energy consumption in engineering and industry [1, 2]. Optimization algorithms are widely used across various fields to address complex computational challenges. However, some problems have high computational costs and time requirements, making them difficult to solve efficiently [3, 4]. These challenges have driven researchers to develop novel algorithms to improve solution quality and efficiency, forming the primary motivation for this study.

Jaya is an optimization algorithm proposed by Rao and used to solve many problems [5–7]. The Jaya algorithm has been used to solve complex and difficult optimization

Öz

Jaya algoritması, popülasyon tabanlı parametresiz bir optimizasyon algoritmasıdır. Yüksek maliyetli endüstriyel ve mühendislik problemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak, Jaya algoritması kısıtlı koşullara sahip bazı problemlerde yerel optimumda takılıp kalmaktadır. Bu makalede, yerel optimumda takılma probleminin üstesinden gelmek için Jaya'nın hibrit bir varyantı tanıtılmakta, β -Hill Climbing yerel arama algoritması Jaya algoritmasına eklenmekte ve hibrit bir Jaya algoritması (CT-JAYA-BH) sunulmaktadır. β-Hill Climbing algoritmasını kullanmaya karar vermeden önce Jaya, Quasi Newton ve Nelder-Mead yerel arama algoritmaları ile de birleştirilmiştir. Bu varyantlar IEEE tarafından sağlanan CEC 2015 benchmark seti üzerinde test edilmiştir. Sonuçlara göre, Jaya-β-Hill Climbing varyantı (CT-JAYA-BH) en iyi sonuçları elde etmiştir. Bu varyantın hangi parametre değerlerinde en iyi sonuçları elde ettiğini belirlemek için CT-JAYA-BH'nin bir parametre analizi de vapılmıştır. Ayrıca CT-JAYA-BH, CEC 2015 kıyaslama seti kullanılarak 14 farklı optimizasyon algoritması ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, önerilen CT-JAYA-BH algoritması hem 10 hem de 30 boyutta ortalama 1.87 rank değeri ile diğer algoritmalardan daha iyi performans göstermiştir. CT-JAYA-BH oldukça rekabetçidir.

Keywords: Jaya, Yerel Arama, β-Hill Climbing, CEC 2015

problems in various fields such as engineering and industry. Pandey compares the Jaya algorithm with other algorithms and demonstrates the computational capabilities of the discussed algorithm in both constrained and unconstrained problems [8]. Achanta and Pamula used JAYA for time response and speed control of the system and compared the results with particle swarm optimization (PSO) [9]. Jian and Weng proposed a JAYA algorithm (LCJAYA) using a logistic chaotic map and used it to determine photovoltaic (PV) cell parameters [10]. Zhang et al. combined the self-adaptive classification learning hybrid JAYA and Rao-1 algorithms and applied them to real-world problems [11]. Zhao et al. proposed a surrogate-assisted JAYA algorithm and used it to solve the CEC 2017 benchmark set [12].

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: haten.dumlu@dpi.edu.tr (H. Dumlu) Geliş / Received: 20.10.2024 Kabul / Accepted: 05.03.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi:10.28948/ngumuh.1570577

Nayak et al. proposed a new method for automatic diagnosis of sensorineural hearing loss (SNHL) with magnetic resonance imaging (MRI). The features obtained using fast discrete curvelet transform are extracted with PCA+LDA algorithm and MJaya-ELM hybrid classifier is proposed by integrating mutation into Jaya optimization [13]. Another algorithm used in this study is the β -Hill Climbing local search method. Al-Betar introduced the β-Hill Climbing algorithm to the literature as an improved hill climbing algorithm [14]. Researchers have utilized this algorithm in various studies. For example, Ghosh et al. proposed an adaptive β-Hill Climbing based Binary Sailfish Optimizer for feature selection and applied it to 18 datasets from UCI and compared it with 10 algorithms [15]. Abed Alguni and Alkhateeb combined the Cuckoo Search algorithm with the β -Hill Climbing algorithm to improve its efficiency and stabilize its computational cost. They used it to solve 16 test functions and compared it with various metaheuristics [16]. Ghosh et al. applied 18 standard UCI datasets by combining the Coral Reefs Optimizer algorithm with β -Hill Climbing and applied three classifiers KNN, Random Forest and Naive Bayes [17]. Alomari et al. developed an efficient feature selection method for gene selection by combining a Minimum Redundancy Maximum Relevancy filter approach and a hybrid bat algorithm with β -Hill Climbing [18].

In this paper, a solution based on the Java algorithm is proposed for expensive optimization problems where the working budget is very limited, and an efficient solution is required. The proposed approach is based on the β -Hill Climbing algorithm, a variant of the hill climbing local search method. Before choosing β -Hill Climbing algorithm, two different local search approaches were included in the Jaya algorithm to investigate the best local search method for expensive problems. Several experiments were performed to test the performance of the proposed algorithm. For the experiments, the CEC 2015 expensive benchmark set proposed by IEEE for the evolutionary computing session was used for expensive problem types. The algorithm's results are compared to the results of latest metaheuristic algorithms. The study is organized as follows. Section 1 provides a brief introduction to the study. In section 2, the original Jaya algorithm, β-Hill Climbing algorithm and proposed algorithm are mentioned. Section 3 describes the experiments performed and the results obtained. Section 4 contains the conclusion.

2 Materials and methods

2.1 The original Jaya algorithm

Jaya is a parameter-less, population-based, stochastic optimization algorithm proposed by Rao in 2016 [6, 7, 19]. Jaya, which means victory in Sanskrit language, has an approach that always aims for the best solution. The general outline of the algorithm is given in Algorithm 1.

Jaya algorithm starts the optimization process by generating a population of individuals representing randomly generated solutions. It continues the optimization process by updating the positions of the solutions in the population with Equation 1. This process continues until the computational budget is completed.

$$X_{i,j}^{Ite+1} = X_{i,j}^{Ite} + r1(X_{best,j}^{Ite} - |X_{i,j}^{Ite}|) - r2(X_{worst,j}^{Ite} - |X_{i,j}^{Ite}|)$$
(1)

Here, $X_{i,j}^{Ite}$ represents the dimension *j*. of the solution *i*. at iteration *Ite*. $X_{best,j}^{Ite}$ and $X_{worst,j}^{Ite}$ are the *j*. dimension of the individuals with the best and worst fitness values in the population so far, respectively. Lastly, two random values from the interval [0, 1] are r1 and r2.

Algo	orithm 1: Pseudo Code of Original Jaya
	Determine the size of the population (NP)
	Generate the population randomly using uniform distribution.
Ite	← 1
	while until the termination condition will meet do
	Find the individuals of the population with the best and worst fitness values for $i = 1 \text{ to } NP$ do
	Update the solution with Equation 1.
	$i \leftarrow i + 1$
	end for
	$Ite \leftarrow Ite + 1$
	end while

2.2 β -Hill Climbing method

One of the most straightforward local search algorithms is hill climbing. This algorithm faces the challenge of becoming trapped in a local optimum, therefore researchers have proposed new variants of this algorithm [16, 20]. One of them is the β -Hill Climbing algorithm, a hill climbing local search variant proposed by Al-Betar in 2017 [14].The pseudocode of the β -Hill Climbing algorithm is given in Algorithm 2.

B-Hill-Climbing algorithm is one of recent local search algorithms. It has two operators. The N-operator in neighborhood navigation signifies the algorithm's exploitation capability, while the β -operator represents its exploration capability. The algorithm works by starting with a random solution. Then it iteratively runs N-operator followed by β -operator. The N-operator employs the function x = improve(N(x)) along with a random walk.

$$x'_i = x_i \pm rand(0,1) \times bw \tag{2}$$

Here Equation 2, *i* denotes an index chosen randomly from *N* dimensions. *bw* is the bandwidth between x_i and x'_i . The β -operator assigns a randomly chosen value for x'_i or a value chosen from the available *x*.

$$x'_{i} = \begin{cases} x_{r} & rand \leq \beta \\ x_{i} & otherwise \end{cases}$$
(3)

Here Equation 3, with probability $\beta \in [0,1]$, we assign to x'_i by choosing between x_r and x_i according to the value of *rand*.

Algorithm 2. β-Hill Climbing Algorithm	
$x_i = lb_i + (ub_i - lb_i) \times rand(0,1)$	
Find objective value $(f(x))$	
Ite = 0	
while $lte \leq max lte$ do	
x' = improve(N(x))	$\rightarrow N$
for $i = 1$ to N do	
if $rand() \leq \beta$ then	
$x'_i = lb_i + (ub_i - lb_i) \times rand(0,1)$	$\rightarrow \beta$
end if	
end for	
if $f(x') \le f(x)$ then	
x = x'	
end if	
Ite = Ite + 1	
end while	

2.3 Proposed method (CT-JAYA-BH)

The proposed method aims to overcome the problem of the Jaya algorithm getting stuck at the local optimum. To overcome this problem, the Jaya algorithm is hybridized with the β -Hill Climbing local search algorithm. The proposed algorithm is given in Algorithm 3. In the proposed approach, the algorithm applies the local search method to the best solution x_{best} of the population so far. This is performed depending on the *f* parameter to save run budget. The local search also has a run budget, which is determined by the value *ls*.

Algorithm 3. Pseudo Code of Proposed Algorithm
Set the population size (<i>NP</i>)
Generate the population randomly using uniform distribution
Ite = 1
while until the termination condition will meet do
Find the individuals of the population with the best and
worst fitness values
for $i = 1$ to NP do
Update the positions with Equation 1 $i = i + 1$
l = l + 1
$I_{to} - I_{to} + 1$
if $mod(Ite f) = -0$ then
$r_{h,m} = AmlyLocalSearch(r_{h,m})$
end if
end while
procedure ApplyLocalSearch(x_{hest})
Apply β – HillClimbingAlgorithm(x_{best} , ls)
return x _{best}
end procedure
procedure β – <i>HillClimbingAlgorithm</i> (x_{best} , <i>ls</i>)
$x_i = x_{best}$
Find objective value $(f(x))$
Ite = 0
while $lte \leq ls$ do
x' = improve(N(x))
for $i = 1$ to N do
if $rand() \leq \beta$ then
update $x'_i = lb_i + (ub_i - lb_i) \times rand(0,1)$
end if
end for
if $f(x') \le f(x)$ then
x = x'
end if
Ite = Ite + 1
end while
end procedure

3 Experiments

In the experiments, the CEC 2015 expensive optimization benchmark set from IEEE is used [21]. This benchmark set includes 15 black box test functions, and a summary of the benchmark set is listed in Table 1. The CEC 2015 benchmark set includes test functions for the Unimodal, Multimodal, Hybrid and Composition type categories.

Categories	No	Functions	F _i *
Unimodal Functions	Fnc1	Rotated Bent Cigar	100
	Fnc2	Rotated Discus	200
Simple Multimodal		Shifted and Rotated	
Functions	Fnc3	Weierstrass	300
		Shifted and Rotated	
	Fnc4	Schwefel's	400
		Shifted and Rotated	
	Fnc5	Katsuura Function	500
		Shifted and Rotated	
	Fnc6	HappyCat Function	600
		Shifted and Rotated	
	Fnc7	HGBat	700
		Shifted and Rotated	
		Expanded Griewank's	
	Fnc8	plus Rosenbrock's	800
		Shifted and Rotated	
		Expanded Scaffer's F6	000
	Fnc9	Function	900
Hybrid Functions	Fnc10	Hybrid Function 1 (N=3)	1000
	Fnc11	Hybrid Function 2 (N=4)	1100
	Fnc12	Hybrid Function 3 (N=5)	1200
Composition		Composition Function 1	
Functions	Fnc13	(N=5)	1300
		Composition Function 2	
	Fnc14	(N=3)	1400
		Composition Function 3	
	Fnc15	(N=5)	1500

The test functions included in the CEC 2015 benchmark set are performed for 10 and 30 dimensions. All functions in the experiments were solved independently 20 times by all algorithms. Execution is performed up to the number of function calls $Dim \times 50$. A summary of the knowledge of the experimental environment is given in Table 2.

Table 2. Experimental environment

	Specifications	Value
	# of dimensions	10, 30
	# of functions	15
	# of independent runs	20
	#of population	10
	Running budget	500, 1500 (Dim x 50)
Sp	Computer ecifications	32 GB DD4 RAM, AMD Ryzen 5 5600

The suggested CT-JAYA-BH algorithm's parameters are adjusted to $\beta = 0.1$ and bw = 0.001. The experimental algorithms' control parameters, excluding the common ones, are sourced from their respective original papers. These specific parameters are detailed in Table 3.

Algorithm	Parameter	Value
ASO	Depth weight	50
	Multiplier weight	0.2
BA	fmax	2
	fmin	0
	alpha	0.9
	gamma	0.9
	A_max	2
	r0_max	1
BOA	c	0.01
	р	0.8
EPO	Μ	2
	f	3
	1	2
FA	alpha	0.2
	beta	1
	gamma	1
GSA	G0	100
	alpha	20
HGSO	num_cluster	5
	K	1
	alpha	1
	beta	1
	L1	5.00E-03
	L2	100
	L3	1.00E-02
	theta	298.15
	eps	0.05
	M1	0.1
	M2	0.2
HHO	beta	1.5
PRO	Pmut	0.06
WSA	tau	0.8
	sl	0.035
	phi	0.001
	lambda	0.75

Table 3. Control parameters of algorithms

3.1 Comparison with local search methods

This study also aims to hybridize the Jaya algorithm with different local search methods. For this approach, three different local search methods selected from the literature are tried one by one to determine the best one. β -Hill Climbing, a hill climbing variant, is the first to be selected for use in hybridization. The other selected local search algorithms are Nelder-Mead [22] and Quasi Newton [23]. These methods are hybridized with Jaya and the results obtained with the CEC 2015 benchmark set in 10 and 30 dimensions are given in Table 4 and Table 5, respectively.

Jaya- β -Hill Climbing approach ranked first with an average rank value of 1.53 in 10 dimensions, Jaya-Nelder Mead approach ranked second with a value of 1.60 and the Jaya-Quasi Newton approach ranked third with a value of 2.73. Analysis of the 30 dimensions average values shows that Jaya- β -Hill Climbing obtained 1.33, Jaya-Nelder Mead obtained 1.80 and Jaya-Quasi Newton obtained 2.80. According to the results, the β -Hill Climbing local search approach is chosen as the preferred method for hybridization. The Friedman ranking method was used to compare algorithm performance by ranking them for each function.

The best algorithm receives rank 1, the worst N, and the average rank is calculated, which is the mean rank.

Table 4. Comparison of mean value Jaya + Local search on CEC 2015 (dim=10, f=5, ls=10)

Fnc	Java+B-HillClimbing	Iava+nelderMead	Java+quasiNewton
En el			
Fncl	9.2120E+08	1.0450E+09	1.1930E+09
Fnc2	6.3970E+04	5.4800E+04	6.6250E+04
Fnc3	3.0990E+02	3.0950E+02	3.1050E+02
Fnc4	1.5160E+03	2.0360E+03	2.3470E+03
Fnc5	5.0290E+02	5.0230E+02	5.0310E+02
Fnc6	6.0190E+02	6.0200E+02	6.0210E+02
Fnc7	7.1290E+02	7.1740E+02	7.1850E+02
Fnc8	9.8030E+02	1.0360E+03	1.1840E+03
Fnc9	9.0410E+02	9.0410E+02	9.0420E+02
Fnc10	9.8240E+05	5.5370E+05	9.1370E+05
Fnc11	1.1120E+03	1.1200E+03	1.1120E+03
Fnc12	1.5390E+03	1.4120E+03	1.4920E+03
Fnc13	1.6680E+03	1.6700E+03	1.6840E+03
Fnc14	1.6140E+03	1.6130E+03	1.6160E+03
Fnc15	1.9800E+03	1.9980E+03	2.0300E+03
MeanRank	1.533	1.600	2.733

Table 5. Comparison of mean value Jaya + Local search on CEC 2015 (dim=30, f=5, ls=10)

Fnc	Jaya+β-HillClimbing	Jaya+nelderMead	Jaya+quasiNewton
Fnc1	1.2910E+10	1.9550E+10	2.0300E+10
Fnc2	1.4960E+05	1.5930E+05	1.7730E+05
Fnc3	3.3840E+02	3.3900E+02	3.4090E+02
Fnc4	4.4980E+03	7.1720E+03	8.5620E+03
Fnc5	5.0420E+02	5.0310E+02	5.0410E+02
Fnc6	6.0240E+02	6.0340E+02	6.0340E+02
Fnc7	7.3370E+02	7.6740E+02	7.6710E+02
Fnc8	1.1890E+06	3.8450E+06	4.5500E+06
Fnc9	9.1390E+02	9.1380E+02	9.1400E+02
Fnc10	2.5910E+07	2.2130E+07	4.0130E+07
Fnc11	1.1870E+03	1.2280E+03	1.2400E+03
Fnc12	2.5940E+03	2.4140E+03	2.8920E+03
Fnc13	1.8390E+03	2.0880E+03	2.1240E+03
Fnc14	1.6980E+03	1.7130E+03	1.7380E+03
Fnc15	2.7390E+03	2.7970E+03	2.8310E+03
MeanRan	k 1.333	1.800	2.800

3.2 Parameter analysis

Jaya algorithm's hybridization with the β -Hill Climbing method is selected and parameter analysis is performed to determine f and ls, two parameters that determine the operation of local search algorithms. The possible values of these two parameters are 5 and 10 for f and 10, 20 and 30 for ls. In the case where f is 5 and ls is 30, the algorithm gets an average ranking value of 1.93 for 10 dimensions and an average ranking value of 1.47 for 30 dimensions, ahead of the other parameter cases. Table 6 shows the results for 10 dimensions and Table 7 shows the results for 30 dimensions.

	=					
Fnc.	f-5-ls-10	f-5-ls-20	f-5-ls-30	f-10-ls-10	f-10-ls-20	f-10-ls-30
Fnc1	9.2120E+08	8.7760E+08	9.8130E+08	1.0490E+09	1.0540E+09	9.8920E+08
Fnc2	6.3970E+04	5.6420E+04	6.2810E+04	7.5450E+04	6.2580E+04	7.5090E+04
Fnc3	3.0990E+02	3.0900E+02	3.0970E+02	3.1030E+02	3.0980E+02	3.1000E+02
Fnc4	1.5160E+03	1.1850E+03	1.0650E+03	1.8810E+03	1.5450E+03	1.4550E+03
Fnc5	5.0290E+02	5.0290E+02	5.0280E+02	5.0310E+02	5.0280E+02	5.0270E+02
Fnc6	6.0190E+02	6.0190E+02	6.0170E+02	6.0210E+02	6.0210E+02	6.0170E+02
Fnc7	7.1290E+02	7.1290E+02	7.0940E+02	7.1540E+02	7.1070E+02	7.1210E+02
Fnc8	9.8030E+02	8.7270E+02	8.6660E+02	8.7250E+02	1.0030E+03	9.3490E+02
Fnc9	9.0410E+02	9.0410E+02	9.0410E+02	9.0410E+02	9.0420E+02	9.0410E+02
Fnc10	9.8240E+05	9.4210E+05	8.5590E+05	1.2720E+06	8.0240E+05	1.2360E+06
Fnc11	1.1120E+03	1.1110E+03	1.1110E+03	1.1130E+03	1.1100E+03	1.1120E+03
Fnc12	1.5390E+03	1.5240E+03	1.4610E+03	1.4930E+03	1.4890E+03	1.4910E+03
Fnc13	1.6680E+03	1.6500E+03	1.6530E+03	1.6680E+03	1.6670E+03	1.6650E+03
Fnc14	1.6140E+03	1.6130E+03	1.6150E+03	1.6150E+03	1.6130E+03	1.6140E+03
Fnc15	1.9800E+03	1.9430E+03	1.9540E+03	2.0070E+03	1.9660E+03	1.9780E+03
Mean Rank	3.867	2.200	1.933	5.000	3.267	3.267

Table 6. Parameter analysis of proposed algorithm (CT-JAYA-BH) on CEC 2015 (dim=10)

Table 7. Parameter analysis of proposed algorithm (CT-JAYA-BH) on CEC 2015 (dim=30)

Fnc.	f-5-ls-10	f-5-ls-20	f-5-ls-30	f-10-ls-10	f-10-ls-20	f-10-ls-30
Fnc1	1.2910E+10	9.3510E+09	6.5130E+09	1.5300E+10	1.4370E+10	9.6500E+09
Fnc2	1.4960E+05	1.6170E+05	1.5980E+05	1.6430E+05	1.5590E+05	1.5370E+05
Fnc3	3.3840E+02	3.3660E+02	3.3660E+02	3.3860E+02	3.3710E+02	3.3640E+02
Fnc4	4.4980E+03	3.4960E+03	3.1440E+03	5.4920E+03	4.5810E+03	4.2460E+03
Fnc5	5.0420E+02	5.0430E+02	5.0400E+02	5.0400E+02	5.0450E+02	5.0410E+02
Fnc6	6.0240E+02	6.0180E+02	6.0120E+02	6.0290E+02	6.0260E+02	6.0210E+02
Fnc7	7.3370E+02	7.2620E+02	7.1700E+02	7.4100E+02	7.3390E+02	7.2770E+02
Fnc8	1.1890E+06	4.2740E+05	3.2160E+05	2.3560E+06	1.1710E+06	6.5660E+05
Fnc9	9.1390E+02	9.1390E+02	9.1380E+02	9.1390E+02	9.1390E+02	9.1380E+02
Fnc10	2.5910E+07	2.1670E+07	1.5780E+07	2.0420E+07	1.9800E+07	2.2800E+07
Fnc11	1.1870E+03	1.1930E+03	1.1860E+03	1.2070E+03	1.2090E+03	1.1870E+03
Fnc12	2.5940E+03	2.5740E+03	2.5860E+03	2.6880E+03	2.6290E+03	2.5960E+03
Fnc13	1.8390E+03	1.8110E+03	1.7720E+03	1.9320E+03	1.8410E+03	1.8070E+03
Fnc14	1.6980E+03	1.6960E+03	1.6940E+03	1.7140E+03	1.7100E+03	1.6950E+03
Fnc15	2.7390E+03	2.7220E+03	2.7400E+03	2.7460E+03	2.7460E+03	2.7580E+03
Mean Rank	3.667	2.733	1.467	5.067	4.467	2.867

3.3 Comparison with different optimizations algorithms

After parameter analysis, the results of the suggested approach are compared with those of most recent algorithms. The algorithms included in the comparison are Atom Search Optimization (ASO) [24], Harris Hawks Optimization (HHO) [25], Henry Gas Solubility Optimization (HGSO) [26], Poor and Rich Optimization algorithm (PRO) [27], Butterfly Optimization Algorithm (BOA) [28], Emperor Penguin Optimizer (EPO) [29], Weighted Superposition Attraction (WSA) [30], JAYA (JA) [19], Fruit Fly Optimization Algorithm (FOA) [31], Bat algorithm (BA) [32], Firefly Algorithms (FA) [33], Gravitational Search Algorithm (GSA) [34], Coati Optimization Algorithm (COA) [3] and Siberian Tiger Optimization (STO) [35].

The algorithms solved the test functions in the benchmark set for 10 dimensions and 30 dimensions. The population size of all algorithms is chosen to be 10 and 30 to make the experiments fair. The mean value of the algorithms After 20 independent runs is given in Table (8-a), Table (8-b) for 10 dimensions and in Table (9-a), Table (9-b) for 30 dimensions.

Table (8-a) and Table (8-b) shows that the proposed algorithm is ahead of the other 14 algorithms with an average rank value of 1.87 in 10 dimensions. It is followed by the original Jaya algorithm with an average rank of 3.37.

Table (9-a) and Table (9-b) shows that the proposed algorithm continued its success by achieving an average ranking value of 1.87 in 30 dimensions, similar to the 10 dimensions, and ranked first out of 14 algorithms. The second algorithm is PRO algorithm with an average ranking value of 3.27, following the proposed algorithm.

CT-JAYA-BH ranked first by outperforming its competitors in both 10 and 30 dimensions. Additionally, the runtimes of CT-JAYA-BH and its competitors for each function are presented in Table (10-a), Table (10-b) and Table (11-a) and Table (11-b), with the best values highlighted in bold.

(unin)								
Algorithm	is Fnc1	Fnc2	Fnc3	Fnc4	Fnc5	Fnc6	Fnc7	Fnc8
ASO	4.7120E+10	2.8440E+05	3.4000E+02	7.6420E+03	5.0300E+02	6.0540E+02	8.3360E+02	6.2460E+07
HHO	5.8740E+10	9.5250E+04	3.4460E+02	8.2470E+03	5.0340E+02	6.0600E+02	8.1880E+02	1.3660E+07
HGSO	5.6740E+10	7.6050E+04	3.4330E+02	8.6690E+03	5.0430E+02	6.0580E+02	8.1490E+02	1.2380E+07
PRO	4.9670E+10	6.0130E+04	3.3920E+02	7.1090E+03	5.0420E+02	6.0540E+02	7.9410E+02	4.7320E+06
BOA	6.8250E+10	6.7430E+04	3.4750E+02	8.8180E+03	5.0420E+02	6.0640E+02	8.3050E+02	3.0750E+07
EPO	1.1120E+11	5.3760E+07	3.4450E+02	1.0600E+04	5.0420E+02	6.0880E+02	9.7340E+02	5.3930E+08
WSA	1.0560E+11	9.3890E+05	3.4710E+02	8.6980E+03	5.0440E+02	6.0830E+02	9.3960E+02	3.2820E+08
JA	1.7940E+10	1.8280E+05	3.3990E+02	8.2000E+03	5.0460E+02	6.0310E+02	7.5330E+02	2.1750E+06
FOA	7.8370E+10	2.4810E+08	3.5320E+02	1.1580E+04	5.1300E+02	6.0670E+02	8.4660E+02	5.3760E+07
BA	8.6560E+10	1.7380E+05	3.4550E+02	6.2670E+03	5.0210E+02	6.0740E+02	8.9480E+02	1.2130E+08
FA	1.1520E+11	7.0810E+07	3.5110E+02	1.0350E+04	5.0610E+02	6.0940E+02	9.8520E+02	7.2540E+08
GSA	6.7900E+10	6.5160E+05	3.4660E+02	8.3040E+03	5.0230E+02	6.0610E+02	8.2800E+02	4.9730E+07
COA	4.8520E+10	8.5800E+04	3.4200E+02	8.4950E+03	5.0430E+02	6.0520E+02	7.9860E+02	6.6190E+06
STO	6.4120E+10	7.2770E+04	3.4350E+02	7.8310E+03	5.0370E+02	6.0600E+02	8.2460E+02	2.1760E+07
Proposed	6.5130E+09	1.5980E+05	3.3660E+02	3.1440E+03	5.0400E+02	6.0120E+02	7.1700E+02	3.2160E+05

Table (8-a). Proposed algorithm(CT-JAYA-BH-f-5-ls-30) comparison based mean value with other algorithms (dim=10)

Table (8-b). Proposed algorithm(CT-JAYA-BH-f-5-ls-30) comparison based mean value with other algorithms (dim=10)

Algorithm	1sFnc9	Fnc10	Fnc11	Fnc12	Fnc13	Fnc14	Fnc15	MeanRank
ASO	9.1410E+02	1.1160E+08	1.5240E+03	3.4550E+03	2.8960E+03	1.7930E+03	2.9010E+03	6.200
HHO	9.1380E+02	1.0450E+08	1.4000E+03	7.9160E+03	3.2040E+03	1.9530E+03	3.0660E+03	6.467
HGSO	9.1380E+02	9.4420E+07	1.4040E+03	8.4470E+03	2.8220E+03	1.8750E+03	3.2120E+03	6.333
PRO	9.1370E+02	2.1280E+07	1.2700E+03	2.8880E+03	2.3500E+03	1.7460E+03	2.9110E+03	3.267
BOA	9.1390E+02	2.1920E+08	1.6990E+03	4.6570E+05	3.4210E+03	2.0730E+03	4.5610E+03	9.333
EPO	9.1420E+02	1.9440E+08	2.8940E+03	3.0130E+06	5.3320E+03	2.1520E+03	5.1720E+03	12.467
WSA	9.1410E+02	4.1410E+08	2.3200E+03	1.3860E+06	4.4190E+03	2.2440E+03	3.9330E+03	12.067
JA	9.1390E+02	3.2020E+07	1.2070E+03	2.7520E+03	2.0320E+03	1.7360E+03	2.7660E+03	3.933
FOA	9.1510E+02	1.0710E+09	2.2900E+03	2.1600E+06	4.7040E+03	2.3590E+03	6.9480E+03	13.333
BA	9.1410E+02	3.4960E+08	1.9500E+03	3.2530E+05	3.5150E+03	2.1520E+03	3.9380E+03	9.533
FA	9.1440E+02	7.1380E+08	3.5140E+03	9.6000E+06	5.1830E+03	2.4820E+03	5.6150E+03	14.400
GSA	9.1400E+02	2.8550E+08	1.6590E+03	5.3800E+05	3.2520E+03	2.0060E+03	4.4900E+03	9.067
COA	9.1380E+02	6.3190E+07	1.3740E+03	3.0450E+03	2.2940E+03	1.8130E+03	2.9920E+03	4.800
STO	9.1350E+02	8.1340E+07	1.4030E+03	6.4960E+03	3.0510E+03	1.9460E+03	3.0270E+03	5.800
Proposed	9.1380E+02	1.5780E+07	1.1860E+03	2.5860E+03	1.7720E+03	1.6940E+03	2.7400E+03	1.867

Table (9-a). Proposed algorithm (CT-JAYA-BH-f-5-ls-30) comparison based mean value with other algorithms (dim=30)

Algorithm	nsFnc1	Fnc2	Fnc3	Fnc4	Fnc5	Fnc6	Fnc7	Fnc8
ASO	4.7120E+10	2.8440E+05	3.4000E+02	7.6420E+03	5.0300E+02	6.0540E+02	8.3360E+02	6.2460E+07
HHO	5.8740E+10	9.5250E+04	3.4460E+02	8.2470E+03	5.0340E+02	6.0600E+02	8.1880E+02	1.3660E+07
HGSO	5.6740E+10	7.6050E+04	3.4330E+02	8.6690E+03	5.0430E+02	6.0580E+02	8.1490E+02	1.2380E+07
PRO	4.9670E+10	6.0130E+04	3.3920E+02	7.1090E+03	5.0420E+02	6.0540E+02	7.9410E+02	4.7320E+06
BOA	6.8250E+10	6.7430E+04	3.4750E+02	8.8180E+03	5.0420E+02	6.0640E+02	8.3050E+02	3.0750E+07
EPO	1.1120E+11	5.3760E+07	3.4450E+02	1.0600E+04	5.0420E+02	6.0880E+02	9.7340E+02	5.3930E+08
WSA	1.0560E+11	9.3890E+05	3.4710E+02	8.6980E+03	5.0440E+02	6.0830E+02	9.3960E+02	3.2820E+08
JA	1.7940E+10	1.8280E+05	3.3990E+02	8.2000E+03	5.0460E+02	6.0310E+02	7.5330E+02	2.1750E+06
FOA	7.8370E+10	2.4810E+08	3.5320E+02	1.1580E+04	5.1300E+02	6.0670E+02	8.4660E+02	5.3760E+07
BA	8.6560E+10	1.7380E+05	3.4550E+02	6.2670E+03	5.0210E+02	6.0740E+02	8.9480E+02	1.2130E+08
FA	1.1520E+11	7.0810E+07	3.5110E+02	1.0350E+04	5.0610E+02	6.0940E+02	9.8520E+02	7.2540E+08
GSA	6.7900E+10	6.5160E+05	3.4660E+02	8.3040E+03	5.0230E+02	6.0610E+02	8.2800E+02	4.9730E+07
COA	4.8520E+10	8.5800E+04	3.4200E+02	8.4950E+03	5.0430E+02	6.0520E+02	7.9860E+02	6.6190E+06
STO	6.4120E+10	7.2770E+04	3.4350E+02	7.8310E+03	5.0370E+02	6.0600E+02	8.2460E+02	2.1760E+07
Proposed	6.5130E+09	1.5980E+05	3.3660E+02	3.1440E+03	5.0400E+02	6.0120E+02	7.1700E+02	3.2160E+05

(
Algorithm	nsFnc9	Fnc10	Fnc11	Fnc12	Fnc13	Fnc14	Fnc15	MeanRank
ASO	9.1410E+02	1.1160E+08	1.5240E+03	3.4550E+03	2.8960E+03	1.7930E+03	2.9010E+03	6.200
HHO	9.1380E+02	1.0450E+08	1.4000E+03	7.9160E+03	3.2040E+03	1.9530E+03	3.0660E+03	6.467
HGSO	9.1380E+02	9.4420E+07	1.4040E+03	8.4470E+03	2.8220E+03	1.8750E+03	3.2120E+03	6.333
PRO	9.1370E+02	2.1280E+07	1.2700E+03	2.8880E+03	2.3500E+03	1.7460E+03	2.9110E+03	3.267
BOA	9.1390E+02	2.1920E+08	1.6990E+03	4.6570E+05	3.4210E+03	2.0730E+03	4.5610E+03	9.333
EPO	9.1420E+02	1.9440E+08	2.8940E+03	3.0130E+06	5.3320E+03	2.1520E+03	5.1720E+03	12.467
WSA	9.1410E+02	4.1410E+08	2.3200E+03	1.3860E+06	4.4190E+03	2.2440E+03	3.9330E+03	12.067
JA	9.1390E+02	3.2020E+07	1.2070E+03	2.7520E+03	2.0320E+03	1.7360E+03	2.7660E+03	3.933
FOA	9.1510E+02	1.0710E+09	2.2900E+03	2.1600E+06	4.7040E+03	2.3590E+03	6.9480E+03	13.333
BA	9.1410E+02	3.4960E+08	1.9500E+03	3.2530E+05	3.5150E+03	2.1520E+03	3.9380E+03	9.533
FA	9.1440E+02	7.1380E+08	3.5140E+03	9.6000E+06	5.1830E+03	2.4820E+03	5.6150E+03	14.400
GSA	9.1400E+02	2.8550E+08	1.6590E+03	5.3800E+05	3.2520E+03	2.0060E+03	4.4900E+03	9.067
COA	9.1380E+02	6.3190E+07	1.3740E+03	3.0450E+03	2.2940E+03	1.8130E+03	2.9920E+03	4.800
STO	9.1350E+02	8.1340E+07	1.4030E+03	6.4960E+03	3.0510E+03	1.9460E+03	3.0270E+03	5.800
Proposed	9.1380E+02	1.5780E+07	1.1860E+03	2.5860E+03	1.7720E+03	1.6940E+03	2.7400E+03	1.867

Table (9-b). Proposed algorithm (CT-JAYA-BH-f-5-ls-30) comparison based mean value with other algorithms (dim=30)

Table (10-a). Comparison of the proposed algorithm (CT-JAYA-BH-f-5-ls-30) with other algorithms in terms of running times (dim=10)

Algorithms Fnc1		Fnc2	Fnc3	Fnc4	Fnc5	Fnc6	Fnc7	Fnc8
ASO	9.17600E-02	1.26811E-02	3.93629E-02	1.04766E-02	1.57429E-02	1.19461E-02	1.00487E-02	9.40230E-03
HHO	3.34420E-02	1.19366E-02	4.87387E-02	8.19010E-03	1.81069E-02	1.06316E-02	8.91895E-03	8.15925E-03
HGSO	4.59961E-02	1.25924E-02	4.64545E-02	1.08228E-02	1.93465E-02	1.64179E-02	1.15989E-02	1.19629E-02
PRO	2.25162E-02	9.44755E-03	5.51497E-02	8.37420E-03	1.83951E-02	1.08687E-02	8.37710E-03	8.45795E-03
BOA	9.57315E-03	4.46170E-03	2.29480E-02	4.06745E-03	9.25515E-03	3.98665E-03	3.37030E-03	3.64220E-03
EPO	1.19307E-02	4.76455E-03	2.55155E-02	4.04065E-03	9.56040E-03	4.86855E-03	4.41670E-03	3.88265E-03
WSA	1.38205E-02	4.80375E-03	2.28568E-02	4.29975E-03	9.84275E-03	8.43380E-03	3.96955E-03	3.76980E-03
JA	1.36622E-02	4.63750E-03	2.07585E-02	4.05760E-03	9.51410E-03	4.51765E-03	3.65430E-03	4.19945E-03
FOA	9.97520E-03	4.77635E-03	2.22949E-02	3.95185E-03	8.70760E-03	4.70285E-03	3.73615E-03	3.87700E-03
BA	2.40317E-02	8.33165E-03	2.75215E-02	6.69270E-03	1.39737E-02	6.96255E-03	6.86085E-03	6.96095E-03
FA	2.80083E-02	1.48669E-02	8.92856E-02	1.47975E-02	3.52540E-02	1.76979E-02	1.37971E-02	1.43557E-02
GSA	1.62209E-02	6.25745E-03	2.46440E-02	6.36390E-03	1.08235E-02	5.92765E-03	5.55015E-03	5.38895E-03
COA	3.34478E-02	9.28735E-03	5.34537E-02	6.82755E-03	1.97677E-02	8.25510E-03	5.63400E-03	6.42915E-03
STO	3.36520E-02	1.60291E-02	1.11786E-01	1.41632E-02	3.87074E-02	1.29123E-02	1.21337E-02	1.24408E-02
Proposed	1.18209E-02	3.51275E-03	4.48680E-03	1.43120E-03	2.66880E-03	1.13740E-03	1.04585E-03	1.13895E-03

Table (10-b). Comparison of the proposed algorithm (CT-JAYA-BH-f-5-ls-30) with other algorithms in terms of running times (dim=10)

AlgorithmsFnc9		Fnc10	Fnc11	Fnc12	Fnc13	Fnc14	Fnc15	
ASO	1.03637E-02	1.05770E-02	1.46525E-02	1.07654E-02	1.51125E-02	1.03370E-02	2.76488E-02	
HHO	7.68455E-03	7.70825E-03	1.49557E-02	8.01500E-03	8.52655E-03	8.02950E-03	3.63281E-02	
HGSO	1.11704E-02	1.18966E-02	1.63717E-02	1.19119E-02	1.27569E-02	1.16270E-02	2.92318E-02	
PRO	8.24450E-03	9.84335E-03	1.52479E-02	9.02370E-03	9.18550E-03	9.44675E-03	3.97274E-02	
BOA	3.43525E-03	3.98940E-03	1.00187E-02	4.28685E-03	4.06245E-03	3.99320E-03	1.87498E-02	
EPO	4.41315E-03	4.14345E-03	6.99700E-03	4.25080E-03	4.56155E-03	4.36380E-03	1.96844E-02	
WSA	4.15615E-03	3.66895E-03	7.49885E-03	4.36925E-03	4.16280E-03	4.28780E-03	2.02062E-02	
JA	3.89050E-03	3.76680E-03	7.04270E-03	4.29765E-03	5.14655E-03	4.39330E-03	1.90907E-02	
FOA	3.60830E-03	3.53810E-03	7.01490E-03	3.84200E-03	3.83550E-03	4.01875E-03	1.91006E-02	
BA	7.35745E-03	6.56525E-03	1.12870E-02	8.30270E-03	7.70935E-03	7.44445E-03	2.25158E-02	
FA	1.42211E-02	1.40746E-02	3.01273E-02	1.70208E-02	1.57456E-02	1.78047E-02	8.48136E-02	
GSA	5.49480E-03	5.60325E-03	9.16815E-03	6.34900E-03	6.47565E-03	6.17320E-03	2.07502E-02	
COA	6.80175E-03	6.48360E-03	1.48064E-02	8.51155E-03	7.18760E-03	7.90000E-03	4.65447E-02	
STO	1.44380E-02	1.43507E-02	2.84612E-02	1.95959E-02	1.40703E-02	1.52971E-02	9.29073E-02	
Proposed	1.03320E-03	1.01495E-03	1.68215E-03	1.16075E-03	1.10140E-03	1.16950E-03	3.67050E-03	
Algorithm	ns Fnc1	Fnc2	Fnc3	Fnc4	Fnc5	Fnc6	Fnc7	Fnc8
-----------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------
ASO	2.3745E-01	5.7365E-02	1.7892E-01	4.3519E-02	8.4023E-02	4.3045E-02	4.6933E-02	4.2224E-02
HHO	6.4116E-02	2.9757E-02	2.6694E-01	2.7798E-02	9.6887E-02	2.5818E-02	3.0645E-02	2.6338E-02
HGSO	1.0938E-01	6.8277E-02	2.1208E-01	5.5752E-02	1.1268E-01	5.1214E-02	5.8730E-02	5.6804E-02
PRO	6.5533E-02	4.3362E-02	2.9981E-01	3.3345E-02	1.1211E-01	3.2639E-02	3.2759E-02	3.2174E-02
BOA	2.4277E-02	1.4953E-02	1.4381E-01	1.3546E-02	5.1523E-02	1.0871E-02	1.1816E-02	1.1232E-02
EPO	2.8869E-02	2.0320E-02	1.4748E-01	1.8417E-02	5.4979E-02	1.5953E-02	1.5738E-02	1.6797E-02
WSA	3.2715E-02	1.6485E-02	1.5832E-01	1.5383E-02	5.7284E-02	1.3761E-02	1.7108E-02	1.3283E-02
JA	2.3891E-02	1.7126E-02	1.4374E-01	1.6123E-02	5.2052E-02	1.3293E-02	1.4729E-02	1.3959E-02
FOA	2.4828E-02	1.6255E-02	1.4096E-01	1.5862E-02	5.2075E-02	1.4542E-02	1.5284E-02	1.4579E-02
BA	7.6627E-02	4.1271E-02	1.6503E-01	4.3836E-02	7.9297E-02	4.1802E-02	4.0993E-02	4.0349E-02
FA	8.4104E-02	5.7736E-02	6.0788E-01	5.8778E-02	2.2689E-01	6.0035E-02	5.7464E-02	5.7144E-02
GSA	5.1468E-02	2.9442E-02	1.5182E-01	2.9286E-02	6.2735E-02	2.9930E-02	2.8063E-02	2.4614E-02
COA	4.7695E-02	2.4260E-02	3.4894E-01	2.4249E-02	1.2291E-01	2.2543E-02	2.0152E-02	2.2250E-02
STO	7.6504E-02	4.3976E-02	7.0000E-01	4.6010E-02	2.3988E-01	4.0838E-02	3.9721E-02	4.2687E-02
Proposed	1.4774E-02	4.4430E-03	2.5779E-02	3.3243E-03	1.0321E-02	3.1391E-03	3.0517E-03	3.1228E-03

Table (11-a). Comparison of the proposed algorithm (CT-JAYA-BH-f-5-ls-30) with other algorithms in terms of running times (dim=30)

Table (11-b). Comparison of the proposed algorithm (CT-JAYA-BH-f-5-ls-30) with other algorithms in terms of running times (dim=30)

Algorithm	isFnc9	Fnc10	Fnc11	Fnc12	Fnc13	Fnc14	Fnc15
ASO	4.2804E-02	4.7705E-02	6.9410E-02	4.2407E-02	4.8398E-02	4.6201E-02	1.7395E-01
HHO	2.5797E-02	2.7710E-02	7.3564E-02	3.1997E-02	3.5156E-02	3.6132E-02	2.8179E-01
HGSO	5.4602E-02	5.7584E-02	8.4486E-02	5.3053E-02	5.8238E-02	5.6853E-02	2.1164E-01
PRO	3.4325E-02	3.2933E-02	8.3755E-02	4.0856E-02	4.0796E-02	4.4362E-02	3.0919E-01
BOA	1.1683E-02	1.1886E-02	3.5823E-02	1.4836E-02	1.5783E-02	1.7415E-02	1.4750E-01
EPO	1.6618E-02	1.7530E-02	4.1657E-02	1.9630E-02	1.9781E-02	2.1653E-02	1.5327E-01
WSA	1.2859E-02	1.4186E-02	4.1544E-02	1.7946E-02	1.8171E-02	1.9289E-02	1.6324E-01
JA	1.5140E-02	1.6295E-02	3.8928E-02	1.8338E-02	1.8748E-02	2.0998E-02	1.5007E-01
FOA	1.5840E-02	1.4129E-02	3.9898E-02	1.8169E-02	1.8835E-02	2.0640E-02	1.4437E-01
BA	4.3880E-02	3.9021E-02	6.7057E-02	4.4200E-02	4.5541E-02	4.3703E-02	1.7341E-01
FA	5.7172E-02	5.7710E-02	1.6994E-01	7.3353E-02	7.5795E-02	7.5990E-02	6.4163E-01
GSA	2.7135E-02	2.6474E-02	5.3670E-02	2.9786E-02	2.9761E-02	2.8165E-02	1.5468E-01
COA	2.3502E-02	2.3454E-02	9.0252E-02	3.3199E-02	3.2469E-02	3.4939E-02	3.6670E-01
STO	5.0089E-02	4.5600E-02	1.7310E-01	6.2420E-02	6.7081E-02	6.8681E-02	7.2966E-01
Proposed	3.0640E-03	2.9348E-03	7.3051E-03	3.7306E-03	3.5017E-03	3.9564E-03	2.5079E-02

4 Conclusion and discussion

In this study, a novel hybrid optimization algorithm, termed CT-JAYA-BH, is introduced to address problems characterized by high computational costs and limited running budgets. This proposed algorithm is developed by integrating the original Jaya algorithm with the β -Hill Climbing local search technique to enhance solution accuracy. Additionally, the Jaya algorithm is hybridized with three well-established local search methods: β-Hill Climbing, Nelder-Mead, and Quasi-Newton methods, and their performance is systematically evaluated using the CEC 2015 benchmark set. Among these hybrid approaches, the variant that combines Java with *β*-Hill Climbing demonstrated superior performance, yielding more effective optimization results than the other two hybrid models. To maximize the efficiency of the Jaya-\beta-Hill Climbing algorithm, a comprehensive parameter analysis was conducted on the CEC 2015 benchmark set. Subsequently, the refined algorithm was compared against 14 different new release optimization techniques using the same benchmark

suite. The experimental results indicate that the proposed CT-JAYA-BH algorithm consistently outperformed its competitors across both 10-dimensional and 30-dimensional problem instances, achieving the highest ranking among all evaluated methods.

In future studies, Jaya algorithm can be combined with different local search algorithms and the most suitable local search algorithm for Jaya algorithm can be determined. Moreover CT-JAYA-BH can be applied to recent expensive engineering problems.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 11%

References

 A. Chaudhary and B. Bhushan, An improved teaching learning based optimization method to enrich the flight control of a helicopter system. Sādhanā, 48, 4, 222, 2023. https://doi.org/10.1007/s12046-023-02271-4

- [2] Z. Chen, J. Zou, and W. Wang, Digital twin-oriented collaborative optimization of fuzzy flexible job shop scheduling under multiple uncertainties, Sādhanā. 48, 2, 78, 2023. https://doi.org/10.1007/s12046-023-02133-z
- [3] M. Dehghani, Z. Montazeri, E. Trojovská, and P. Trojovský, Coati Optimization Algorithm: A new bioinspired metaheuristic algorithm for solving optimization problems. Knowledge-Based Systems, 259, 110011, 2023. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.110011
- [4] A.H. Saadat, M. Fateh, and J. Keighobadi, Grey wolf optimization algorithm-based robust neural learning control of passive torque simulators with predetermined performance. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 32, 126–143, 2024. https://doi.org/10.55730/1300-0632.4059
- [5] E.H. Houssein, A.G. Gad, and Y.M. Wazery, Jaya Algorithm and Applications: A Comprehensive Review. in: N. Razmjooy, M. Ashourian, and Z. Foroozandeh, Eds. Metaheuristics and Optimization in Computer and Electrical Engineering, Springer International Publishing, pp. 3–24, Cham, 2021.
- [6] R. Venkata Rao, Jaya: An Advanced Optimization Algorithm and its Engineering Applications, 2018.
- [7] G. Yavuz, Senior Learning JAYA With Powell's Method and Incremental Population Strategy. IEEE Access, 10, 103765–103780, 2022. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3210122
- [8] H. M. Pandey, Jaya a novel optimization algorithm: What, how and why? 6th International Conference -Cloud System and Big Data Engineering (Confluence), 728-730, Noida, India, 2016, 14-15 January 2016.
- [9] R.K. Achanta and V.K. Pamula, DC motor speed control using PID controller tuned by jaya optimization algorithm. 2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI), 983–987, Chennai, India, 2017, 21-22 September 2017
- [10] X. Jian and Z. Weng, A logistic chaotic JAYA algorithm for parameters identification of photovoltaic cell and module models. Optik, 203, 164041,2020. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3210122
- [11] Y.-J. Zhang, Y.-F. Wang, L.-W. Tao, Y.-X. Yan, J. Zhao, and Z.-M. Gao, Self-adaptive classification learning hybrid JAYA and Rao-1 algorithm for largescale numerical and engineering problems. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 114, 105069, 2022. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105069
- [12] F. Zhao, H. Zhang, L. Wang, et al., A surrogate-assisted Jaya algorithm based on optimal directional guidance and historical learning mechanism. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 111, 104775, 2022. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.104775
- [13] D.R. Nayak, Y. Zhang, D.S. Das, and S. Panda, MJaya-ELM: A Jaya algorithm with mutation and extreme learning machine based approach for sensorineural hearing loss detection. Applied Soft Computing, 83, 105626, 2019. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105626

- [14] M.A. Al-Betar, β-Hill climbing: an exploratory local search. Neural Computing and Applications, 28, 1, 153–168, 2017. https://doi.org/10.1007/s00521-016-2328-2
- [15] K.K. Ghosh, S. Ahmed, P.K. Singh, Z.W. Geem, and R. Sarkar, Improved Binary Sailfish Optimizer Based on Adaptive β-Hill Climbing for Feature Selection. IEEE Access, 8, 83548–83560, 2020. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2991543
- [16] B.H. Abed-alguni and F. Alkhateeb, Intelligent hybrid cuckoo search and β-hill climbing algorithm. Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, 32, 2, 159–173, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2018.05.003
- [17] S. Ahmed, K.K. Ghosh, L. Garcia-Hernandez, A. Abraham, and R. Sarkar, Improved coral reefs optimization with adaptive β-hill climbing for feature selection. Neural Computing and Applications, 33, 12, 6467–6486, 2021. https://doi.org/10.1007/s00521-020-05409-1
- [18] O.A. Alomari, A.T. Khader, M.A. Al-Betar, and M.A. Awadallah, A novel gene selection method using modified MRMR and hybrid bat-inspired algorithm with β-hill climbing. Applied Intelligence, 48, 11, 4429–4447, 2018. https://doi.org/10.1007/s10489-018-1207-1
- [19] R. Rao, Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems. International Journal of Industrial Engineering Computations, 7, 1, 19–34, 2016.
- [21] Q. Chen, B. Liu, Q. Zhang, J. Liang, P. Suganthan, and B. Qu, Problem definitions and evaluation criteria for CEC 2015 special session on bound constrained singleobjective computationally expensive numerical optimization. Computational Intelligence Laboratory, Zhengzhou, China, Technical Report, Nov 2014.
- [22] J.A. Nelder and R. Mead, A Simplex Method for Function Minimization. The Computer Journal, 7, 4, 308–313, 1965. https://doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308
- [23] D.F. Shanno, Conditioning of Quasi-Newton Methods for Function Minimization. Mathematics of Computation, 24, 111, 647–656, 1970. https://doi.org/10.2307/2004840
- [24] W. Zhao, L. Wang, and Z. Zhang, Atom search optimization and its application to solve a hydrogeologic parameter estimation problem. Knowledge-Based Systems, 163, 283–304, 2019. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.08.030
- [25] A.A. Heidari, S. Mirjalili, H. Faris, I. Aljarah, M. Mafarja, and H. Chen, Harris hawks optimization: Algorithm and applications. Future Generation Computer Systems, 97, 849–872, 2019. https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.028

- [26] F.A. Hashim, E.H. Houssein, M.S. Mabrouk, W. Al-Atabany, and S. Mirjalili, Henry gas solubility optimization: A novel physics-based algorithm. Future Generation Computer Systems, 101, 646–667, 2019. https://doi.org/10.1016/j.future.2019.07.015
- [27] S.H. Samareh Moosavi and V.K. Bardsiri, Poor and rich optimization algorithm: A new human-based and multi populations algorithm. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 86, 165–181, 2019. https://doi.org/10.1016/j.future.2019.07.015
- [28] S. Arora and S. Singh, Butterfly optimization algorithm: a novel approach for global optimization. Soft Computing, 23, 715–734, 2019. https://doi.org/10.1007/s00500-018-3102-4
- [29] G. Dhiman and V. Kumar, Emperor penguin optimizer: A bio-inspired algorithm for engineering problems. Knowledge-Based Systems, 159, 20–50, 2018. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.06.001
- [30] A. Baykasoğlu and Ş. Akpinar, Weighted Superposition Attraction (WSA): A swarm intelligence algorithm for optimization problems – Part 1: Unconstrained optimization. Applied Soft Computing, 56, 520–540, 2017. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.10.036

- [31] W.-T. Pan, A new Fruit Fly Optimization Algorithm: Taking the financial distress model as an example. Knowledge-Based Systems, 26, 69–74, 2012. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2011.07.001
- [32] X. Yang and A. Hossein Gandomi, Bat algorithm: a novel approach for global engineering optimization. Engineering Computations, 29, 5, 464–483, 2012. https://doi.org/10.1108/02644401211235834
- [33] X.-S. Yang, Firefly Algorithms for Multimodal Optimization. In: O. Watanabe and T. Zeugmann, Eds. Stochastic Algorithms: Foundations and Applications. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 169–178, 2009.
- [34] E. Rashedi, H. Nezamabadi-pour, and S. Saryazdi, GSA: A Gravitational Search Algorithm. Information Sciences, 179, 13, 2232–2248, 2009. https://doi.org/10.1016/j.ins.2009.03.004
- [35] P. Trojovský, M. Dehghani, and P. Hanuš, Siberian Tiger Optimization: A New Bio-Inspired Metaheuristic Algorithm for Solving Engineering Optimization Problems. IEEE Access, 10, 132396–132431, 2022. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3229964





Niğde Ömer Halisdemir Üni**ver**sitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araștırma makalesi / Research article

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



Job rejection scheduling problems with deterioration and learning effects

Bozulma ve öğrenme etkisi altında iş reddetmeli çizelgeleme problemi

Berrin Atalay^{1,*} (1), M. Duran Toksarı²

^{1,2}Erciyes University, Industrial Engineering Department, 32280, Kayseri, Türkiye

Abstract

In our study, deterioration and the learning effect in the job rejection scheduling environment was considered together. The processing time of the jobs will decrease with the effect of learning, but will also increase with the effect of deterioration. In our study, this situation was examined for four different objectives. These problems are total completion time minimization, makespan minimization and TADC minimization for single machine scheduling problems and parallel machine scheduling problems with makespan minimization. With three different learning rates (0.8, 0.7, 0.6) and two different deterioration rates (0.2, 0.1), 10 jobs, 20 jobs and 30 jobs problems are solved with mathematical models and algorithms and a comparison table is presented.

Keywords: Learning effect, Deterioration effect, Job rejection, Single machine, Parallel machines.

1 Introduction

In our study, with job rejection scheduling problem under the learning and deterioration effects was considered. The learning effect refers to the phenomenon where the processing time of a job decreases as a function of its position in the sequence. This effect arises from the experience gained by workers or machines performing repetitive tasks, leading to increased efficiency and reduced completion times. In contrast, the deterioration effect describes a scenario where job processing times increase due to factors such as machine wear, worker fatigue, or material degradation. This effect is particularly relevant in manufacturing and maintenance-intensive environments, where prolonged operations lead to decreased efficiency over time. Four different objectives are discussed; these are rejection cost and makespan minimization for a single machine, rejection cost and total completion time minimization for a single machine, rejection cost and total absolute difference completion time minimization for a single machine, and rejection cost and makespan minimization on parallel machines.

Mosheiov is the first person to develop the terminology of learning effect [1]. In his study [2] he studied the total completion time minimization under the effect of learning. The equality that Biskup [3] thinks for the actual processing time is as follows in Equation 1.

Öz

Çalışmamızda, iş reddetmeli çizelgeleme ortamında bozulma ve öğrenme etkisi birlikte ele alınmıştır. İşlerin işlem süresi öğrenme etkisiyle azalırken, bozulma etkisiyle de artacaktır. Bu durum, çalışmamızda dört farklı amaç doğrultusunda incelenmiştir. Ele alınan problemler, tek makineli çizelgeleme problemleri için toplam tamamlanma süresinin en aza indirilmesi, çevrim süresinin (makespan) en aza indirilmesi ve TADC minimizasyonu ile paralel makineli çizelgeleme problemleri için çevrim süresinin en aza indirilmesidir. Üç farklı öğrenme oranı (0.8, 0.7, 0.6) ve iki farklı bozulma oranı (0.2, 0.1) kullanılarak 10 iş, 20 iş ve 30 iş içeren problemler matematiksel modeller ve algoritmalar ile çözülmüş ve karşılaştırma tablosu sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Öğrenme etkisi, Bozulma etkisi, Iş reddetme, Tek makine, Paralel makineler.

$$p_{j[r]} = (p_j)r^{\alpha} \tag{1}$$

If job *J* is assigned in r^{th} position its actual processing time is $p_{j[r]}$. And basic processing time of job *J* is p_j and the learning – index is α ($\alpha < 0$).

In the study of Lee [4], the effect of learning and deterioration was first considered together. The proposed equality for the processing time is as follows Equation 2 is given below.

$$p_{i,r} = (p_0 + \gamma_i t) r^a \tag{2}$$

If job i assigned in position r, actual processing time is $p_{i,r}$. p_0 is the basic processing time and γ ($\gamma > 0$) is the deterioration rate. *t* is the started time of job *i* and α ($\alpha < 0$) is the learning - index.

Also, in Wang [5]'s study, the deterioration effect and the learning effect are considered at the same time. In the study of Mosheiov [6], the problem of scheduling jobs under linear deterioration in a single machine was examined. The aim of the study is to minimize flow time. In the study of Kononov [7], the processing times of the jobs were defined as an increasing function of starting times. In the study of Hsieh and Bricker [8], the processing time of the works was examined as a linearly increasing function of starting time.

The rejection of jobs in machine scheduling was first considered by Bartal [9]. In Zhang et al. [10], scheduling

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: berrinucarkus@erciyes.edu.tr. (B. Atalay) Geliş / Received: 25.10.2023 Kabul / Accepted: 07.03.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngumuh.1381334

problem with a single machine under job rejection constraint was examined. The job is either rejected and the rejection cost is paid or the job is accepted and processed on one machine. Toksarı et al. [11] simultaneously considered the effect of nonlinear deterioration and time - based learning. In Gerstl and Mosheiov [12], position-based processing times and rejection of jobs are combined for the parallel machine scheduling problem. There are two objectives; the first objective function is to minimize the sum of flow time and the cost of rejected jobs, and the second objective function is to minimize the total load and the cost of rejected jobs.

In the study of Mor and Mosheiov [13], position-based processing times on parallel match machines and positionbased processing times on separate machines and TADC (total absolute difference completion time) were studied. In the study of Li et al. [14], a single machine scheduling problem was investigated with deteriorated jobs. They defined the deterioration of the work as a proportional function of time. The aim is to minimize the TADC.

In second section, rejection cost and maximum completion time minimization under the effects of learning and deterioration in a single machine environment are discussed, theorem is defined, proof, mathematical models and algorithms are presented. In section 3, rejection cost and total completion time minimization under the effects of learning and deterioration in a single machine environment are discussed, theorem is defined, proof, mathematical models and algorithms are presented. In section 4, rejection cost and TADC minimization under the effects of learning and deterioration in a single machine environment are discussed, mathematical models and algorithms are presented. In fifth section, rejection cost and makespan minimization under the effects of learning and deterioration in parallel machines environment are discussed, theorem is defined, proof, mathematical models and algorithms are presented. In section 6, the results of the algorithms and mathematical models are given for 10 jobs, 20 jobs and 30 jobs. The developed algorithms were coded in Visual Studio C# 2017. Lingo 11.0 program was used to solve mathematical models. The processing times and penalty costs of all jobs were randomly generated.

2 Makespan and rejection cost minimization for single machine scheduling problem

In our study, one machine, n jobs were considered. P_{jr} is the duration of job *j* assigned to position *r*. *i*, *j*, r = 1, ..., n. If *j* is not assigned to the machine, it receives a penalty cost of δ_j . α is the learning coefficient. In literature, it is generally taken as 0.8. γ : coefficient of deterioration $1 > \gamma > 0$. T_r : This is the starting time of the job that started in position *r*. X_{ijr} is our decision variable, if *j* is assigned to position *r*, then 1 is 0. When i = 1, it means that it is a job of the accepted set of jobs, when i = 2, it means that it is a job of the rejected set of jobs and receives a penalty cost of δ_j . The maximum completion time is shown as C_{max} .

Theorem 1: The optimum solution of the $1|p_{j[r]} = r^2(p_j + \gamma, T_r)r^{\alpha}|C_{max}$ problem is achieved by ordering the jobs accordingly the LPT rule.

The objective function is designed to minimize the makespan C_{max} while considering both job processing times and a specific penalty term (γ . T_r). The function incorporates a job-dependent term, r^2 , and an additional parameter, α , to adjust the impact of job characteristics. The optimal solution is achieved by arranging the jobs in the order specified by the Longest Processing Time (LPT) rule, which prioritizes jobs with the longest processing times.

Proof: Under the effect of learning, n work is considered a single machine problem. $p_k \leq p_j$ and $\alpha = log(a)/log(2) < 0$ are assumed. r is the position where the job is scheduled. A: This is the completion time of the last job scheduled before k and j jobs.



Figure 1. Representation of *i* and *j* jobs on chart S and S'

For the *S* chart seen in Figure 1 (a);

$$C_k(S) = A + r^2 (p_k + \gamma . T_r) r^{\alpha}$$
(3)

$$C_{j}(S) = A + r^{2}(p_{k} + \gamma . T_{r})r^{\alpha} + (r+1)^{2}(p_{j} + \gamma . T_{r+1})(r+1)^{\alpha}$$
(4)

For the S' chart shown in Figure 1 (b);

$$C_j(S') = A + r^2(p_j + \gamma T_r)r^{\alpha}$$
⁽⁵⁾

$$C_k(S') = A + r^2 (p_j + \gamma . T_r) r^{\alpha} + (r+1)^2 (p_k + \gamma . T_{r+1}) (r+1)^{\alpha}$$
(6)

The calculation of the completion time of job k in chart S is given in Equation (3). The calculation of the completion time of job j in chart S' is given in Equation (5). Equation (4) and (6)'s differences are obtained by taking the

following situation. The chart S' is better than the chart S is shown Equation (7).

$$C_{k}(S') - C_{j}(S) = (p_{j} - p_{k})(r^{2+\alpha} - (r + 1)^{2+\alpha}(1-\gamma)) \text{ and } \alpha < 0 \text{ and } p_{k} \le p_{j} \text{ if;}$$

$$C_{k}(S') - C_{j}(S) < 0$$
(7)

Theorem 1 shows that the chart S' is better than the chart S and proves that the optimum solution of the problem $1|p_{j[r]} = r^2(p_j + \gamma, T_r)r^{\alpha}|C_{max}$ is obtained by LPT rule.

The mathematical model of our problem is as follows.

$$\min \sum_{j=1}^{n} \sum_{r=1}^{n} r^{2} \cdot ((p_{j} + \gamma . T_{r}) . r^{\alpha} . X_{1jr}) + \delta_{j} . X_{2jr}$$
(8)

$$\sum_{j=1}^{n} X_{ijr} \le 1 \qquad (r = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (i = 1, 2) \qquad (9)$$

$$\sum_{i=1}^{2} \sum_{r=1}^{n} X_{ijr} = 1 \qquad (j = 1, 2, 3, ..., n) \qquad (10)$$

$$T_1 = 0 \tag{11}$$

$$T_r = \sum_{j=1}^{n} \sum_{k=1}^{r-1} r^2 \cdot ((p_j + \gamma \cdot T_k) \cdot k^{\alpha} \cdot X_{1jk}) \quad (r = 2, 3, \dots, n) \ (k = 1, \dots n)$$
(12)

$$X_{ijr} \in (0,1) \tag{13}$$

The objective function (Equation (8) is the minimization of rejection cost and maximum completion time. Equation (9) guarantees that job j will be assigned to a single position, whether it is accepted or rejected. Equation (10) ensures that each job is assigned to a single position. Equation (11) indicates that the start time of the job in position 1 is 0. Equation (12) ensures the calculation of the start time of the job in position r. Equation (13) states that the decision variable must be either 0 or 1.

The steps for the proposed algorithm are given below Makespan algorithm under the effect of deterioration

Makespan algorithm under the effect of deterioration Input: R, A, n, i, TC, γ , p_j , δ_j *R*: Rejected jobs. *A*: Accepted jobs. *n*: Number of jobs. TC: Total Cost= $\sum_{n=1}^{A} C_{max} + \sum_{j=1}^{R} \delta_j$. p_j : Processing time of job j. δ_j : Rejection cost of job j. γ : Deterioration rate. Step 1: i = 0, R = 0, A = n. Accept all jobs, reject no job. Schedule the accepted jobs according to the LPT rule.

Compute the *TC* as much as the C(n, i) combination.

Step 2: i = i + 1, R = i, A = n - 1. Decrease 1 accepted jobs and increase as i rejected jobs. Assign the accepted jobs by LPT rule. Compute the *TC* of the plot as much as the *C* (*n*, *i*) combination.

Step 3: If i < n, Repeat Step 2, If i = n stop and go to Step 4.

Step 4: $min \{TC_1, TC_2, ..., TC_{2^n}\}$. Make comparison all TC, devise the smallest TC. The schedule in which the smallest TC value is optimum.

3 Rejection cost and total completion time minimization for single machine scheduling problem

In our study, one machine, n jobs were considered. p_{jr} is the duration of job *j* assigned to position *r*. *j*, r = 1, ..., n. If *j* is not assigned to the machine, it receives a penalty cost of δ_j . α is the learning coefficient. In literature, it is generally taken as 0.8 [7, 11, 14]. γ : coefficient of deterioration $1 > \gamma > 0$. T_r: is the starting time of the job that started in position *r*. X_{ijr} is our decision variable. If *j* is assigned to position *r*, X_{ijr} becomes 1, otherwise it is 0. When i = 1, it means that it is a job of the accepted set of jobs, when i = 2, it means that it is a job of the rejected set of jobs and receives a penalty cost of δ_j .

Theorem 2: The optimum solution of the $1 | p_{j[r]} = \left(\frac{r}{2}\right) \cdot (p_j + \gamma \cdot T_r) \cdot r^{\alpha} | \sum C$ problem is achieved by ordering the jobs as required to the SPT rule.

The objective function is aims to minimize the total completion time by considering both the job processing times and a penalty term (γ, T_r) . The function also includes a factor, $\left(\frac{r}{2}\right)$, that adjusts the impact of the job position and a parameter α to account for job characteristics. The optimal solution is achieved by arranging the jobs according to the Shortest Processing Time (SPT) rule, which prioritizes jobs with the shortest processing times to minimize the total completion time.

Proof: Under the effect of learning, n work is considered a single machine problem. $\alpha = log(\alpha)/log(2) < 0$ and $p_k \leq p_j$ are assumed. The position to which the job is scheduled is assigned is r. A: This is the completion time of the last job scheduled before *i* and *j* jobs.

For the S chart as seen in Figure 1 (a);

$$C_k(S) = A + (\frac{r}{2})(p_k + \gamma . T_r)r^{\alpha}$$
(14)

$$C_{j}(S) = A + \left(\frac{r}{2}\right) (p_{k} + \gamma . T_{r}) r^{\alpha} + \left(\frac{r+1}{2}\right) \left(p_{k} + \gamma (p_{j} + \gamma . T_{r})\right) (r+1)^{\alpha}$$
(15)

$$\sum C(S) = 2A + r(p_k + \gamma . T_r)r^{\alpha} + \left(\frac{r+1}{2}\right) \left(p_k + \gamma \left(p_j + \gamma . T_r\right)\right) (r+1)^{\alpha}$$
(16)

For the S' chart shown in Figure 1 (b);

$$C_j(S') = A + \left(\frac{r}{2}\right)(p_j + \gamma . T_r)r^{\alpha}$$
(17)

$$C_{k}(S') = A + \left(\frac{r}{2}\right) \left(p_{j} + \gamma . T_{r}\right) r^{\alpha} + \left(\frac{r+1}{2}\right) \left(p_{j} + \gamma (p_{k} + \gamma . T_{r})\right) (r^{-(18)} + 1)^{\alpha}$$

$$\sum C(S') = 2A + r\left(p_j + \gamma \cdot T_r\right)r^{\alpha} + \left(\frac{r+1}{2}\right)\left(p_j + \gamma(p_k + \gamma \cdot T_r)\right)(r+1)^{\alpha}$$
(19)

The calculation of the completion time of job k in chart S is given in Equation (14). The calculation of the completion time of job j in chart S is given in Equation (15). The calculation of the completion time of job j in chart S' is given in Equation (17). The calculation of the completion time of job k in chart S' is given in Equation (18). Equation (16) and (19)'s differences are obtained by taking the following situation in Equation (20). The chart S is better than the chart S' is shown Equation (21).

$$\sum C(S') - \sum C(S)$$

$$= (p_j - p_k) \left(rr^{\alpha} - \left(\frac{r+1}{2}\right)(r+1)^{\alpha} \right)$$
(20)

$$= \left(p_j - p_k\right) \left(2r^{\alpha+1} - (\frac{r+1}{2})(r+1)^{\alpha}(1-\gamma)\right) > 0 \quad (21)$$

According to Theorem 2, *S* is shown to be better than *S'* and $1 | p_{j[r]} = \left(\frac{r}{2}\right) \cdot (p_j + \gamma \cdot T_r) \cdot r^{\alpha} | \sum C$ prove that it is obtained by SPT rule.

The mathematical model of our problem is as follows.

$$\min \sum_{j=1}^{n} \sum_{r=1}^{n} (\frac{r}{2}) \cdot (n-j+1) \cdot ((p_{j}+\gamma \cdot T_{r}) \cdot r^{\alpha} \cdot X_{1jr}) + \delta_{j} \cdot X_{2jr}$$
(22)

$$\sum_{j=1}^{n} X_{ijr} \le 1 \qquad (r = 1, 2, 3, ..., n) \ (i = 1, 2) \qquad (23)$$

$$\sum_{i=1}^{2} \sum_{r=1}^{n} X_{ijr} = 1 \qquad (j = 1, 2, 3, ..., n) \qquad (24)$$

$$T_1 = 0 \tag{25}$$

$$T_{r} = \sum_{j=1}^{n} \sum_{k}^{r-1} r^{2} . ((p_{j} + \gamma . T_{k}) . k^{\alpha} . X_{1jk})$$
(26)
= 2, 3, ..., n)

$$X_{ijr} \in (0,1) \tag{27}$$

The objective function is the minimization of rejection cost and total completion time shown in Equation (22). Equation (23) guarantees that job j will be assigned to a single position, whether it is accepted or rejected. Equation (24) ensures that each job is assigned to a single position. Equation (25) indicates that the start time of the job in position 1 is 0. Equation (26) ensures the calculation of the start time of the job in position r. Equation (27) states that the decision variable must be either 0 or 1.

The steps for the proposed algorithm are given below:

Under the effect of deterioration total completion time algorithm

Input: *R*, *A*, *n*, *i*, *TC*, γ , *p_j*, δ_j . *R*: Rejected jobs. *A*: Accepted jobs. *n*: Number of jobs. TC: Total Cost= $\sum_{n=1}^{A} C_{max} + \sum_{j=1}^{R} \delta_j$. *p_j*: Processing time of job j. δ_j : Rejection cost of job j. Y: Deterioration rate.

Step 1: i = 0, R = 0, A = n. Accept all jobs, reject no job. Schedule the accepted jobs according to the SPT rule. Compute the *TC* as much as the *C*(*n*, *i*) combination.

Step 2: i = i + 1, R = i, A = n - 1. Decrease 1 accepted jobs and increase as i rejected jobs. Assign the accepted jobs by SPT rule. Compute the *TC* of the plot as much as the *C* (*n*, *i*) combination.

Step 3: If i < n, Repeat Step 2, If i = n stop and go to Step 4.

Step 4: $min \{TC_1, TC_2, ..., TC_{2^n}\}$. Make comparison all TC, devise the smallest TC. The schedule in which the smallest TC value is optimum.

4 Rejection cost and total absolute difference completion time minimization for single machine scheduling problem

In our study, the intuitive method developed by Oron [15] was used and developed the jobs with under the effect of job rejection, deterioration and learning.

Kanet [16] expressed the position weight as $w_r = (r - 1)(n - r + 1), r = 1, 2, ..., n$. Position weights were used in this way in our study.

The mathematical model of our problem is as follows.

$$\min \sum_{j=1}^{n} \sum_{r=1}^{n} (r-1)(n-j+1) \cdot (p_{j}+\gamma \cdot T_{r}) \cdot r^{\alpha} \cdot X_{1jr} + \delta_{j} \cdot X_{2jr}$$
(28)

$$\sum_{j=1}^{n} X_{ijr} \le 1 \qquad (r = 1, 2, 3, ..., n) \qquad (i = 1, 2)$$

$$\sum_{i=1}^{2} \sum_{r=1}^{n} X_{ijr} = 1 \qquad (j = 1, 2, 3 \dots, n) \qquad (30)$$

$$T_1 = 0 \tag{31}$$

$$T_r = \sum_{j=1}^{n} \sum_{k}^{r-1} ((p_j + \gamma . T_k) . k^{\alpha} . X_{1jk}) \quad (r$$

$$= 2, 3, ..., n)$$
(32)

$$X_{ijr} \in (0,1) \tag{33}$$

The objective function is given in Equation (28) the minimization of total absolute difference completion time and rejection cost. Equation (29) guarantees that job j will be assigned to a single position, whether it is accepted or rejected. Equation (30) ensures that each job is assigned to a single position. Equation (31) indicates that the start time of the job in position 1 is 0. Equation (32) ensures the calculation of the start time of the job in position r. Equation (33) states that the decision variable must be either 0 or 1. The steps for the proposed algorithm are as follows:

Input: *R*, *A*, *n*, *i*, *TC*, γ , *p_j*, δ_j . *R*: Rejected jobs. *A*: Accepted jobs. *n*: Number of jobs. *TC*: Total Cost= $\sum_{n=1}^{A} TADC + \sum_{j=1}^{R} \delta_j$. *p_j*: Processing time of job j. δ_j : Rejection cost of job j. γ : Deterioration rate.

If *t* is even go to Step 1 and if *t* is odd go to Step 3. Step 1: Assign job $J_{t/2+2-i}$ to position *i*, $i = 1, 2, ..., \frac{t}{2} +$

1.

Step 2: Assign job J_i to position i, $i = \frac{t}{2} + 2$, $\frac{t}{2} + 3$, ..., t. Of the result form: $\{J_{\frac{t}{2}+1}, J_{\frac{t}{2}}, ..., J_3, J_2, J_1, J_{\frac{t}{2}+2}, J_{\frac{t}{2}+3}, ..., J_t\}$. Step 3: Assign job $J_{\frac{t+5}{2}-i}$ to position i, $i = 1, 2, ..., \frac{t+3}{2}$.

Step 4: Assign job J_i to position i, $i = \frac{t+5}{2}, \frac{t+7}{2}, ..., t$. Go

to Step 5.

Schedule of jobs: $\{J_{\frac{t+3}{2}}, J_{\frac{t+1}{2}}, ..., J_3, J_2, J_1, J_{\frac{t+5}{2}}, J_{\frac{t+7}{2}}, ..., J_t\}$. Step 5: Calculate TC.

Step 6: $min \{TC_1, TC_2, ..., TC_{2^n}\}$. Comparison all TC, devise the smallest TC. The schedule on which the smallest TC is obtained is nearest the optimum.

5 Rejection cost and total absolute difference completion time minimization for single machine scheduling problem

Theorem 1 proved that the optimum solution for the $2|p_{j[r]} = r(p_j + \gamma. T_r)r^{\alpha}|C_{max}$ problem would be obtained by ordering the works according to the LPT rule according to the process time.

The mathematical model of our problem is as follows.

$$\min \sum_{j=1}^{n} r.(p_{j} + \gamma.T_{r}).r^{\alpha}.X_{1jr} + \sum_{j=1}^{n} r.(p_{j} + \gamma.T1_{r}).r^{\alpha}.X_{2jr} + \delta_{j}.X_{3jr}$$
(34)

$$\sum_{j=1}^{n} X_{ijr} \le 1 \qquad (i = 1, 2, 3) \quad (r = 1, 2, ..., n) \quad (35)$$

$$\sum_{i=1}^{3} \sum_{r=1}^{n} X_{ijr} = 1 \qquad (j = 1, 2, ..., n)$$
(36)

$$T_r = \sum_{j=1}^{n} \sum_{k}^{r-1} ((p_j + \gamma, T_k), k^{\alpha}, X_{1jk}) \quad (r$$

$$= 2, 3, ..., n). \quad (37)$$

$$T1_1 = 0 \tag{38}$$

$$T1_{r} = \sum_{j=1}^{n} \sum_{k}^{r-1} ((p_{j} + \gamma.T1_{k}).k^{\alpha}.X_{1jk}) \quad (r = 2, 3, ..., n).$$
(39)

$$X_{ijr} \in (0,1) \tag{40}$$

The objective function is the minimization of makespan and rejection cost is shown in Equation (34). Equation (35) guarantees that job *j* will be assigned to a single position, whether it is accepted or rejected. Equation (36) ensures that each job is assigned to a single position. Equation (37) ensures the calculation of the start time of the job in position *r*. Equation (38) indicates that the start time of the job in position 1 is 0. Equation (39) ensures the calculation of the start time of the job in position *r*. Equation (40) states that the decision variable must be either 0 or 1.

The algorithm used for single machine makespan minimization was also used for parallel machine.

6 Computational results

Mathematical model results and algorithm results obtained for 10 jobs, 20 jobs and 30 jobs are as follows.

The mathematical model and the algorithm results obtained for 10 jobs, 20 jobs, and 30 jobs are given in Table 1, Table 2, and Table 3, respectively. Three commonly used learning rates and two deterioration rates from the literature were used.

The learning ratio is a quantitative measure used to assess the impact of learning effects on processing times in scheduling and optimization problems. It represents the rate at which performance improves as a function of accumulated experience, typically observed in repetitive production or task execution scenarios. Mathematical Model Results have been obtained based on the objective functions in the mathematical models in Lingo 11.0 program. Algorithm Results are the outcomes obtained from the proposed algorithms. Algorithms were coded in Visual Studio C# 2017. Accuracy is calculated using the formula: (Mathematical Model Results) / (Algorithm Results) * 100. It compares the result obtained by the algorithm with the mathematical model result in percentage terms.

As shown in Table 1, the mathematical and algorithm model results for single machine makespan minimization and total completion time minimization were the same.

For TADC, the results were obtained with an average accuracy of about 87%.

For parallel machine makespan minimization, the proposed algorithm is more accurate.

As shown in Table 2, for the 20 jobs, the average of 100% accuracy was obtained in the problem of makespan minimization.

The accuracy obtained for total completion time minimization is 98%.

For TADC minimization, the results were obtained with an approximate accuracy of 94.5%.

As shown in Table 3, as the number of jobs increases, it is seen that the proposed algorithm works better for makespan minimization. In the total completion time minimization problem, except the 60% learning rate, the proposed algorithm is better for all other results.

For TADC minimization, the results were approximately 93.2% accurate.

For the parallel machine makespan minimization problem, all results except 80% learning rate and 10% deterioration rate are better than the proposed algorithm.

Table 1. Algorithm results and mathematical model results for 10 jobs.

Number of Jobs	lumber of Objective Functions		Deterioration Ratio	Mathematical Model Results	Algorithms Results	Accuracy
	Makespan for single machine	80%	0.1	303.04	303.04	100.00
		80%	0.2	306.88	306.88	100.00
	-	70%	0.1	300.16	300.16	100.00
	-	70%	0.2	303.52	303.52	100.00
	-	60%	0.1	297.28	297.28	100.00
	-	60%	0.2	300.16	300.16	100.00
	Total Completion	80%	0.1	310.68	310.68	100.00
	-	80%	0.2	311.16	311.16	100.00
	-	70%	0.1	304.22	304.22	100.00
	-	70%	0.2	306.457	306.457	100.00
	-	60%	0.1	297.566	297.565	100.00
	-	60%	0.2	299.358	299.358	100.00
10 jobs	TADC	80%	0.1	282.995	324.406	87.23
	-	80%	0.2	290.558	326	89.13
	-	70%	0.1	272.409	309.353	88.06
	-	70%	0.2	278.736	326	85.50
	-	60%	0.1	262.413	295.822	88.71
	-	60%	0.2	267.594	310.034	86.31
	Makespan for parallel machines	80%	0.1	247.489	213.72	115.80
	Fur unor 1100-1100	80%	0.2	258.244	218.75	118.05
	-	70%	0.1	235.213	200.108	117.54
	-	70%	0.2	248.0227	206.43	120.15
	-	60%	0.1	221.1609	189.545	116.68
	-	60%	0.2	229.111	193.532	118.38

Number of Jobs	Objective Functions	LR (Learning Ratio)	Deterioration Ratio	Mathematical Model Results	Algorithms Results	Accuracy
	Makespan for	80%	0.1	669.41	669.41	100.00
	single machine	80%	0.2	705.25	686.989	102.66
		70%	0.1	660.0025	660	100.00
		70%	0.2	672.9083	672.909	100.00
		60%	0.1	642.02	642.016	100.00
		60%	0.2	659.5101	660.973	99.78
	Total	80%	0.1	755.083	741.815	101.79
	Completion Time	80%	0.2	783.72	742.986	105.48
		70%	0.1	720.87	738.35	97.63
		70%	0.2	721.397	739.254	97.58
		60%	0.1	666.43	722.92	92.19
20 . 1		60%	0.2	667.556	726.067	91.94
20 Jobs	TADC	80%	0.1	646.9	684.872	94.46
		80%	0.2	662.648	706.073	93.85
		70%	0.1	633.294	662.227	95.63
		70%	0.2	644.799	691.13	93.30
		60%	0.1	617.18	644.34	95.78
		60%	0.2	629.8	666.926	94.43
	Makespan for	80%	0.1	515.082	505.923	101.81
	parallel	80%	0.2	547.573	499.316	109.66
	machines	70%	0.1	457.664	465.08	98.41
		70%	0.2	506.676	494.553	102.45
		60%	0.1	362.634	374.616	96.80
		60%	0.2	410.821	405.767	101.25

Table 2. Algorithm results and mathematical model results for 20 jobs.

Table 3. Mathematical model results and algorithm results for 30 jobs.

Number of Jobs	Objective Functions	LR (Learning Ratio)	Deterioration Ratio	Mathematical Model Results	Algorithms Results	Accuracy
	Makespan for	80%		1083.16	1073.858	100.87
	single machine	80%	0.2	1105.33	1087.684	101.62
		70%	0.1	1059.79	1059.789	100.00
		70%	0.2	1177.61	1072.05	109.85
		60%	0.1	1039.59	1031.77	100.76
		60%	0.2	1052.3	1045.187	100.68
	Total	80%	0.1	1126.73	1109.673	101.54
	Completion	80%	0.2	1125.16	1086.94	103.52
	Time	70%	0.1	1067.42	1055.78	101.10
		70%	0.2	1069.39	1060.86	100.80
		60%	0.1	971.308	1014.356	95.76
20 : 1		60%	0.2	973.65	1022.706	95.20
30 JODS	TADC	80%	0.1	1144.5	1164	98.32
		80%	0.2	1090.738	1164	93.71
		70%	0.1	1097.204	1157.96	94.75
		70%	0.2	1073.058	1164	92.19
		60%	0.1	1038.64	1147.96	90.48
		60%	0.2	1044.337	1159.22	90.09
	Makespan for	80%	0.1	867.894	873.527	99.36
	parallel	80%	0.2	905.968	867.065	104.49
	machines	70%	0.1	846.391	842.933	100.41
		70%	0.2	866.881	865.08	100.21
		60%	0.1	676.287	662.485	102.08
		60%	0.2	759.909	742.194	102.39

7 Conclusion

In our study, the effect of learning and deterioration in the job rejection scheduling environment was considered together. In our study, this situation was examined for four different objectives. These problems are makespan minimization, total completion time minimization and TADC minimization for single machine scheduling problems and makespan minimization for parallel machine scheduling problems. When comparing the results from the tables, it can be seen that the best results are obtained for makespan minimization in both the single machine and parallel machine cases. The results of TADC also perform better for 20 and 30 jobs, but overall, makespan minimization provides the best results.

As it can be seen from the results tables, the proposed algorithms provided solutions with very high accuracy. All the solutions found were obtained in polynomial time.

Conflict of interest

No potential conflict of interest was reported by the authors

Similarity rate (iThenticate): %19

References

- G. Mosheiov, Scheduling problems with a learning effect. European Journal of Operational Research, 132, 687–693, 2001. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(0 0)00175-2.
- [2] G. Mosheiov, Parallel machine scheduling with a learning effect. Journal of the Operational Research Society, 52(10), 1165-1169, 2001. https://doi.org/10. 1057/palgrave.jors.2601215.
- [3] D. Biskup, Single-machine scheduling with learning considerations. European Journal of Operational Research, 115(1), 173-178, 1999. https://doi.org/10.10 16/S0377-2217(98)00246-X.
- [4] W. C. A. Lee, note on deteriorating jobs and learning in single-machine scheduling problems. International Journal of Business and Economics, 3(1), 83, 2004.
- [5] J. B. Wang, Single-machine scheduling problems with the effects of learning and deterioration. Omega, 35(4), 397-402, 2007. https://doi.org/10.1016/j.omega.2005. 07.008.
- [6] G. Mosheiov, V-shaped policies for scheduling deteriorating jobs. Operations Research, 39(6), 979-991, 1991. https://doi.org/10.1287/opre.39.6.979.

- [7] A. Kononov, NP-hard cases in scheduling deteriorating jobs on dedicated machines. Journal of the Operational Research Society, 52(6), 708-717, 2001. https://doi. org/10.1057/palgrave.jors.2601117.
- [8] Y. C. Hsieh, D. L. Bricker, Scheduling linearly deteriorating jobs on multiple machines. Computers & Industrial Engineering, 32(4), 727-734, 1997. https://doi.org/10.1016/S0360-8352(97)00025-9.
- [9] Y. Bartal, S. Leonardi, A. Marchetti-Spaccamela, J. Sgall, L. Stougie, Multiprocessor scheduling with rejection. SIAM Journal on Discrete Mathematics, 13(1), 64-78, 2000. https://doi.org/10.1137/S08954801 96300522.
- [10] L. Zhang, L. Lu, J. Yuan, Single-machine scheduling under the job rejection constraint. Theoretical Computer Science, 411(16), 1877-1882, 2010. https:// doi.org/10.1016/j.tcs.2010.02.006.
- [11] M. D. Toksari, D. Oron, E. Güner, Single machine scheduling problems under the effects of nonlinear deterioration and time-dependent learning. Mathematical and Computer Modelling, 50(3-4), 401-406, 2009. https://doi.org/10.1016/j.mcm.2009.05.026.
- [12] E. Gerstl, G. Mosheiov, Scheduling on parallel identical machines with job-rejection and positiondependent processing times. Information Processing Letters, 112(19), 743-747, 2012. https://doi.org/10.10 16/j.ipl.2012.06.009.
- [13] B. Mor, G. Mosheiov, Total absolute deviation of job completion times on uniform and unrelated machines. Computers & Operations Research, 38(3), 660-665, 2011. https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.08.005.
- [14] Y. Li, G. Li, L. Sun, Z. Xu, Single machine scheduling of deteriorating jobs to minimize total absolute differences in completion times. International Journal of Production Economics, 118(2), 424-429, 2009. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.11.011.
- [15] D. Oron, Single machine scheduling with simple linear deterioration to minimize total absolute deviation of completion times. Computers & Operations Research, 35(6), 2071-2078, 2008. https://doi.org/10.1016/j.cor. 2006.10.010.
- [16] J. J. Kanet, Minimizing variation of flow time in single machine systems. Management Science, 27(12), 1453-1459, 1981. https://doi.org/10.1287/mnsc.27.12.1453.



NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 615-629



Niğde Ömer Halisdemir Üni**ver**sitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araștırma makalesi / Research article

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



Spatial modeling of chlorophyll-a parameter by Landsat-8 satellite data and deep learning techniques: The case of Lake Mogan

Landsat-8 uydu verileri ve derin öğrenme teknikleri ile klorofil-a parametresinin mekansal modellenmesi: Mogan Gölü örneği

Osman Karakoç^{1,*} ^(D), İlkay Buğdaycı² ^(D)

^{1,2}Necmettin Erbakan University, Department of Geomatic Engineering, 42090, Konya, Türkiye

Abstract

Water is essential for the sustainability of life and the healthy functioning of ecosystems. Increasing pollution poses a serious threat to the world's waters, making the monitoring and protection of water quality a strategic imperative. Chlorophyll-a is one of the most important indicators of water quality and ecosystem health, as it is a measure of photosynthetic activity and phytoplankton density, the lifeblood of aquatic ecosystems. Remote sensed data provide a unique opportunity to analyse chlorophyll-a changes in lake ecosystems. In this study, chlorophyll-a concentration was modelled by machine and learning techniques using chlorophyll-a deep measurements, Landsat-8 surface reflectance values and spectral indices of Lake Mogan between 2018 and 2024. The RF, ANN, and CNN models achieved R² values of 0.84, 0.85, and 0.92, respectively. With its ability to learn spectral relationships, identify patterns in complex datasets, and its superior ability to process remote sensing imagery, thematic maps were generated using the CNN model, which performed best in the study. The results of the study demonstrate the potential of remote sensing-based deep learning approaches for monitoring chlorophyll-a. With its ability to produce highly accurate results, this study provides the literature with an effective tool for future strategic monitoring studies.

Keywords: Chlorophyll-a, Deep learning, Landsat-8, Remote sensing, Spectral indices

1 Introduction

Monitoring water quality is crucial for safeguarding ecosystems and supporting human well-being [1]. It is very important to minimize water pollution and develop controllable pollution mechanisms in water bodies [2]. Water quality analyses are carried out with fixed monitoring stations as well as traditional methods that require field observations. Traditional methods are labor intensive as they require field observations. Additionally, it is costly and lacks a regular sampling interval. Although fixed monitoring stations have regular temporal sampling, the limited number of samples causes both approaches to be spatially and

Öz

Su, yaşamın sürdürülebilirliği ve ekosistemlerin sağlıklı işleyişi için kritik öneme sahiptir. Artan çevresel kirlilik, dünyadaki su kütlelerine yönelik ciddi tehditler oluşturmakta olup, su kalitesinin izlenmesi ve korunmasını stratejik bir zorunluluk haline getirmiştir. Klorofil-a, su ekosistemlerinin yaşam kaynağı olan fotosentetik aktivenin ve fitoplankton yoğunluğunun bir göstergesi olarak, su kalitesini ve ekosistem sağlığını şekillendiren en kritik göstergelerden biridir. Uzaktan algılama tabanlı veri setleri, göl ekosistemlerindeki klorofil-a değisimlerini analiz etmek için essiz bir fırsat sunmaktadır. Bu çalısmada, Mogan Gölü'nün 2018-2024 yılları arasındaki klorofil-a ölçümleri, Landsat-8 yüzey yansıma değerleri ve spektral indeksleri kullanılarak klorofil-a konsantrasyonu makine ve derin öğrenme teknikleri ile modellenmiştir. RF, ANN ve CNN modelleri sırasıyla 0.84, 0.85 ve 0.92 R² değerlerine ulaşmıştır. Spektral ilişkileri öğrenme kapasitesi, karmaşık veri setlerindeki desenleri tanımlama becerisi ve uzaktan algılama görüntülerini işleme konusundaki üstün yetenekleriyle, araştırmada en iyi performansı gösteren CNN modeli kullanılarak tematik haritalar üretilmiştir. Çalışma sonuçları, klorofil-a parametresinin izlenmesinde uzaktan algılama tabanlı derin öğrenme yaklaşımlarının potansiyelini ortaya koymaktadır. Bu çalışma, yüksek doğruluklu sonuçlar üretme yeteneği ile gelecekteki stratejik izleme çalışmaları için literatüre etkili bir araç sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Derin öğrenme, Klorofil-a, Landsat-8, Spektral indeks, Uzaktan algılama

temporally inadequate in analyzing water quality [3]. Satellite imagery has great potential for monitoring and assessing lake water quality on a regional scale. Indeed, the use of satellite imagery in the estimation of water quality parameters allows synoptic estimates for large regions with its continuous spatial coverage. In addition, it allows water quality estimation in inaccessible areas. Archived satellite imagery, such as Landsat, enables retrospective water quality determination in cases where field observations cannot be made [4].

The concentration of chlorophyll-a plays a significant role in assessing water quality dynamics [5]. Chlorophyll-a

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: osmankarakoc18@gmail.com (O. Karakoç) Geliş / Received: 18.12.2024 Kabul / Accepted: 07.03.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngumuh.1603421

is a critical pigment present in all phytoplankton and plays a pivotal role in the process of photosynthesis. Quantifying the concentration of chlorophyll-a in water serves as a pivotal approach for evaluating phytoplankton biomass, as well as for assessing the degree of eutrophication in water bodies and for maintaining lake water quality [6]. Although several methods are available to determine phytoplankton biomass, the most practical approach is to measure chlorophyll a concentration. Phytoplankton biomass is produced by photosynthetic reactions; therefore, determination of pigment concentration alone is sufficient to assess biomass. This method differs from other parameters related to phytoplankton metabolism. In this context, chlorophyll-a analysis is an effective tool for estimating the trophic state of a lake. In addition, chlorophyll-a measurement is faster, easier and more economical than estimating phytoplankton biomass by microscopic analysis. Therefore, chlorophyll-a concentration can be used as an important indicator to determine the eutrophication level of the lake [7]. High levels of chlorophyll-a indicate overproduction of algae, leading to algal blooms [8].

Satellite sensors provide an affordable and efficient method for monitoring and mapping chlorophyll-a concentrations, which serve as an indicator of phytoplankton biomass in lakes [9-11]. Chlorophyll-a estimation with satellite spectral data is mainly based on the absorption and scattering of certain wavelengths of radiation through phytoplankton [12]. Tari and Kıyak [13] modeled chlorophyll-a concentrations in Lake Van, the largest alkaline lake in the world, using Landsat-8 satellite imagery and geographic information system technologies in an integrated manner. The results of the study show that chlorophyll-a concentrations were obtained with sufficient accuracy and high resolution despite the limited data set. Nas et al. [14] spatially modeled the chlorophyll-a parameter in Lake Beyşehir, the largest freshwater lake in Turkey and also an important source of drinking water, using Terra ASTER satellite imagery and simultaneous measurement results using regression technique. The coefficient $R^2 > 0.86$ calculated as a result of the research shows the relationship between remote sensing data and chlorophyll-a measurements. In addition to the research on monitoring chlorophyll-a concentration, more comprehensive and large amounts of data on water quality can be obtained due to the developments in remote sensing technology. In recent years, the application of machine learning techniques for predicting water quality parameters has become increasingly popular. Machine learning techniques can identify potential relationships between variables by analyzing the features of input data and minimize the gap between predictions and actual observations through model parameter optimization [15-17].

In the literature, studies combining remote sensing technology with machine learning and deep learning techniques for estimating chlorophyll-a parameters have achieved highly successful results. Freddy et al. [18] Measurement data from the country's monitoring network were used to estimate water quality parameters in two lakes in Mexico. In the study using Landsat-8 data, six different machine learning algorithms were developed for chlorophyll-a estimation. In two lakes, $R^2 = 0.60$, RMSE = 48.06 mg/m^3 , MAE = 37.98 mg/m^3 and $R^2 = 0.71$, RMSE = 6.16 mg/m³, MAE = 4.97 mg/m³, respectively. Lien et al. [19] Four advanced machine learning models were used to predict chlorophyll-a concentration in Lake Ranco, Chile. Data from three sampling stations from 1987 to 2020 were used as the dataset. Three different cases were considered in the study: using only in situ data (Case-1), using integrated in situ data and meteorological data (Case-2), and using satellite images, in situ data and meteorological data together (Case-3). In all three cases, machine learning methods gave successful results in the estimation of the chlorophyll-a parameter. In Case-3, the Temporal Convolutional Network (TCN) model was very successful in predicting chlorophylla with R²=0.96, RSME=0.13, MSE= 0.33 and MAE= 0.06. The findings of the study indicate that incorporating a broader range of variables related to chlorophyll-a, either directly or indirectly, enhances the predictive performance of the algorithm. Fangling et al. [20] A hierarchical CNN was designed to identify the relationship between Landsat-8 imagery and water quality parameters in Erhai and Chaohu Lake. A transfer learning strategy was developed in the CNN model to complement the shortcomings of the in situ data. After training the CNN model for Lake Erhai with Landsat-8 imagery and in situ water quality data, the water quality was classified. This model trained on Lake Erhai can be used to classify the water quality of Lake Chaohu. The results show that the CNN model outperforms traditional machine learning methods. Haibo et al. [21] Using Landsat, Sentinel-2 and GaoFen-2 data from Baiyangdian Lake with Spatial Temporal Fusion (STF) method, an inversion model for chlorophyll-a parameter was designed with CNN. A correlation of R²=0.80 was calculated between measured and predicted chlorophyll-a. Karul et al. [22] Artificial neural networks were used for eutrophication modeling in Mogan and Eymir Lakes. The eutrophication status in Mogan and Eymir lakes was successfully determined due to their small area and more homogeneous structures. The results of the research revealed that the parameter best calculated by artificial neural networks was chlorophyll-a. All of these studies show that the integration of remote sensing techniques with machine and deep learning techniques gives successful results in chlorophyll-a estimation.

Lake Mogan, is located in the borders of Gölbaşı District in the south of Ankara Province. Mogan is within the "Gölbaşı Special Environmental Protection Zone" declared by the Council of Ministers Decree No. 90/1117 [23]. Gölbaşı Special Environmental Protection Area is an environmentally, biologically and culturally rich area with a registered protection status. Mogan Lake and its surroundings are used as a shelter, breeding and resting area for birds and is one of the most important bird habitats designated as a Ramsar candidate in Turkey. In addition, Centaurea tchihatcheffii, one of the endemic plant species, grows naturally in and around Lake Mogan. As Lake Mogan is an important part of the wetland ecosystem and provides various ecosystem services to the people of the region, its protection and regular monitoring is very important. However, unplanned construction prior to the protection date and human activities that continue today are increasing pollution pressures in and around the lake. For all these reasons, Lake Mogan was selected as the study area in this study.

The aim of this study is to model chlorophyll-a concentration in Lake Mogan using chlorophyll-a measurements. Landsat-8 satellite data and deep learning techniques. Within the scope of the research, chlorophyll-a measurement results measured between 2018 and 2024 were obtained from the Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change (MEUCC) General Directorate for the Protection of Natural Assets (GDPA). Using Landsat-8 satellite images, the relationship between the chlorophyll-a parameter and satellite image bands and spectral indices was tested with RF machine learning method and the dataset was expanded. Deeper models were built with ANN model and CNN to estimate the chlorophyll-a parameter affecting the water quality in Lake Mogan. As a result of the research, chlorophyll-a related thematic maps of Lake Mogan were produced with the CNN model, which provides the highest accuracy with deep learning success.

Remote sensing research on chlorophyll-a analysis typically uses empirical methods and traditional regressionbased methods. However, these methods may not be sufficient to analyze complex and multidimensional relationships and increase model accuracy. The integrated application of machine learning and deep learning techniques to chlorophyll-a estimation is rare in the literature. In particular, there is no comprehensive study of advanced modeling techniques in Lake Mogan. In this study, chlorophyll-a analysis was performed with high accuracy using advanced modeling techniques such as RF, ANN and CNN. These approaches provide fast and reliable results in monitoring chlorophyll-a concentration and have significant potential for developing autonomous systems for future monitoring studies.

2 Materials and methods

2.1 Study area

Lake Mogan, is located at 39°47' North Parallel, 32°47' East Meridian in the borders of Gölbaşı District in the south of Ankara Province, is a shallow freshwater lake with an average surface area of 6 km^2 (Figure 1). The maximum depth of the lake is 4 meters and the average depth is 3 meters. The lake, which has an average height of 973 meters above sea level, has taken its current shape by undergoing changes over time [23]. The streams feeding Lake Mogan come mostly from the south and west. Gölcük and Tatlım in the west, Bağırsak in the northwest, Çolakpınar and Çayır in the southwest, Gölova in the south and Sukesen, Kepir, İğdeli, Başpınar and Yağlıpınar in the east. These streams and the valley floors that harbor them are vital for the survival of the lake. However, negative interventions on these streams and their beds may further reduce the already limited water volume of the lake, leading to deterioration of water quality and increased pollution [23].



Figure 1. Study area.

Lake Mogan is fed by small streams in its northern and western parts, which often dry up in summer. The water of the lake reaches Evmir Lake through a regulator and a concrete canal and then reaches Ankara Stream through Imrahor Stream [24]. Mogan Lake is located within the "Gölbaşı Special Environmental Protection Area" declared by the Council of Ministers Decree No. 90/1117. The Presidency of the Special Environmental Protection Authority defines Special Environmental Protection Zones as "areas that have integrity in terms of historical, natural, cultural, etc. values and have ecological importance both at the national and world level" [25]. It is very important to protect and regularly monitor Lake Mogan and its surroundings, which are of strategic importance to Turkey as they are an important part of the ecosystem. A Ramsar candidate and protected wetland, Lake Mogan attracts attention for its ecological diversity, endemic species and ecosystem services. Strategically important for tourism and the local economy, the lake and its surroundings face environmental threats due to unplanned development. The conservation, regular monitoring and management of the lake, located in the capital of Turkey, has the potential to serve as a model for all other wetlands. For these reasons, Lake Mogan was selected as the study area.

2.2 Water quality parameters

The results of chlorophyll-a measurements between 2018 and 2024 were obtained from the MEUCC to be used in the study. The water samples used in this study were collected, stored and analyzed under the coordination of the Ministry in accordance with the provisions of the Water Pollution Control Regulation and the Communiqué on Sampling and Analysis Methods in force in Turkey. The locations of the water samples in Mogan Lake are shown in Figure 2. Water samples taken from three points: the northern end, the southern end and the middle.



Figure 2. Sampling measurement locations.

Sampling procedures were carried out to represent the physical, chemical and biological characteristics of the lake water. The preservation and transportation processes of the samples collected from the lake were based on TS EN ISO 5667-3 standard. According to this standard, the samples were transported under 4°C temperature and in a dark environment to preserve their properties. They were stored in suitable containers to protect them from external contamination during transportation. Samples delivered to the laboratory were analyzed within the periods specified in the legislation to ensure reliable results. All processes from the sampling stage to the laboratory analysis stage were carried out in accordance with the Water Pollution Control Regulation and international standards and analysis results were obtained.

The current three sampling sites are sufficient to give an idea of the overall water quality status of the lake. However, in order to obtain a high accuracy of water quality and a more homogeneous representation of the lake, more sampling points should be sampled and the sampling frequency should be increased. Kırtıloğlu and Karabörk [26] collected a total of 26 water samples from 13 fixed stations on two different dates to estimate the chlorophyll a concentration in Lake

Bafa. The large data set used in the study allowed the performance evaluation of different algorithms to be performed accurately and the remote sensing data to be calibrated with high accuracy. Kavurmacı et al. [27] modeled the chlorophyll-a parameter in Hirfanlı Dam Lake using water quality measurements collected from 54 different points in the lake. Due to the high number of sampling points and the homogeneous distribution over the lake surface, the calculated correlation coefficient of 0.97 for chlorophyll-a was successfully obtained. These studies show that the number of sampling points increases the accuracy of results in remotely sensed water quality monitoring studies.

Although water quality measurements are aimed to be made on a monthly basis, measurements could not be made in some months due to various reasons such as adverse weather conditions. For this reason, there are no measurement results on some dates in the data provided for 2018-2024. Missing measurement data has the potential to adversely affect seasonal analysis and model performance. Polatgil [28], in his research, examined the success of machine learning techniques in completing missing data. As a result of the research, it was concluded that the completion of missing data using appropriate methods positively affects the model performance. Döş and Uysal [29] focused on the classification of remote sensing data using deep learning techniques. The research results revealed the potential of deep learning algorithms to improve the classification performance of remote sensing data. These studies show the impact of the missing data problem on model performance and the potential of machine and deep learning methods to overcome these deficiencies. In this study, machine and deep learning techniques are integrated with remote sensing data to address the problem of limited and missing data. A dataset was created using chlorophyll a measurement data between 2018 and 2024.

2.3 Satellite data

It is very important to obtain satellite images closest to the chlorophyll-a measurement dates used in the study. On the other hand, another factor affecting the accuracy of the study is that the satellite images to be used should be cloudfree. Researchers worldwide have employed a variety of methods to identify water quality parameters using Landsat images across different regions [30-34]. Landsat-8 OLI sensors provide successful data for water quality monitoring with their radiometric and temporal resolution [35]. For this reason, Landsat-8 satellite images were used in this study. Table 1 shows the spectral bands of Landsat-8 satellite.

Satellite images for the study area between 2018 and 2024 were filtered through USGS (United States Geological Survey). Simultaneous and close-time satellite images were identified with the chlorophyll-a measurement dates obtained from the MEUCC. Since water quality parameters are directly affected by atmospheric conditions, it was ensured that the satellite images covering the study area were cloudless. As a result of detailed analysis, Landsat-8 satellite images from eight different dates were matched with the measurement data. The satellite images used in the study are given in Table 2.

Bands	Defined Spectral Position	Band Range (µm)	Resolution (m)	Sensor
Band-1	Coastal Aerosol	0.43 - 0.45	30	OLI
Band-2	Blue	0.45 - 0.51	30	OLI
Band-3	Green	0.53 - 0.59	30	OLI
Band-4	Red	0.64 - 0.67	30	OLI
Band-5	Near Infrared	0.85 - 0.88	30	OLI
Band-6	SWIR-1	1.57 - 1.65	30	OLI
Band-7	SWIR-2	2.11 - 2.29	30	OLI
Band-8	Panchromatic	0.50 - 0.68	15	OLI
Band-9	Cirrus	1.36–1.38	30	OLI
Band-10	TIRS-1	10.60 - 11.19	100	TIRS
Band-11	TIRS-2	11.50 - 12.51	100	TIRS

n

 Table 1. Landsat-8 satellite spectral bands.

D.C

Table 2. Landsat-8 satellite images used.

DATE	PATH /ROW	CLOUD COVER (%)	ID
18/04/2018	177/32	0.13	LC08_L2SP_177032_ 20180418_20201015_02_T1
23/07/2018	177/32	8.8	LC08_L2SP_177032_ 20180723_20200831_02_T1
27/10/2018	177/32	0.34	LC08_L2SP_177032_ 20181027_20200830_02_T1
31/07/2021	177/32	1.08	LC08_L2SP_177032_ 20210731_20210804_02_T1
16/08/2021	177/32	0.3	LC08_L2SP_177032_ 20210816_20210826_02_T1
17/09/2021	177/32	11.75	LC08_L2SP_177032_ 20210917_20210925_02_T1
05/07/2023	177/32	0.18	LC08_L2SP_177032_ 20230705_20230717_02_T1
08/08/2024	177/32	1.71	LC08_L2SP_177032_ 20240808_20240814_02_T1

In this study, Collection-2 images from the Landsat-8 satellite were used. These images are geometrically and atmospherically corrected by the USGS through preprocessing steps. Atmospheric correction is performed using LaSRC (Land Surface Reflectance Code) to account for various atmospheric effects such as water vapor, aerosols, and ozone. Geometric correction is performed using a Level-1 L1TP (Land Precision) process with DEM (Digital Elevation Models). Since the satellite imagery used is atmospherically and geometrically corrected, no additional pre-processing steps were applied. Erdas Imagine software was used to clip Landsat-8 satellite images to cover the study area and organize the bands to be used for chlorophyll-a analysis. In addition, Digital Number (DN) values were converted into reflectance values and made available in the data set. Spectral reflectance values were extracted for Band 4 (Red) and Band 5 (NIR) bands of the satellite images used.

2.4 Spectral indices

The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), widely used in areas with extensive vegetation cover, is a frequently used method for analyzing vegetation cover [36]. There are significant relationships between chlorophyll-a concentrations in water bodies and NDVI values [37]. NDVI, commonly utilized for chlorophyll-a estimation, was created by analyzing the significant absorption of chlorophyll in the red wavelengths and its strong reflectance in the near-infrared region [38]. The NDVI index is derived from the red and near-infrared (NIR) spectral bands and its formula is given in Equation-1.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \tag{1}$$

Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) is a special adaptation of the Normalized Difference Water Index (NDWI) index, specifically designed for the detection of water bodies. It provides valuable information for analyzing water bodies using remote sensing techniques [39]. The MNDWI index was developed to overcome the shortcomings of the NDWI index in urban water bodies and to achieve more successful results. In the research conducted by Xu [40], it was found that the MNDWI index performed better than the NDWI index in detecting water bodies in urban areas. MNDWI allows for more accurate mapping of water bodies by preventing them from mixing with other areas. The MNDWI index is calculated using the green and Shortwave Infrared (SWIR) bands and its formula is given in Equation-2.

$$MNDWI = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR}$$
(2)

In this study, NDVI and MNDWI indices, which have been proven in the literature to provide successful solutions in water quality analysis, were selected due to their positive effects on model performance. NDVI is an index that captures the spectral characteristics of vegetation and is directly related to the chlorophyll-a parameter. Since phytoplankton in water bodies show strong absorption in the red wavelength range and high reflectance in the near infrared wavelength range, it is known that areas with high NDVI values also have high chlorophyll-a concentrations. Praeger et al. [41] show in their research that there is a strong relationship between NDVI and algal density and the success of the index in predicting algal density. Yeonwoo et al. [42] investigated the relationship between chlorophyll a concentrations and NDVI values. As a result of the research, it was found that the NDVI index can be used in water quality management and algal monitoring. The significant relationship between NDVI and chlorophyll-a has been confirmed by several studies in the literature. For this reason, the NDVI index was calculated to improve the model performance and improve the prediction performance. On the other hand, the MNDWI index is very important for identifying non-water features in water bodies. Xu [40] and Feyisa et al. [43] used the MNDWI index to obtain a water mask. It was concluded that the MNDWI index outperforms the NDWI in identifying complex water bodies and improves model performance. Therefore, the MNDWI index was included in the study. NDVI and MNDWI spectral indices were calculated for all satellite images to be included in the dataset. ArcGIS software was used to calculate the spectral indices. The workflow diagram showing all steps of the study methodology is shown in Figure 3.



Figure 3. Research workflow diagram.

2.5 Creating the data set

Reflectance values (B4, B5), spectral indices (NDVI, MNDWI) obtained from Landsat-8 satellite images were matched with chlorophyll-a measurement data obtained from the MEUCC. A dataset containing a total of 24 measurement data was created.

2.6 Machine and deep learning methods

2.6.1 Random forest method

The random forest algorithm is a machine learning method based on decision trees. This algorithm randomly selects parameters from the input parameter set and creates multiple decision trees based on these parameters. The decision trees are combined to obtain the classification output of the algorithm. With this approach, independent or irrelevant parameters can be analyzed with different decision trees and with this feature, it provides high accuracy results [44].

In order to successfully expand the limited data set created in the study, the Random Forest method, which gives successful results with limited data, was used. In the training of the model, chlorophyll-a measurement data were determined as the dependent variable, while NDVI, MNDWI, B4 and B5 were determined as independent variables. The data set was randomly split into 80% training and 20% for testing. The number of trees (n_estimators) was set to 100 and the randomness control (random_state) was set to 42. In order to prevent the model from overlearning, the depth was limited and automatic. In the RF model, the choice of 100 trees balances model accuracy and computational efficiency, while the depth of the trees is unlimited to capture the complex relationships between input features. Breiman [45] states that 100 trees provides a balance in model accuracy. To better analyze highdimensional and complex remotely sensed data, and to allow the model to best learn the relationships, the depth setting is left unrestricted. In the model, the minimum number of data points that each leaf should contain is set to 1, and the minimum number of samples required to split a node is set to 2. These settings ensure that all points are represented, and the model gains depth and best fits the data by preventing oversimplification of the model in a limited data set. After the training was completed, the model was validated. An extended data set was created by generating chlorophyll-a estimates covering the entire lake using the trained model. This data set was then used as the basic input data for ANN and CNN models.

2.6.2 Artificial neural networks (ANN)

ANN are a subset of machine learning, which is inspired by the human mind and forms the basis of deep learning methods [46] ANNs are complex, non-linear systems consisting of multiple processing units designed to emulate the behavior of biological neurons. An ANN generally consists of three primary layers: the input layer, hidden layers, and the output layer, with each layer containing a variable number of neurons or nodes. These neurons are interconnected through various mathematical functions, enabling the network to process and learn from data [47]. Figure 4 shows the basic architecture of the ANN.



Figure 4. ANN basic architecture [48].

The ANN model was chosen to obtain more accurate predictions using the expanded dataset. The chlorophyll-a value estimated for each pixel from the RF model was used as the dependent variable in the ANN model. NDVI, MNDWI, B4 and B5 values are the independent variables of the model. Since there was a need to scale the features in the ANN model, the independent variables were brought to the range of 0-1 with Min-Max normalization. A total of 6344 data points were used for the ANN model. The data set was randomly split into 80% for training and 20% for testing. The training data consists of 5075 data points and the test data consists of 1269 data points. Adam optimization and 100

epochs were used in model training. The model is structured with 64 neurons in a hidden layer and a ReLU activation function. ReLU was chosen because of its success in modeling nonlinear relationships and the fast and stable optimization properties of the Adam algorithm. These hyperparameters are optimized to increase the generalization capacity and accuracy of the model. The ANN model provided high accuracy in chlorophyll-a estimation. The generalization ability of the model increased the accuracy of the predicted values across the lake.

2.6.3 Convolutional neural networks (CNN)

CNNs are artificial intelligence systems consisting of multilayer neural networks. They are capable of detecting, recognizing, classifying and parsing objects [49]. CNNs have been developed especially for processing and analyzing visual data. They are highly effective in tasks such as image recognition and classification. These networks are considered one of the basic building blocks of computer vision and image processing [50]. Figure 5 shows the basic architecture of the CNN model.

In order to better learn the hidden spatial relationships between the spectral features in the data set extended with the RF model and to increase the prediction accuracy, the CNN model was used. 2-D CNN is successful in learning hidden spatial relationships in spatially dependent data sets, especially in data obtained from satellite images.



Figure 5. Basic architecture of the CNN model [51].

The dependent variable of the model is the chlorophyll-a measure and the independent variables are NDVI, MNDWI, B4 and B5. Since the CNN requires scaling of the features, all independent variables were set to the 0-1 range. The data set was divided into 80% training and 20% test data set. Out of a total of 6344 data points, 5075 were divided as training data set and 1269 as test data set. The data set used for the CNN model was transformed into a 2D matrix to be compatible with the model. Each data sample was organized into 5x5 spatial blocks to fit the CNN input format. In the first convolution layer, 32 filters and a 3x3 kernel were applied. In the second layer, more complex features were learned with 64 filters and 3x3 kernels. ReLU (Rectified Linear Unit) function was used as the activation function. The 3x3 and 5x5 kernel configurations were chosen to most effectively capture complex structures. The 3x3 kernels capture small-scale details and subtle structural features, while the 5x5 kernels allow for the detection of larger-scale patterns [52]. The combination of these two dimensions

increases the learning capacity and improves the learning of relationships at different spatial scales [53]. The Adam algorithm is used to optimize the CNN model. This algorithm is an extension of the scotastic gradient descent method and provides fast and stable optimization during the learning phase. The Adam algorithm updates by taking into account the mean and variance of past gradients. Thanks to this feature, it produces more successful results in deep learning models [54]. The CNN model was optimized as the best performing structure after intensive testing of different hyperparameter combinations. During model training, the learning rate was set to 0.001 and the maximum epoch limit was set to 100. To prevent overlearning, an early stopping method was applied and model training was stopped when no improvement was observed. MSE was used as the loss function. To prevent overfitting, 50% dropout layers were added to different layers to prevent the model from overlearning. As part of the data augmentation method, random rotation, noise addition, and horizontal-vertical translation were applied to the data set to increase the diversity of the training data. These methods took into account the limited size of the dataset and allowed the model to better generalize to different data distributions. However, cross-validation methods were not applied due to the limited size of the dataset. The final model is the result of these extensive optimizations. The developed CNN model showed superior performance in predicting chlorophyll-a concentration. After the training process, the model produced chlorophyll-a estimates covering the entire lake. The obtained predictions were exported in raster format and used to create thematic maps. Python programming language and necessary libraries were used to manage the data processing and modeling processes of RF, ANN and CNN models.

2.7 Accuracy assessment

Coefficient of Determination (R^2) , Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE) and Mean Absolute Percentage Error (MAPE) metrics were used to evaluate the accuracy of the models. These metrics are frequently used to evaluate the accuracy of estimation of water quality parameters with remote sensing techniques [55-57]. R² indicates the model's ability to make predictions. As the predicted values align more closely with the actual data, the R² value approaches 1, reflecting a stronger predictive performance of the model. RMSE reflects the difference between the predicted values and the actual values. A lower RMSE indicates higher prediction accuracy of the model. MAE represents the average of the absolute differences between the predicted values and the actual values, indicating the error magnitude [58]. MAPE is the average absolute percentage difference between model predicted values and actual values. The mathematical formulas of these parameters used in the accuracy assessment of the models in the study are given in Equation-3, Equation-4, Equation-5 and Equation-6 [59].

$$R^{2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{m} (X_{i} - Y_{i})^{2}}{\sum_{i=1}^{m} (\bar{Y} - Y_{i})^{2}}$$
(3)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} (X_i - Y_i)^2}$$
(4)

$$MAE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} |X_i - Y_i|$$
(5)

$$MAPE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} \left| \frac{Y_i - X_i}{Y_i} \right|$$
(6)

It's here;

- $X_i = Estimated$ value
- $Y_i = Actual value$
- m = Number of samples
- $\bar{\mathbf{Y}} = \mathbf{It}$ is the average of actual values.

3 Results and discussions

3.1 Evaluation of model performances

In this study, RF, ANN and CNN models were developed for chlorophyll-a estimation and their performance analysis was evaluated with R², RMSE, MAE and MAPE metrics.

The RF model provided reliable results with $R^2=0.88$ (training) and $R^2=0.84$ (test), RMSE=0.15 (training) and RMSE=0.18 (test), MAE=0.14 (training) and MAE=0.17 (test) and MAPE=38.50% (training) and MAPE=42.22% (test) for lake-wide chlorophyll-a estimation. This model was a strong starting point due to its ability to generalize with a limited number of measurement data.

The ANN model slightly improved the accuracy with R^2 = 0.89 (training) and R^2 =0.85 (test) using the data set extended with the RF model. However, RMSE=0.25 (training) and RMSE=0.29, MAE= 0.21 (training) and MAE=0.24 (test), and MAPE=39.80% (training) and MAPE=43.13% (test) which are higher than the RF model. The ANN model slightly improved the performance thanks to its capacity to learn non-linear relationships, but it was less effective compared to the RF model.

The CNN model showed to be the most effective method for chlorophyll-a estimation, providing the highest accuracy among all models. With the CNN model, $R^2=0.96$ (training) and $R^2=0.92$ (test), RMSE=0.16 (training) and RMSE=0.20 (test), MAE=0.10 (training) and MAE=0.12 (test) and MAPE=35.50% (training) and MAPE=41.22% (test). The CNN model produced very successful results compared to other methods thanks to its capacity to learn spatial relationships. Table 3 shows the model accuracies.

Partial dependence plots were created to visualize the effects of the RF model and features such as NDVI, MNDWI, B4 and B5 on chlorophyll-a detection. These plots isolate the effect of each independent variable on the

predicted chlorophyll-a value with other traits held constant and are given in Figure 6.

Table 3. Model accuracy.

Metric	RF	ANN	CNN
R ² (Training)	0.88	0.89	0.96
R ² (Test)	0.84	0.85	0.92
RMSE (Training)	0.15	0.25	0.16
RMSE (Test)	0.18	0.29	0.20
MAE (Training)	0.14	0.21	0.10
MAE (Test)	0.17	0.24	0.12
MAPE (Training)	38.50	39.80	35.50
MAPE (Test)	42.22	43.13	41.22



Figure 6. Partial dependency graphs.

A decrease in chlorophyll-a values is observed with the increase in NDVI. This indicates that chlorophyll-a concentration is suppressed with increasing vegetation density. With the increase in MNDWI, chlorophyll-a values first increase and then tend to reach a constant level. While there was no significant fluctuation in the B4 value, it was observed that the chlorophyll-a concentration decreased rapidly with the increase in the B5 value. In order to analyze the importance of each feature in the chlorophyll-a prediction of the RF model in more detail, the graph showing the importance of the features is shown in Figure 7.



Figure 7. Importance of features.

Among the independent variables used in the RF model, B5 is the most effective feature in model predictions. This feature is followed by MNDWI, NDVI and B4, respectively. Feature B5, NIR, has a strong relationship with the reflectance characteristics of vegetation. Therefore, it plays a critical role in chlorophyll-a estimation. In the literature, the NIR band of Landsat-8 satellite is frequently used for chlorophyll-a estimation [60-61]. Although the Landsat-8 satellite imagery used in this study has great advantages for monitoring large areas, its 30-meter spatial resolution can impose various limitations on the detailed analysis of relatively small water bodies such as lakes. Therefore, the use of satellite imagery with higher spatial resolution can have a positive impact on model performance. Sentinel-2 satellite imagery, with its 10-meter spatial resolution and wide spectral bandwidth, is an alternative that allows for more precise results in the analysis of water quality parameters. Mandanici and Bitelli [62] analyzed the spatial and spectral characteristics of Landsat-8 and Sentinel-2 satellite imagery. The results show that Sentinel-2 satellite imagery performs better in monitoring small and complex areas. Seleem et al. [63] compared the performance of Landsat-8 and Sentinel-2 satellite imagery in monitoring lake water quality. Sentinel-2 satellite imagery, with its higher spatial resolution, provided greater accuracy in detecting water quality parameters. In this study, Landsat-8 satellite imagery was preferred because of its reliability in the literature and its extensive use in monitoring chlorophylla concentrations. In future studies, satellite imagery with higher spatial resolution, such as Sentinel-2, can be used to improve model accuracy. Figure 8 shows the error analysis of all models, Figure 9 shows the error analysis of all models scatter and line graphs are shown.

MNDWI, the second most important parameter of the model, is an important indicator for analyzing the optical properties and areas of water bodies. Vivek et al. [64] In their research conducted in Bangalore, the capital of India, they used the MNDWI index to monitor changes in water.

The NDVI index ranks third in importance. Akgün [37] In a study conducted in the Kura River, it was found that

there were statistically significant relationships between chlorophyll-a values and NDVI index values. The data set was expanded by generating predictions for each pixel to cover the entire lake area with the random forest model. The expanded data set was checked with chlorophyll-a measurement values that were not included in the model. It was seen that the prediction values produced with RF were compatible with the actual measurement values. This expanded data set was used for training ANN and CNN models to increase the prediction accuracy.



Figure 8. Error analysis of models for chlorophyll-a predictions.

The results show the advantages of machine and deep learning methods in chlorophyll-a estimation. The RF model is characterized by low error values as it was developed using a limited number of measurement data. The ANN model provided some improvement in accuracy by training with an expanded data set. RF and ANN models are frequently used in water quality monitoring studies. Dewi et al. [65] RF and ANN models were used to estimate the Water Quality Index (WQI). MAE= 121.40 and RMSE= 215.04 for the ANN model and MAE= 7.87 and RMSE= 28.99 for the RF model. As a result of the research, it was found that the RF model outperformed the ensemble of decision trees and was more reliable for modeling complex patterns.



Figure 9. Scatter and line graphs of models.

The research results support the results obtained in this study. Ming et al. [66] In their research, they used four popular machine learning methods to obtain an optimal chlorophyll-a algorithm. RF was the machine learning method that provided the highest accuracy for chlorophyll-a. He mapped the changes in chlorophyll-a concentration between 2016 and 2020 for 163 large lakes in eastern China using the RF model. The CNN model showed the best performance in chlorophyll-a estimation with the highest R² and the lowest MAE value. In addition, a lower RMSE value was obtained with CNN model than ANN. CNN models have been popularly used in remote sensing and water quality monitoring studies in recent years. To cope with the limited prediction ability of traditional machine learning

methods, deeper neural networks are used to achieve high accuracy results. Syariz et al. [67] Based on the fact that the ANNs proposed in previous studies do not represent the spatial features of satellite images in predicting chlorophylla concentrations, a new CNN model called WaterNet is proposed.

In the study, it was concluded that chlorophyll-a concentrations decreased to the range of RMSE= $0.509-0.975 \mu g/L$ with the activation of the CNN model.

As a result of the research, it was found that the CNN model gave better results and superior performance than all other models in chlorophyll-a estimation. Zhang et al. [68] several CNN models were developed to reconstruct chlorophyll-a concentrations. The RMSE values ranging

from 0.2916-0.3744 calculated for different inputs show the superior performance of the model.

3.2 Production of thematic maps

In the study, the CNN model, which provides the highest pryaediction accuracy, was used to produce chlorophyll-a forecasts for simultaneous dates with satellite images. The forecast data was exported in raster format using Python software language. Thematic maps showing the chlorophylla concentration in Lake Mogan for 8 different dates were produced by classifying the raster images with ArcGIS software. Thematic maps showing the distribution of chlorophyll-a in Lake Mogan are given in Figure 10.

The thematic maps produced within the scope of the study are very important in terms of monitoring the chlorophyll-a change in Lake Mogan. Thematic maps reveal the distribution of chlorophyll-a parameter on the lake surface area. In addition, thematic maps are extremely important in explaining the effect of natural events or human activities on chlorophyll-a change.

The forecast data obtained with the CNN model are based on the data obtained from the MEUCC. Chlorophyll-a measured values were compared. The thematic maps were found to be in agreement with the actual measured values. The results of the study reveal the superior success of CNN in predicting water quality parameters.

When the change in chlorophyll-a concentration in Lake Mogan between 2018 and 2024 is analyzed, it is seen that the

chlorophyll-a concentration in the lake has increased from past to present. Although Lake Mogan and its surroundings are located in a special environmental protection zone, the intense urbanization pressure in the region has negatively affected the water quality from past to present. Since traditional monitoring methods are both costly and time consuming, monitoring water quality with remote sensing techniques offers very successful solutions. This study provides results that will shed light on future studies in Lake Mogan, which is located in a special environmental protection zone and has a critical importance in terms of continuous monitoring of water quality.

4 Conclusions

In this study, the chlorophyll-a concentration in Lake Mogan was estimated using Landsat-8 satellite imagery, machine learning and deep learning techniques. R² values of 0.84, 0.85 and 0.92 were calculated from RF, ANN and CNN models, respectively. The CNN model showed higher accuracy compared to the other models, and thematic maps of chlorophyll-a distribution were generated using the model predictions. The model performances show that there are significant relationships between remote sensing data and chlorophyll-a values. The research provides a successful solution for chlorophyll-a analysis and gives promising results for the autonomization of future monitoring studies.



Figure 10. Chlorophyll-a thematic maps.

In light of the results obtained, the use of Landsat-8 satellite imagery with a spatial resolution of 30 meters in the study may limit the detection of rapid changes in water quality or fine details. In future studies, higher resolution satellite imagery, such as Sentinel-2, can be used for detailed analysis. In addition, gaps in the data set have the potential to negatively affect model performance. Model performance can be improved by filling the gaps in the data set with regular monitoring studies or measurements scheduled to coincide with the satellite imagery data.

Acknowledgment

This article is derived from PhD thesis titled Modeling of Water Quality Parameters with Remote Sensing and Deep Learning Techniques. We would like to thank the Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change (MEUCC) for providing the necessary permission for the research and supporting us in obtaining the data used.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 16%

References

- [1] S. Prashant, M. Ramandeep, P. Prem, A. Akash, S. Prachi, P. Manish and G. Ayushi, Revisiting hyperspectral remote sensing: Origin, processing, applications and way forward. Hyperspectral Remote Sensing, Elsevier, 3-21, 2020. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102894-0.00001-2.
- [2] M. I. H. Zaidi Farouk, Z. Jamil, M.F. Abdul Latip, Towards online surface water quality monitoring technology: A review. Environmental research, 238, 117147, 2023. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117147.
- [3] S. G. Virdis, W. Xue, E. Winijkul, V. Nitivattananon and P. Punpukdee, Remote sensing of tropical riverine water quality using sentinel-2 MSI and field observations. Ecological Indicators, 144, 109472, 2022. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109472.
- [4] A. Kulkarni, Water quality retrieval from Landsat TM imagery. Procedia Computer Science, 6, 475-480, 2011. https://doi.org/10.1016/j.procs.2011.08.088.
- [5] J. Kravitz, M. Matthews, S. Bernard and D. Griffith, Application of Sentinel 3 OLCI for chl-a retrieval over small inland water targets: Successes and challenges. Remote Sensing of Environment, 237, 111562, 2020. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111562.
- [6] H. Huang, W. Wang, J. Lv, Q. Liu, X. Liu, S. Xie, F. Wang and J. Feng, Relationship between chlorophyll a and environmental factors in lakes based on the random forest algorithm. Water, 14, 19, 3128, 2022. https://doi.org/10.3390/w14193128.
- [7] S.T.P. Phu, Research on the correlation between chlorophyll-a and organic matter BOD, COD, phosphorus, and total nitrogen in Stagnant Lake Basins. In: Kaneko, Sustainable Living with Environmental

Risks, Springer, Tokyo, 2014. https://doi.org/10.1007/978-4-431-54804-1_15.

- [8] A. Sudradjat, B. S. Muntalif, N. Marasabessy, F. Mulyadi and M. I. Firdaus, Relationship between chlorophyll-a, rainfall, and climate phenomena in tropical archipelagic estuarine waters, Heliyon, 10, 4, 2024. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25812.
- [9] C. Kislik, I. Dronova, T. E. Grantham and M. Kelly, Mapping algal bloom dynamics in small reservoirs using Sentinel-2 imagery in Google Earth Engine, Ecological Indicators, 140, 109041, 2022. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109041.
- [10] J. Wang and X. Chen, A new approach to quantify chlorophyll-a over inland water targets based on multisource remote sensing data. Science of The Total Environment, 906, 167631, 0048-9697, 2024. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167631.
- [11] K. Dörnhöfer, P.Klinger, T. Heege and N. Oppelt, Multi-sensor satellite and in situ monitoring of phytoplankton development in a eutrophicmesotrophic lake. Science of The Total Environment, 612, 1200-1214, 2018. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.219.
- [12] M. W. Matthews, A current review of empirical procedures of remote sensing in inland and near-coastal transitional waters. International Journal of Remote Sensing, 32, 21, 6855-6899, 2011. https://doi.org/10.1080/01431161.2010.512947
- [13] U. Tarı and N. Olğun Kıyak, Uydu verisi ve CBS ile Van Gölü klorofil-a dinamiklerinin izlenmesi [English Translation: Monitoring the chlorophyll-a dynamics of Van Lake with satellite data and GIS]. Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences, 10, 1, 60-79, 2024. https://doi.org/10.28979/jarnas.1317247.
- [14] B. Nas, H. Karabork and S. Ekercin, Mapping chlorophyll-a through in-situ measurements and Terra ASTER satellite data. Environ Monit Assess, 157, 375– 382, 2009. https://doi.org/10.1007/s10661-008-0542-9.
- [15] H. Cen, J. Jiang, G. Han, X. Lin, Y. Liu, X. Jia, Q. Ji and B. Li, Applying deep learning in the prediction of chlorophyll-a in the east china sea. Remote Sensing. 14, 21, 5461, 2022. https://doi.org/10.3390/rs14215461
- [16] J. G. N. Paulino, G. G. Esperanza, R. A. F. José and D. M. Cristina, Forecast of chlorophyll-a concentration as an indicator of phytoplankton biomass in El Val reservoir by utilizing various machine learning techniques: A case study in Ebro river basin, Spain. Journal of Hydrology, 639, 131639,0022-1694, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131639.
- [17] K. Doyun, L. KyoungJin, J. SeungMyeong, S. MinSeok, K. ByeoungJun, P. Jungsu and H. Tae-Young, Real-time chlorophyll-a forecasting using machine learning framework with dimension reduction and hyperspectral data. Environmental Research, 262, 119823, 0013-9351, 2024. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119823.

- [18] F. H. Villota-González, B. Sulbarán-Rangel, F. Zurita-Martínez, K. J. Gurubel-Tun and V. Zúñiga-Grajeda, Assessment of machine learning models for remote sensing of water quality in Lakes Cajititlán and Zapotlán. Jalisco-Mexico, Remote Sensing. 15, 23, 5505, 2023. https://doi.org/10.3390/rs15235505
- [19] L. Rodríguez-López, L. Bravo Alvarez, I. Duran-Llacer, D. E. Ruíz-Guirola, S. Montejo-Sánchez, R. Martínez-Retureta, E. López-Morales, L. Bourrel, F. Frappart and R. Urrutia, Leveraging machine learning and remote sensing for water quality analysis in lake ranco, Southern Chile. Remote Sensing, 16, 18, 3401, 2024. https://doi.org/10.3390/rs16183401
- [20] F. Pu, C. Ding, Z. Chao, Y. Yu and X. Xu, Waterquality classification of inland lakes using Landsat8 images by convolutional neural networks. Remote Sensing, 11, 14, 1674, 2019. https://doi.org/10.3390/rs11141674
- [21] H. Yang, Y. Du, H. Zhao and F. Chen, Water quality chl-a inversion based on spatio-temporal fusion and convolutional neural network. Remote Sensing. 14, 5, 1267, 2022. https://doi.org/10.3390/rs14051267
- [22] C. Karul, S. Soyupak, A. F. Çilesiz, N. Akbay and E. Germen, Case studies on the use of neural networks in eutrophication modeling. Ecological Modelling, 134, 145-152, 2000. https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00360-4.
- [23] Anonim, Gölbaşı özel çevre koruma bölgesi yönetim planı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Tabiat Varlıklarını Koruma Genel Müdürlüğü, 213, Ankara, 2015.
- [24] A. Velioğlu and M. Kırkağaç, Seasonal variation of zooplankton in Lake Mogan. Aquatic Sciences and Engineering, 32, 3, 146-153, 2017.
- [25] Özel Çevre Koruma Kurumu Başkanlığı, Ö.Ç.K.K.B. Yayınları, Ankara, 1994.
- [26] E. Kırtıloğlu and H. Karabörk, Evaluating the performance of algorithms in estimating the Chl-a concentration of Lake Bafa. Turkish Journal of Geosciences, 3, 1, 30-38, 2022. https://doi.org/10.48053/turkgeo.1118373.
- [27] M. Kavurmacı, S. Ekercin, L. Altaş and Y. Kurmaç, Hirfanlı baraj gölü su kalitesinin cbs ve uzaktan algılama teknikleri kullanılarak değerlendirilmesi [English Translation: Evaluation of water quality of Hirfanlı Dam Lake using gis and remote sensing techniques]. 65. Türkiye Jeoloji Kurultayı, 2-6 Nisan, 2012.
- [28] M. Polatgil, Veri ölçekleme ve eksik veri tamamlama yöntemlerinin makine öğrenmesi yöntemlerinin başarısına etkisinin incelenmesi. Duzce University Journal of Science and Technology, 11, 1, 78-88, 2023 https://doi.org/10.29130/dubited.948564.
- [29] M. E. Döş and M. Uysal, Uzaktan algılama verilerinin derin öğrenme algoritmaları ile sınıflandırılması. Türkiye Uzaktan Algılama Dergisi, 1, 28-34, 2019.
- [30] T. Perivolioti, A. Mouratidis, D. Bobori, G. Doxani and D. Terzopoulos, Monitoring water quality parameters of Lake Koronia by means of long time-series

multispectral satellite images. Acta Universitatis Carolinae, Geographica, Univerzita Karlova, 52, 2017. https://doi.org/10.14712/23361980.2017.14.

- [31] C. Qi, S. Huang and X. Wang, Monitoring water quality parameters of Taihu Lake based on remote sensing images and LSTM-RNN. IEEE Access, 8, 188068-188081, 2020. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3030878
- [32] B. Nas, S. Ekercin, H. Karabörk, A. Berktay and D. Mulla, An application of Landsat-5TM image data for water quality mapping in Lake Beysehir, Turkey. Water Air Soil Pollution 212, 183-197, 2010. https://doi.org/10.1007/s11270-010-0331-2.
- [33] W. Ahmed, S. Mohammed, A. El-Shazly and S. Morsy, Tigris River water surface quality monitoring using remote sensing data and GIS techniques. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. 26, 816-825, 2023. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2023.09.001.
- [34] L. Rodríguez-López, I. Duran-Llacer, L. Bravo Alvarez, A. Lami, R. Urrutia, Recovery of water quality and detection of algal blooms in Lake Villarrica through Landsat satellite images and monitoring data. Remote Sensing, 15, 7, 1929, 2023. https://doi.org/10.3390/rs15071929
- [35] C. Martin, J. Junchang, G. M. Jeffrey, L. D. Jennifer, F. V. Eric, R. Jean-Claude, V. S. Sergii and J. Christopher, The harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set. Remote Sensing of Environment, 219, 145-161, 2018. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.002.
- [36] H. Yıldız, A. Mermer, E. Ünal and F. Akbaş, Türkiye bitki örtüsünün NDVI verileri ile zamansal ve mekansal analizi [English Translation: Spatial and Temporal analysis of Turkey vegetation with NDVI images]. Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi, 21, 2, 50-56, 2012.
- [37] M. Akgün, Uzaktan algılama ile klorofil-a izlenmesi üzerine bir çalışma [English Translation: A study on monitoring of chlorophyll-a level by remote sensing]. Jsat, 1,41–47, 2023. https://doi.org/10.5281/zenodo.8074879.
- [38] B. Datt, Remote sensing of chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll a+ b, and total carotenoid content in eucalyptus leaves. Remote sensing of environment, 66, 2, 111-121, 1998. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00046-7.
- [39] Ü. H. Atasever and H. H. Abbas, Drought monitoring in Burdur Lake using Sentinel-2 images. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13, 3, 882-891, 2024. https://doi.org/10.28948/ngumuh.1411803
- [40] H. Xu, Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing, 27, 14, 3025-3033, 2006. https://doi.org/10.1080/01431160600589179
- [41] C. Praeger, M. J. Vucko, L. I. McKinna, R. D. Nys and A. J. Cole, Estimating the biomass density of macroalgae in land-based cultivation systems using

spectral reflectance imagery. Algal Research-Biomass Biofuels and Bioproducts, 50, 102009, 2020. https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102009.

- [42] Y. Choo, G. Kang, D. Kim and S. Lee, A study on the evaluation of water-bloom using image processing. Environmental science and pollution research international, 25, 36, 36775–36780, 2018. https://doi.org/10.1007/s11356-018-3578-6
- [43] G. L. Feyisa, H. Meilby, R. Fensholt and S. R. Proud, Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. Remote Sensing of Environment, 140, 23-35, 2014. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029.
- [44] Y. Dokuz, A Bozdağ and B. Gökçek, Hava kalitesi parametrelerinin tahmini ve mekansal dağılımı için makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanılması [English Translation:Use of machine learning methods for estimation and spatial distribution of air quality parameters]. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9, 1, 37-47. https://doi.org/10.28948/ngumuh.654092
- [45] L. Breiman, Random forests. Machine Learning, 45, 1, 5-32, 2001. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324
- [46] R. Qamar and B. Zardari, Artificial neural networks: an overview. Mesopotamian Journal of Computer Science. 130-139, 2023 https://doi.org/10.58496/MJCSC/2023/015.
- [47] P. P. Biswas, W. H. Chen, S. S. Lam, Y. K. Park, J. S. Chang and A. T. Hoang, A comprehensive study of artificial neural network for sensitivity analysis and hazardous elements sorption predictions via bone char for wastewater treatment. Journal of hazardous materials, 465, 133154, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133154
- [48] F. Bre, J. Gimenez and V. Fachinotti, Prediction of wind pressure coefficients on building surfaces using artificial neural networks. Energy and Buildings, 158, 2017. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.045.
- [49] M. M. Taye, Theoretical understanding of convolutional neural network: concepts, architectures, applications, Future Directions. Computation, 11, 3, 52, 2023. https://doi.org/10.3390/computation11030052
- [50] X. Zhao, L. Wang, Y. Zhang, X. Han, M. Deveci and M. Parmar, A review of convolutional neural networks in computer vision. Artificial Intelligence Review, 57, 99, https://doi.org/10.1007/s10462-024-10721-6
- [51] N. Pravati, R. D. Shitya, K. M. Ranjan, M. Sairam, A. Ahmed, M. Alsharef and A. Flah, 2D-convolutional neural network based fault detection and classification of transmission lines using scalogram images. Heliyon, 10, 19, 2405-8440, 2024. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38947.
- [52] K. Simonyan, A. and Zisserman, Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. The 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR2015), 2015. https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.1556.

- [53] C. Szegedy, W. Liu, Y. Jia, P. Sermanet, S. Reed, D. Anguelov, D. Erhan, V. Vanhoucke, and A. Rabinovich, Going deeper with convolutions. The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 1-9, 2015. https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298594.
- [54] D. P. Kingma and J. Ba, Adam: A Method for Stochastic Optimization. CoRR, 2014. https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980
- [55] P. D. Devi and G. Mamatha, Machine learning approach to predict the turbidity of Saki Lake, Telangana, India, using remote sensing data, Measurement: Sensors, 33, 101139, 2665-9174, 2024. https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101139.
- [56] H. Zhang, B. Xue, G. Wang, X. Zhang and Q. Zhang. Deep learning-based water quality retrieval in an impounded lake using Landsat 8 imagery: an application in Dongping Lake. Remote Sensing, 14, 18, 4505, 2022. https://doi.org/10.3390/rs14184505
- [57] A. Ali, G. Zhou, F. Pablo, L. F. Antezana, C. Xu, G. Jing and Y. Tan, Deep learning for water quality multivariate assessment in inland water across China. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 133, 104078, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104078.
- [58] C. Peng, W. Biao, W. Yanlan, W. Qijun, H. Zuoji and W. Chunlin, Urban river water quality monitoring based on self-optimizing machine learning method using multi-source remote sensing data. Ecological Indicators, 146, 109750, 2023. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109750.
- [59] D. Chicco, M. J. Warrens and G. Jurman, The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. PeerJ Computer Science 7:e623 2021. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623
- [60] U. Tarı, N. Olğun Kıyak, Uydu verisi ve CBS ile Van Gölü klorofil-a dinamiklerinin izlenmesi [English Translation: Monitoring the chlorophyll-a dynamics of Van Lake with satellite data and GIS]. Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences, 10, 1, 60-79. 2024. https://doi.org/10.28979/jarnas.1317247
- [61] W. G. Buma, S. I. Lee, Evaluation of Sentinel-2 and Landsat 8 images for estimating chlorophyll-a concentrations in Lake Chad, Africa. Remote Sensing, 12, 15, 2437, 2020. https://doi.org/10.3390/rs12152437
- [62] Mandanici, E., & Bitelli, G. (2016). Preliminary Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 Imagery for a Combined Use. Remote Sensing, 8(12), 1014. https://doi.org/10.3390/rs8121014.
- [63] Seleem, T., Bafi, D., Karantzia, M. et al. Water Quality Monitoring Using Landsat 8 and Sentinel-2 Satellite Data (2014–2020) in Timsah Lake, Ismailia, Suez Canal Region (Egypt). J Indian Soc Remote Sens 50, 2411–2428 (2022). https://doi.org/10.1007/s12524-022-01613-9

- [64] K. G Vivek, K. G. Piyush, P. Murugan, M. Annadurai, Assessment of surface water dynamicsin bangalore Using WRI, NDWI, MNDWI, supervised classification and K-T transformation, Aquatic Procedia, 4, 739-746, 2214-241X, 2015. https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.095
- [65] D. Dewi, A. Wei, L. Lin and C. Heng, Water quality prediction using random forest algorithm and optimization. Journal of Applied Data Sciences, 5, 3, 1354-1362, 2024. https://doi.org/10.47738/jads.v5i3.348
- [66] S. Ming, L. Juhua, C. Zhigang, X. Kun, Q. Tianci, M. Jinge, L. Dong, S. Kaishan, F. Lian, D. Hongtao, Random forest: An optimal chlorophyll-a algorithm for

optically complex inland water suffering atmospheric correction uncertainties. Journal of Hydrology; 615, Part A, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128685

[67] M. A Syariz and C. H. Lin, M.V. Nguyen, L. M. Jaelani and A. C. Blanco, WaterNet: A convolutional neural network for chlorophyll-a concentration retrieval. Remote Sensing, 12, 12, 1966, 2020. https://doi.org/10.3390/rs12121966

[68] X. Zhang and M. Zhou, A general convolutional neural network to reconstruct remotely sensed chlorophyll-a concentration. Journal of Marine Science and Engineering, 11, 4, 810, 2023. https://doi.org/10.3390/jmse11040810







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



Investigation the effects of photovoltaic systems on electricity distribution networks and determining the optimum network structure

Fotovoltaik sistemlerin elektrik dağıtım şebekelerine etkilerinin incelenmesi ve en uygun şebeke yapısının belirlenmesi

Ahmet Sarı^{1, *}, Hüseyin Erişti²

^{1,2} Mersin University Electrical and Electronics Engineering Department, 33343, Mersin, Türkiye

Abstract

Distributed generation models have started to be seen intensively in distribution networks with technological developments. The increase in distributed generation resources has brought changes in the grid. Problems such as improper operation of grid protection systems and imbalances in load flow have emerged. In this article, short circuit and load flow analyses of a low voltage distribution network with a distributed generation source are performed and the effects on the network are predicted. Results and predictions regarding the optimum operating conditions of distribution networks in the presence of distributed generation resources have been obtained. Real-time analyses are performed with a power quality measurement device. Scenarios are created in different situations in the presence of distributed generation resources. These scenarios are analysed using a network simulation program. The simulation programme analysed the effects of seasonal conditions and changes in power generation and loads on distribution transformers. In the light of the data obtained, the changes that are required to be made in the inventories in the network topology considering the changes in energy generation time and voltage levels outside the energy generation time are specified. Applications such as automatic tap switching of distribution transformers after a certain power level are proposed.

Keywords: Distributed generation resources, Load flow analysis, Photovoltaic, Short circuit analysis

1 Introduction

Energy demand is increasing with the development of industry and technology day by day. The high demand for energy requires the search for new resources for the efficiency of energy production. In terms of energy efficiency, research on renewable energy resources (RER) is increasing [1]. Wind and solar energy are the most widely used resources among RER. In the last 10 years, solar energy has reached 10.2 GW and wind energy has reached 12 GW energy generation capacity. Increases in generation capacity also lead to significant increases in raw material prices [2]. In order to implement the distributed generation model in the system, structural modifications are required in electricity

Öz

Teknolojik gelişmelerle birlikte dağıtım şebekelerinde dağıtık üretim modelleri yoğun olarak görülmeye başlanmıştır. Dağıtık üretim kaynaklarının artması sebekede değişimleri de beraberinde getirmiştir. Şebeke koruma sistemlerinin hatalı çalışması ve yük akışındaki dengesizlikler gibi sorunlar ortaya çıkmıştır. Bu makalede, dağıtık üretim kaynağı içeren alçak gerilim seviyesinde bir dağıtım şebekesinin kısa devre ve yük akış analizleri yapılmış ve şebekenin nasıl etkileneceği tahmin edilmiştir. Dağıtık üretim kaynaklarının varlığında dağıtım şebekelerinin optimum işletme koşullarına ilişkin sonuçlar ve öngörüler elde edilmiştir. Güç kalitesi ölçüm cihazı ile gerçek zamanlı analizler yapılmıştır. Dağıtık üretim kaynakları varlığında farklı durumlarda senaryolar oluşturulmuştur. Bu senaryolar şebeke benzetim programı kullanılarak analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Benzetim programı mevsimsel koşullar ile enerji üretim ve yüklerdeki değişimlerin dağıtım trafoları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen veriler ışığında enerji üretim zamanı ve dışında gerilim seviyelerindeki değişiklikler göz önüne alınarak şebeke topolojisindeki envanterlerde yapılması gereken değişiklikler belirtilmiştir. Dağıtım transformatörlerinin belirli bir güç seviyesinden sonra otomatik kademe değiştirmesi gerekliliği gibi uvgulamalar önerilmistir.

Anahtar kelimeler: Dağıtık üretim kaynakları, Yük akış analizi, Fotovoltaik, Kısa devre analizi

distribution networks. These structural modifications create technical problems with the increase in RER at both high voltage (HV) and low voltage (LV) levels. This problem is caused by the fact that distribution networks are not suitable for the transition from unidirectional energy flow to bidirectional energy flow [3, 4]. In the existing literature, the effect of bidirectional energy flow on the changes in voltage and current levels during and outside of generation has been analysed. These modifications indicate the need to focus on short circuit protection and selectivity [5].

In the existing literature, the distribution system model created in real-time and DigSilent Power Factory has been analysed. In accordance with the IEC 60909 standard, a literature review has been carried out on the effects on the

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ahmetsaric.u.eem@gmail.com (A. Sarı) Geliş / Received: 31.12.2024 Kabul / Accepted: 10.03.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngumuh.1610366

network in the presence and absence of distrubeted generation resource (DGR) [6]. It is a study on the effects of solar power plants on short circuit in the presence of HV networks, elimination of these effects and short circuit protection. Distribution network topology is created and analysed in order to simulate short circuit conditions on the network [7, 8]. The network structure has evolved into a bidirectional energy flow with the addition of DGRs to the distribution networks. Before these transitions, the cost differences caused by the changes to be made in the network are analyzed [9, 10]. As a result of the increase in RERs, load flow problems have emerged. Load flow analysis and projection study are performed in 10 busbar system by using Newton-Raphson Method (NRM) in ETAP programme [11]. Distributed generation sources are increasing in distribution networks at LV level. This increase has raised the issue of transition to smart grid and grid management. Studies have been carried out on SCADA structure and architecture for grid management [12]. In another study, a general examination of micro-grid structures is made and the results of the situations are seen [13]. Increasing the presence of DGRs in microgrids leads to power outages and grid integration problems. A smart structure is needed in order for the network to minimise the failure in the fastest way during power outages [14, 15, 16]. Microgrids have helped to reduce the areas affected by power outages and energy shortages. The researches have examined the conditions of microgrids together with smart management systems [17, 18, 191.

This literature review shows that increasing the presence of distributed generation resources in electricity distribution networks is an important requirement for the change of inventories used in network management.

In this study, load flow analysis has been performed with Newton-Raphson method in the grid with DGR. Short circuit analysis was performed at LV level using Digsilent Power Factory programme. In the study, the changes in the voltage levels of the bidirectional flow during generation and nongeneration hours in real time and simulation programmes are examined. This change brings along the need for effective short circuit protection as a result of the rise and fall of the current level [20, 21]. As a result, this study aims to ensure that the need for variable value fuses in short circuit protection in terms of interoperability of distributed generation and electricity distribution network and the necessity of distribution transformers with automatic tap adjustment in the management of changes in voltage level meet at the optimum point [22, 23].

2 Materials and methods

In this section, virtual analyses are performed for the values that cannot be measured instantaneously, as well as real-time measurements in order to create the most suitable structure for the distribution network containing DGR.

2.1 Network topology

Real-time measurements have been taken for the simulation studies to create the distribution network structure with the most appropriate DGR presence. Actual data from the national electricity distribution network are used during the selection of the region and network. Fault diversity, suitability of the site for distributed generation installation and load conditions are determined as the first priority. In this framework, the national electricity distribution network structures are modelled by simulation with DigSilent Power Factory application considering fault diversity and load conditions.

In this research, an analysis is performed by modelling a 1000 kVA internal type transformer model with 5 outputs in the urban underground network topology. In addition, 1 lighting output with a power of 20 kVA is added. The main distribution panel (MDP) used in TEDAŞ type project is used as the distribution panel. The supply of the distribution transformer is aluminium XLPE cable. Transformer voltage level is 31.5/0.4 kV and transformer connection group is DYN11. There are 6 stages in the HV part of the transformer. The percentage uk value of the distribution transformer is 5.92%. The type of cable between the transformer LV output and busbar is NYY YVV. The busbar part of MDP is 100x10 mm² copper busbar. There are 5 distribution line outputs from MDP. Field distribution boxes (FDB) are TYPEB_400_400_5C specified in TEDAŞ MYD type project. In Table 1, power information of the energy outputs from MDP, NH fuse values used as short circuit protection element, cable cross-section information of the outputs are given. NYY YVV is used as cable type in all outputs.

Table 1. 1000 kVA transformer MDP equipment list

MDP Outputs	Power	Fuse Value	Cable Cross-Section
Output 1	250 kVA	400 A	3×185+95 mm ²
Output 2	250 kVA	400 A	3×185+95 mm ²
Output 3	250 kVA	400 A	3×185+95 mm ²
Output 4	160 kVA	250 A	3×150+70 mm ²
Output 5	100 kVA	160 A	3×150+70 mm ²

A total of 15 TYPE B FDBs are used in the network modelling. In the substation area, 52 real load structures are simulated by sampling from the national electricity distribution network. Load types of 3, 5, 8, 13, 13, 20, 65 and 93 kW are created and modelling was performed. The modelling study was carried out by using 5 TYPE B FDBs on output 1, 3 FDBs on output 2, 4 FDBs on output 3, 2 FDBs on output 4 and 1 FDB on output 5.

The FDB information on the energy outputs determined in the network modelling are given in Table 2, Table 3, Table 4, Table 5 and Table 6. Power information on the power outputs, short circuit protection element NH fuse values and cable cross-section information of the loads are given in the tables as well as FDB information. Cable type NYY YVV is used as cable type in all outputs.

Table 2. Equipment list of network model output 1 field distribution boxes

Output 1	Load No	Power	Fuse Value	Cable Cross-Section
DD 1	Load 1	93 kW	160 A	4×50 mm ²
DBI	Load 2	8 kW	16 A	4×6 mm ²
	Load 3	20 kW	40 A	4×10 mm ²
	Load 4	8 kW	16 A	4×6 mm ²
DB 2	Load 5	8 kW	16 A	4×6 mm ²
	Load 6	8 kW	16 A	4×6 mm ²
	Load 7	8 kW	16 A	4×6 mm ²
	Load 8	13 kW	32 A	4×10 mm ²
DB 3	Load 9	8 kW	16 A	4×6 mm ²
	Load 10	3 kW	10 A	2×6 mm ²
	Load 11	8 kW	16 A	4×6 mm ²
	Load 12	8 kW	16 A	4×6 mm ²
DB 4	Load 13	13 kW	32 A	4×10 mm ²
	Load 14	8 kW	16 A	4×6 mm ²
	Load 15	13 kW	32 A	4×10 mm ²
DB 5	Load 16	13 kW	32 A	4×10 mm ²
	Load 17	13 kW	32 A	4×10 mm ²

Table 3. Equipment list of network model output 2 field distribution boxes

Output 2	Load No	Power	Fuse Value	Cable Cross-Section
	Load 18	65 kW	125 A	4×35 mm ²
DP 6	Load 19	13 kW	32 A	4×10 mm ²
DB 0	Load 20	65 kW	125 A	4×35 mm ²
	Load 21	13 kW	32 A	4×10 mm ²
	Load 22	20 kW	40 A	4×10 mm ²
DP 7	Load 23	3 kW	10 A	$2 \times 6 \text{ mm}^2$
DB /	Load 24	20 kW	40 A	4×10 mm ²
	Load 25	20 kW	40 A	4×10 mm ²
	Load 26	13 kW	32 A	4×10 mm ²
DB 8	Load 27	20 kW	40 A	4×10 mm ²
	Load 28	8 kW	16 A	4×6 mm ²

Table 4. Equipment list of network model output 3 field distribution boxes

Output 3	Load No	Power	Fuse Value	Cable Cross-Section
DB 9	Load 29	93 kW	160 A	4×50 mm ²
DB 10	Load 30	93 kW	160 A	4×50 mm ²
DD 11	Load 31	8 kW	16 A	4×6 mm ²
	Load 32	13 kW	32 A	4×10 mm ²
DB II	Load 33	8 kW	16 A	$4 \times 6 \text{ mm}^2$
	Load 34	5 kW	16 A	$4 \times 6 \text{ mm}^2$
	Load 35	8 kW	16 A	$4 \times 6 \text{ mm}^2$
DB 12	Load 36	13 kW	32 A	4×10 mm ²
	Load 37	8 kW	16 A	4×6 mm ²

Table 5. Equipment list of network model output 4 field distribution boxes

Output 4	Load No	Power	Fuse Value	Cable Cross-Section
	Load 38	8 kW	16 A	4×6 mm ²
	Load 39	65 kW	125 A	4×35 mm ²
DB 13	Load 40	8 kW	16 A	4×6 mm ²
	Load 41	8 kW	16 A	4×6 mm ²
	Load 42	8 kW	16 A	4×6 mm ²
	Load 43	20 kW	40 A	4×10 mm ²
	Load 44	8 kW	16 A	4×6 mm ²
DB 14	Load 45	8 kW	16 A	4×6 mm ²
	Load 46	8 kW	16 A	4×6 mm ²
	Load 47	8 kW	16 A	4×6 mm ²

Table 6. Equipment list of network model output 5 field distribution boxes

Output 5	Load No	Power	Fuse Value	Cable Cross-Section
	Load 48	20 kW	40 A	4×10 mm ²
	Load 49	8 kW	16 A	4×6 mm ²
DB 15	Load 50	8 kW	16 A	4×6 mm ²
	Load 51	8 kW	16 A	4×6 mm ²
	Load 52	8 kW	16 A	4×6 mm ²

2.2 Real-time energy analysis on distributed generation

In this research, the effect of the real-time DGR system on the distribution system is analysed together with the simulation of the distribution network. In this context, realtime measurements are made in the distribution network, which is established with the network model defined in the research and which includes a DGR. The sustainability of the distribution network, energy supply security and energy quality depend on certain criteria. These criteria are that power quality data such as voltage, current, active power, reactive power must be at values determined by standards. These values need to be measured and analysed in cases where there is a DGR connected to the network and there is no presence of DGR. Energy analysers and power quality measurement devices (PQMDs) are used to perform the measurement process. In the framework of the research, A-Eberle brand PQI-DA smart model energy analyser and energy analysis set are used to measure and transfer the data to the computer environment. Figure 1 shows the PV panel photographs of the rooftop solar power plant (SPP) located at the real-time measurement point with grid model DGR. The measurement process is performed with the PQMD shown in Figure 2. Figure 3 shows a simulated real-time distribution grid with distributed generation resources.



Figure 1. Real time measurement point rooftop SPP facility



Figure 2. Power quality measurement device with A-Eberle energy analyser



Figure 3. Network model drawing in the presence of DGR

2.3 Load flow analysis with newton-raphson method

In power systems, Newton-Raphson method is used for load flow analysis. The aim of the Newton-Raphson method is to reduce the error phenomenon to zero. For this situation, Taylor series expansion of functions is required. The Taylor series expansion of the function with n variables defined as y=f(x) can be formulated as follows in Equation (1);

$$y = f(x_0) + \frac{df}{dx}\Big|_{x=x_0} (x - x_0)$$
(1)

In Equation (2), our matrix called J(i) is the Jacobian matrix and this matrix is defined as follows.

$$[J(i)] = \left[\frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{x=x_{(i)}}\right] = \begin{bmatrix}\frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_N}\\ \vdots & \cdots & \vdots\\ \frac{\partial f_N}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_N}{\partial x_N}\end{bmatrix}_{x=x_{(i)}}$$
(2)

In Equation (2), instead of calculating the inverse of the matrix J(i), the solution with a system of linear equations is preferred. Instead of writing the inverse of the J(i) matrix, it is preferred to rewrite it in Equation (3).

$$J = (i)\Delta x(i) = \Delta y(i)$$
(3)

After that, the following 4 steps are applied for each convergence process and these steps are continued until the tolerable value is reached;

Step-1: $\Delta y(i)$ is calculated,

Step-2: J(i) is calculated,

Step-3: Calculate $\Delta x(i)$ by Gaussian elimination and back substitution,

Step-4: The value of x(i+1) is calculated.

2.4 Voltage drop calculation methods

The cross-sections of the network conductor, the load level on the HV or LV distribution network, the type of load, the length of the network to the resource and the branch structure create problems in distribution networks in the presence or absence of DGR. As stated in the electrical high current installations regulation (EKAT) regulation, voltage drop should not exceed 7% in HV installations. In LV installations, it should not exceed 5%. The calculation of the values given in Table 7 is calculated according to the network structure.

Table 7. \	/oltage dr	op calculation	1 methods
------------	------------	----------------	-----------

Phases	Voltage Values	Formulas
3 phase	380	e% = 0,0124 (L.N.)/(S.)
1 phase	220	e%=0,074 (L.N.)/(S.)

The definitions of the formulas given in Table 7 are e%= Voltage drop, N=Power (kW), U=Voltage (Volt), L=Line distance (metre), S=Conductor cross section (mm²), K=Conductivity coefficient (m/ Ω mm²), K (Cu) 56 m/ Ω mm², K (Al) 35 m/ Ω mm².

2.5 Short circuit calculation methods in HV and LV networks

Short circuit faults occur as a result of the deterioration of the insulation of the conductors in the network with excessive current draw, aging of the insulating material, lightning strikes, contact of external factors (wood, zinc, long-winged birds, etc.) with the line. The current generated during this short circuit is called short circuit current. One of the main parts of the study is to ensure that the short circuits are eliminated by making the correct selectivity to ensure network security. Selectivity means that as a result of a fault occurring on a line, only the breaker that protects on that line opens and the energy continuity on other lines is protected. Selectivity is provided by the proper selection of the rated currents of the circuit breakers to be used in line protection. Overload protection is one of the most important issues with the increase of DGRs in LV network. Short circuit calculations are calculated around TSE-EN60909 standards. In the framework of this standard, it covers the calculation of HV and LV alternating current short circuits. Short circuit faults are divided into 2 as phase-phase short circuit and phase-earth short circuit. Short circuit calculation methods are given in Table 8.

3 Analysis methods and results

Analyses made with the materials used in the study and the results of the approaches are evaluated. The results are the output values that are necessary for the creation of the optimal network structure.

3.1 Load flow analysis with DIgSILENT power factory program

As a result of the measurements made with the analysis programme and energy analyser, the data in Figure 4 and Figure 5, where winter and summer months are simulated, are obtained. A comparison is made between the data obtained when the energy consumption rates are 20%, 50%, 80% and 100%.

Table 8. Short circuit calculation methods

Three-Phase Fault	Phase-Phase Fault	Two-Phase-Earth Fault	Phase-Earth Fault
$I_k^u = \frac{1.1U_n}{\sqrt{3} Z_1 }$	$I_k^{ll} = \frac{1.1U_n}{ Z_1 + Z_2 }$	$I_k^u = \frac{\sqrt{3} \ 1.1 U_n}{ Z_1 + Z_0 + Z_0.\frac{Z_1}{Z_2} }$	$I_k^{ii} = \frac{\sqrt{3.1.1U_n}}{ Z_1 + Z_2 + Z_0 }$



Figure 4. DB summer season power analysis a) 20% load usage case b) 50% load usage case c) 80% load usage case d) 100% load usage case

As a result of the load flow analysis performed in the analysis programme, it is simulated by considering the realtime data in the FDB to which the DGR is connected. As a result of this analysis, a value close to the real-time measurement on 23.08.2021 is obtained. As can be seen in Figures 4 and 5, it is concluded that the amount of energy produced from the SPP and the energy consumption rates of 20%, 50%, 80% and 100% are in line with the real-time power values. Generation is observed to be at maximum level due to the fact that it is summer month when energy consumption is 20%. Due to this situation, the energy production has seen negative values and it is seen that energy is pressed from the consumption point in the direction of the grid. In the summer months of the region, the use of temperature-induced air conditioning causes the installed power to be used by 50% and above. It is observed that the increase in consumption reduces the effect of energy production.



Figure 5. DB winter season power analysis a) 20% load utilisation case b) 50% load utilisation case c) 80% load utilisation case d) 100% load utilisation case

Figure 5 shows the comparison of real-time measurements and analysis data taken under winter conditions on 23.12.2021. Depending on the seasonal data, differences between energy production and consumption occur. These differences are observed in the study during the evening hours when energy consumption is intense and when a comparison is made with the summer season graphs.

3.2 Real time load flow analysis

It is seen that the results of the analyses in Figures 4 and 5 in the virtual environment and the results of the analyses in especially Figures 6 and 7 in real time match each other with a high degree of accuracy in a 20kWp SPP installed load.



Figure 6. 21-27.08.2021 1 week total active power (kW) measurement



Figure 7. 25.12.2021 1 week load total active power (kW) measurement

The residential and commercial loads on the real-time measured FDB are analysed. In this analysis, the relationship between the energy utilisation profile and the generation profile, the results of which are shown in Figures 6 and 7, is examined. The current generation analysis using NRM and the real-time measurement simulation ratio is very similar as

shown in Figure 7 dated 24.12.2021. In the real-time measurement, 2 commercial enterprises located in the analysed FDB make intensive energy consumption on weekends. Due to the fact that there are commercial centres, both production and consumption intensity is observed in the power graph in Figure 7 between 24.12-30.12, 24-25 and 26. Especially on 25 December, besides the production in the morning hours, it is measured that 2 commercial establishments consumed energy in the morning. It is observed that production and consumption complemented each other at a very high rate.



measurement

The measurements made at the FDB provide information about the single phase load density and the per phase effects of consumption and generation rates on the grid, as shown in Figure 8. The knowledge obtained in the study will provide speed gains in managing network losses, storage and voltage drop on the network. For example, when the maximum values seen during peak energy consumption hours such as 25.12.2021 and 26.12.2021 are compared with the maximum values seen during production hours, it will provide ease of design in the selection of protection systems. In addition, the knowledge of current values in the load panel and distribution panels will enable selectivity for overload and short circuit protection with these values.

3.3 Real time analysis of the effects of DGRs on voltage

The main problem of voltage regulation in distribution networks is the unplanned development of the construction speed. The rate of construction means that the power demand in the distribution network is realised far above the planned loads. This rapid development causes the power line to be longer than the optimum level. Therefore, the load ratio increases and the conductor cross-sections are not sufficient for this ratio. The effects of the network structure and loads on the voltage values are examined and analysed for the creation of the optimal network within the scope of the research.



Figure 9. 25.12.2021 1 week voltage change

Figures 9 and 10 show the changes in voltage values in real time measurements. It has been analysed that these changes increase in loads and SDCs during power generation times, while they show changes depending on the demand power density during non-generation times. In these examinations, a decrease in voltage values occurs as a result of the increase in energy consumption in the evening hours and the lack of production due to the energy production with SPP. Voltage values are examined on 24-25 and 26 December. In the analysis, it is observed that the increase in the percentage of the load ratio in the power section in the network caused an intense decrease in the voltage value.



Figure 10. 25.12.2021 1 week load voltage change

Load flow analyses are performed on the network topology with 1000 kVA DGR, which is created by sampling global and national network structures. The voltage values are taken from the loads that are close to the resource in the network, i.e. the loads selected as primary. In Table 9, there are certain changes in the voltage values in the network structure when the load ratio increases 5 times, i.e. from 20% to 100% load ratio.

1000 kVA without DGR			Voltage Values						
			Load 48	Load 2	Load 9	Load 22	Load 17	Load 33	
		20%	399 V	397 V	394 V	395 V	392 V	394 V	
	T 12.00	50%	396 V	391 V	385 V	386 V	380 V	384 V	
	Time: 13.00	80%	394 V	385 V	375 V	377 V	367 V	374 V	
Turnoformar Loading Data		100%	392 V	380 V	368 V	371 V	357 V	366 V	
Transformer Loading Kate		20%	399 V	397 V	394 V	395 V	392 V	394 V	
	Time: 20.00	50%	396 V	391 V	385 V	386 V	380 V	384 V	
	Time: 20.00	80%	394 V	385 V	375 V	377 V	367 V	374 V	
		100%	392 V	380 V	368 V	371 V	357 V	366 V	

Table 9. Distribution network model underground urban network voltage analysis table with DigSilent PF

Table 10. Voltage analysis table with distribution network model DigSilent PF

1000 kVA DGR At First Side			Voltage Values						
			Load 48	Load 2	Load 9	Load 22	Load 17	Load 33	
		20%	400V	401V	398V	399V	396V	394V	
	Time 12.00	50%	398V	396V	390V	386V	385V	385V	
	11me:15.00	80%	396V	390V	380V	382V	372V	375V	
Transformer Loading Pata		100%	394V	386V	373V	376V	363V	367V	
Transformer Loading Kate		20%	399V	397V	395V	395V	393V	394V	
	Time: 20.00	50%	397V	393V	387V	388V	382V	384V	
		80%	395V	388V	378V	380V	370V	374V	
		100%	393V	384V	372V	374V	361V	367V	

Thus, a 2% change is observed on the load close to the source and an 8% change is observed on the load at the end of the network. Although the voltage values at the beginning of the network remain within the limit values, it is observed that the voltage drop at the point furthest from the source approaches the limit values.

In the analyses performed in the 1000 kVA DGR underground urban network structure, the changes in voltage values are examined in Table 10. There is no change in the percentage changes in voltage values compared to the network structure without DGR. Considering the installed capacity of the DGR density in the network, it is observed that being close to the source had little effect on the decrease in the voltage values in the network.

Table 11. Distribution network model DGR head SPP installed loads

	DGR Installed Power Value									
Load	8 kW	20 kW	65 kW	93 kW						
Load 1				×						
Load 20			×							
Load 38	×									
Load 41	×									
Load 48		×								
Load 52	×									

In Table 11, the sum of the power value of the loads with DGRs corresponds to 20% of the grid installed capacity.

Voltage values are measured and voltage drop analysed in the above 1000 kVA transformer zone in the presence and absence of DGR. Comparative analyses of voltage responses are made with the results in Table 9 and Table 10. The relationship between load status and production hours is analysed in the study. During the hours when the load is low and the production is intense, the rate of change between the voltage values is very low and the voltage level is within the desired value range at the end of the line. In cases where the load ratio is above 60% and the power plants are located at the head of the network, the voltage values fall below the 10% value specified in the standards. Due to the fact that the majority of the power plants at LV level are SPPs, intense voltage drops are experienced during non-production hours in regions such as the Mediterranean region where electric heaters are used as a heating method in winter.

3.4 Simulation analysis of the change of voltage values in distribution transformer tap adjustment

Load analyses are initially performed at transformers in the real-time network at step 3, which is known as HV 31.5 kV and LV 0.4 kV. In the network management, the LV voltage level is increased in the secondary part by lowering the tap where the rate of decrease in voltage values is high. Considering this situation, voltage analyses are performed with tap adjustment at various load ratios and dates. The results of these analyses are shown in Table 12.

1000 kVA DGR At First Side –			Voltage Values								
			Load 48	Load 2	Load 9	Load 22	Load 17	Load 33			
	23.08.2021 %20	1	421V	421V	419V	419V	417	415			
		2	410V	411V	408V	408V	407V	405V			
		3	400V	400V	398V	398V	396V	394V			
Transformer Loading Rate		4	391V	391V	388V	388V	386V	384V			
Hanstonner Loading Kate	23.08.2021 %80	1	417V	411V	402V	403V	394V	396V			
		2	406V	400V	391V	392V	384V	386V			
		3	396V	390V	382V	383V	375V	376V			
		4	386V	381V	373V	373V	366V	367V			

Table 12. Distribution network model transformer step adjusted voltage analysis at DGR at first side

In the analysis results shown especially Table 12, the load ratio and seasonal data present the necessity of tap adjustment as a finding. The existence of DGRs in the distribution network increases the voltage values at the busbars. This situation causes device failures in loads connected to the network due to overvoltage. In order to prevent this situation, real-time network monitoring and automatic tap adjustment are required.

3.5 Short circuit simulation results in the presence and absence of DGR

Short circuit methods that may occur in electricity distribution networks are simulated with the analysis programme and examined in a virtual environment. In accordance with the IEC 60909 standard, investigations are carried out in the presence and absence of DGR and analyses are made on the effects on the network and fuse selectivities. The results are analysed for the impedances of short circuit faults at the time of failure and when the impedance is zero. The results of the network responses in certain regions of the network, at certain loads and at various NH blade fuse values are obtained. Short circuit interruption times of the fuse values are examined by using the short circuit analysis regulation using the analysis programme. In this part of the study, analyses are performed at 0 ohm, 0.5 ohm and 1 ohm impedance values at 20%, 50%, 80% and 100% load conditions determined in the network. IEC curve responses of 16 A, 50 A, 80 A and 100 A NH blade fuses are analysed. Considering that the current value of the short circuit fault on the busbar does not change with the load ratio, the effect of impedance on the short circuit current is analysed.

As shown in Figure 11, the NH blade fuse used as circuit breaker reacts in a short time as 10 ms against 7557 A, which is the highest short circuit current that can occur on the busbar. This condition is tested against a 16 A NH blade fuse when the existing network is operating at 20% load. At 0 ohm impedance value, it is observed that all the loadings gave the same response time and went to tripping. However, the max. short circuit current is realised only at 0 ohm short circuit impedance. In other cases, the circuit response of the fuses is as shown in the current-time curves below.



Figure 11. NH 1 size 16 A blade fuse IEC curve and behaviour during short circuit Z=0 ohm

In the short circuit analysis at Z=0.5 ohm, NH fuse responses at 16 A and 100 A values are analysed. As a result of the analyses, the circuit breaking response to 464.29 A short circuit current is shown in Figure 12 and Figure 13. In these investigations, the effects of the short-circuit nominal current in the busbar during load conditions on the network are focused on the effects of the disconnection time on the network. The unbalance of the circuit breaking times is especially caused by the proportional mismatch between the load ratio of the network and the nominal value of the fuse. Especially when Figure 13 is considered, it is seen that the exposure time of the circuit to short circuit is very long. This will cause deterioration in the structure of the network elements and cause the device to burn as a result of short circuit failure.



Figure 12. NH 1 size 16 A blade fuse IEC curve and behaviour during short circuit Z=0.5 ohm



Figure 13. NH 1 size 100 A blade fuse IEC curve and behaviour during short circuit Z=0.5 ohm

The short circuit analyses performed with the analysis program are examined at 0 ohm, 0.5 ohm and 1 ohm fault impedances. As a result of these analyses, it is seen that the short circuit current decreased as the impedance value increased from Figure 11 to Figure 15. Here, the increase and decrease in the values of the short circuit impedances is to accurately simulate the short circuits occurring in real-time networks. These analyses contribute to the selectivity of the network to be planned. It is found that the fuses determined in overload faults, which are called as the entanglement of the conductors of 2 phases, which will occur especially in overhead line dense networks with low load conditions, will cut the circuit in a very long time. In a 1000 kVA transformer zone, a moment is simulated when there is a 20% load presence at the point where protection is made with a fuse of 100 A, which is determined based on the DGR density under normal conditions. At this moment, the fault impedance is assumed to be 1 ohm. When the overload fault is simulated with this assumed impedance value, it is seen from Figure 15 that the 100 A NH blade fuse cuts the fault in 545 seconds. This time becomes longer with the increase

in impedance value. If the load condition was 20% and circuit protection was made with a 16 A NH blade fuse, the fault would have been concluded in a very short time such as 10 ms as shown in Figure 11. Short circuit events similar to this situation affect the energy production conditions in the presence of DGR. Failure to ensure network supply security will cause material losses. Due to the regulation on the ability of rooftop SPPs to generate up to 25 kWp in RESs, it creates the situation that the load value used is much lower than the installed power. This situation means that there is load utilisation at a very low level than the determined load value outside the production times. It is found that the network needs variable fuse protections against short circuits that will occur according to the load condition. Considering the analyses to be made, fuse selections should be determined while planning the network structure. The necessity of designing a LV protection element that can automatically change itself in protection groups according to the network load change arises.



Figure 14. NH 1 size 80 A blade fuse IEC curve and behaviour during short circuit Z=1 ohm



Figure 15. NH 1 size 100 A blade fuse IEC curve and behaviour during short circuit Z=1 ohm
4 Conclusion

The increasing number of RES-based generation plants in distribution networks brings some benefits as well as problems. These benefits and problems are analysed in this study. These analyses are evaluated with the changes of seasonal conditions on generation and load. The effect of the changes on the distribution transformer and the analyses for ensuring energy quality have been examined and results have been obtained. These results are intended to provide a projector for the future and to ensure that new network planning is more appropriate and economical. Within the framework of this study, the following contributions are aimed;

1. In the light of the measured and analysed values, the rate changes of voltage levels during generation and non-generation times are monitored. Due to the difference between the data, the distributed generation load ratio should also be taken into account in network planning. Distribution transformers should have an automatic tap change feature after a certain power level, taking into account the voltage changes between generation time and consumption time.

2. The fact that the load ratio due to distributed generation is very variable and the fuses in the protection systems are selected in accordance with the installed power creates selectivity and protection problems. In order to prevent this situation and to enable the protection elements to fulfil their duties correctly, protection elements that can change the nominal current value and adjust it according to the load condition should be designed and used for the optimum network.

3. The aim of this study is to find the necessary road signs for the optimal network configuration by applying the conditions specified in the first and second points to the network at the LV level of distribution networks.

The distribution of distributed generation resources in the grid affects the efficiency at voltage values. Step changes in the transformer create 8% improvement in voltage values. This change should be automatic according to the loads during the day. Considering the network load utilisation status, there is a 5% change in voltage values between 20% load and 80% load. This shows the importance of the effects of load distribution and distribution generation layout on efficiency.

The data obtained in the study are orientated towards the correct planning of DGRs in the grid and the correct installation of automatic controllable transformers and fuses of the grid management systems. These aims help to eliminate uncertainties in the management of grid protection systems and voltage variations. The newly proposed management model contributes to the realisation of the application at the most suitable point.

Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity Rate (iThenticate): 15%

References

- [1] Web Map Tile Service, https://enerji.gov.tr/enerjiverimliligi, Accessed 10 Mart 2024.
- [2] Elektrik Piyasası Sektör Raporu. EPDK Yayını, Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu, Ankara, 2024.
- [3] L. Gan, P. Jiang, B. Lev, and X. Zhou, Balancing of supply and demand of renewable energy power system: A review and bibliometric analysis. Sustainable Futures, 2, 2020. https://doi.org/10.1016/j.sftr.2020. 100013.
- [4] S. A. Nur, Dengesiz dağıtım sisteminde dağıtık üretimin optimal yerleşimi ve boyutlandırılması. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, Türkiye, 2023.
- [5] M. Dayıoğlu, Mikro şebekelerde yük ve yenilenebilir enerji kaynakları tahminine dayalı ekonomik yük dağıtımı. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyonkarahisar, Türkiye, 2023.
- [6] F. Ülker, Dağıtık üretim güç sistemlerinde geliştirilmiş oylama modeli tabanlı arıza tespiti ve sınıflandırması. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, Türkiye, 2023
- [7] A. Teke, and E. Yıldırım, Distributed solar power application effects on short circuit protection in distributed generation-new techniques for short circuit protection in distributed generation. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34(4), 2141-2158, 2019. https://doi.org /10.17341/gazimmfd.425947.
- [8] B. Liu, W. Liang, Y. Wang, Z. Zhao, Q. Tian and X. Li, Influence of distributed generation on fault characteristics and relay protection of rural distribution network. Journal of Physics: Conference Series, 2728(1), 2024. https://doi.org/10.1088/1742-6596/ 27 28/1/012032.
- [9] L. Akbulut, Elektrik dağıtım şebekesi optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye, 2019.
- [10] R. B. Wazir, Fotovoltaik güç sistemleri için coğrafi bilgi sistemleri ve üstsezgisel algoritma kullanarak optimal yer seçimi ve boyutlandırma. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Güneş Enerjisi Anabilim Dalı, İzmir, Türkiye, 2023.
- [11] S. Khan, S. U. Rehman, A. U. Rehman and H. Khan, Optimal placement of distributed generation in power system for power system loss reduction using ETAP. International Journal of Engineering and Technologies, 16, 7-19, 2019. https://doi.org/10.18052/www.scipress. com/ijet.16.7.
- [12] Ö. Kahraman, A. Temiz, A. Nadar and E. Bülbül Sönmez, Dağıtık Fotovoltaik Üretim için Akıllı Şebeke

Kontrolcüsü, TÜBİTAK MAM – Enerji Enstitüsü, 2019.

- [13] Belrzaeg, M., Almabsout E. A., Distributed generation for Microgrid technology. International Journal of Scientific Research Updates, 6, 083-092, 2023. https://doi.org/10.53430/ijsru.2023.6.1.0062.
- [14] A. İskenderoğlu, Yenilenebilir enerji kaynakları ve elektrikli araçların birbirine bağlı mikro şebekelere etkilerinin olasılıksal güç akışı ile incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye, 2024.
- [15] A. C. Duman, Development of a home energy management system to increase renewable selfconsumption in households considering demand-side flexibility. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye, 2024.
- [16] Y. B. Koca, Fuzzy logic-based simulation and modelling of grid integration renewable energy systems for sustainable energy. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 14(1), 080-089, 2025. https://doi.org/ 10.28948/ngumuh.1438625.
- [17] G. Hasançebi, E. M. Yeğin ve K. Karaarslan, Elektrik dağıtım şebekelerinde kendi kendini iyileştiren sistemler. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9(1), 457-465, 2020. https://doi.org/10.17798 /bitlisfen.571547.
- [18] N. Ghanbari, H. Mokhtari, and S. Bhattacharya, Optimizing operation indices considering different types of distributed generation in microgrid

applications. Energies, 11(4), 2018. https://doi.org/ 10.3390/en11040894.

- [19] B. Güzey, H. Bozkurt ve A. Teke, Grid interconnection solutions and power quality enhancement for a batterysupported hybrid PV system, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 14(1), 271-281, 2025. https://doi.org/10.28948/ng umuh.1576914.
- [20] D. K. Khatod, G. S. Naik, and M. P. Sharma, Optimal allocation of distributed generation in distribution system for loss reduction, 2012. https://www.research gate.net/publication/284885884.
- [21] E. T. Tamgacı ve M. Ünlü, Şebeke bağlantılı fotovoltaik panel destekli elektrikli araç şarj istasyonlarının analizi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 14(1), 297-307, 2025. https://doi.org/10.28948/ngumuh.1555555.
- [22] K. Shahed, M. R. I. Sujon, M. Moznuzzaman and S. S. Joy, Loss reduction and voltage profile renovation with optimum sizing and siting of distributed generation in distribution network. 2020 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technology, ICAICT 2020, 65–70, 2020. https://doi.org/10.1109/ICAICT51780.2020.93 33503.
- [23] B. Suriyakumar and V. Arumugam, Optimization and analysis of distributed generation units in distributed system for minimizing losses. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 34(1), 31–39, 2024. https://doi.org/10.11591/ijeecs.v34.i1. pp31 -39.



NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 642-648



Niğde Ömer Halisdemir Üni**ver**sitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araștırma makalesi / Research article

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



Investigation of the physical properties of armor steel after cataphoresis coating

Zırh çeliğinin kataforez kaplama sonrasında fiziksel özelliklerinin araştırılması

İsmet Can Beller¹ 🝺, Memduh Kara^{2*} 🝺

¹ BMC Otomotiv Sanayi A. Ş., 35060, İzmir, Türkiye ² Mersin University, Vocational School of Technical Sciences, Dept. of Electricity and Energy, 33110, Mersin, Türkiye

Abstract

It is very important that the materials generally used in the defense industry are suitable for environmental conditions, have a long service life, and do not lose their functionality. The resistance of armor steels to environmental conditions and corrosion is increased by coating. In this study, 'Miilux 500' armor steel was used. 'Cataphoresis coating', which has high resistance to environmental conditions, was selected as the coating method. In this study, it was observed that the corrosion resistance of armor steel, which is indispensable for the defense industry, is resistant to salt fog for 480 hours with cataphoresis coating. In the hardness measurement test and tensile test applied to see the values affected by the heat input during cataphoresis coating, it is evaluated that there are deteriorating features compared to the value given in the product catalogs. In the current situation, the applicability of cataphoresis coating on armor steel has been shown, provided that the superior corrosion effect and the deteriorating material strength values after heat input, the design area and expectations are evaluated.

Keywords: Cataphoresis, Armor steel, Corrosion, Miilux500, Environmental conditions test

1 Introduction

Steels; It is the most widely used metal material with its ability to add new features through research and development studies in the field of technology, ergonomics in the field of use, permanent and appropriate production costs. Alloy elements such as chromium, nickel, manganese, molybdenum are elements used in addition to iron [1]. Armor steels are known as low carbon steels. Changing the carbon ratio at a certain value affects the weldability and toughness-hardness values negatively. Other alloying elements are used to prevent these negative effects; Since the addition of molybdenum prevents grain growth, it prevents carbide precipitation and increases the hardening ability. Manganese addition increases corrosion and impact resistance. Chromium additive improves the bonding properties of the grains by increasing the hardening ability [2]. Armor steels are used much more commonly than glass, fiber, ceramic and aluminum reinforced armor composites [3]. Some of the companies leading the world market in

Öz

Savunma sanayinde genel olarak kullanılan malzemelerin çevre koşullarına uygun olması, uzun ömürlü olması ve işlevselliğini kaybetmemesi oldukça önemlidir. Zırh çeliklerinin çevre koşullarına ve korozyona karşı dayanıklılığı kaplama ile arttırılmaktadır. Bu çalışmada 'Miilux 500' zırh çeliği kullanılmıştır. Kaplama yöntemi olarak çevre koşullarına karşı yüksek dayanımı olan 'Kataforez kaplama' seçilmiştir. Bu çalışmada, savunma sanayinin vazgeçilmezi olan zırh çeliğinin korozyon direncinin, kataforez kaplama ile 480 saat tuz sisi etkisine dayanıklı olduğu görülmüştür. Kataforez kaplama sırasında maruz kalınan ısı girdisinin etkilediği değerleri görmek için uygulanan sertlik ölcüm testi ve cekme deneyinde, ürün kataloglarında verilen değerine göre kötüye giden özellikler olduğu değerlendirilmektedir. Mevcut durumda üstün korozyon etkisi ve 1s1 girdisi sonrası kötüye giden malzeme mukavemet değerleri, tasarım alanı ve beklentilerin değerlendirilmesi koşuluyla zırh çeliği üzerine kataforez kaplamanın uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kataforez, Zırh çeliği, Korozyon, Miilux500, Çevre koşulları testi

armor steel production are as follows; SSAB, Arcelor Mittal, Thyssenkrupp, Astralloy and Evraz [4].

Armor steels are mostly used in the exterior of vehicles. Therefore, some metallurgical properties must be provided to maximize the level of exterior surface protection [5]. It is expected that defense industry vehicles covered with protective armor will resist cracking, breaking of particles and breaking against the impact of bullets of different characters with highly explosive properties [6]. For example, armor steel is selected considering the damage power and kinematic explosions that both defensive and offensive vehicles will receive, such as a tank [7].

Cataphoresis coating is the process of electrically coating metal parts with complex geometry. Cataphoresis coating is one of the most effective and unrivaled methods. Cataphoresis coating technology has led to the prolongation of the life of the parts used in the automotive industry. The prolongation of usage time and the increase in resistance to environmental conditions have increased customer satisfaction [8]. Compared to other coating methods,

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: memduhkara@mersin.edu.tr (M. Kara) Geliş / Received: 03.02.2025 Kabul / Accepted: 13.03.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngumuh.1631930

cataphoresis coating is homogeneous surface distribution on the part, smooth appearance, giving a soft form with the coating of sharp edges, and perfect coating of closed volume welded areas. In addition, other advantages can be stated as production speed, low environmental pollution, low fire and health risk [9].

In this study, surface coating process was carried out by applying cataphoresis coating process to Miilux 500 armor steel. In order to apply the test processes to the armor steel to be coated, it was cut by giving a special form with a laser CNC cutting device. The cut materials were made ready for cataphoresis after surface cleaning. After the cataphoresis coating, mechanical and physical tests were applied to the samples, and environmental tests and most importantly corrosion resistance were measured. In these tests, the corrosion resistance and mechanical properties of the armor steel with cataphoresis coating were determined.

2 Material and methods

In this study, 500 series armor steel of Miilux brand was used as test material. The thickness was chosen as 8 mm and all the materials to be used in the experiments to be carried out proceeded over a single thickness. Its chemical component is presented in Table 1.

Table 1. Chemical composition of Miilux 500 armor steel[10]

Element	С	Si	Mn	Р	S	Cr	Ni	Mo	В
wt.%	0.30	0.70	1.57	0.03	0.0015	1.50	0.40	0.5	0.004

The mechanical properties of Miilux 500 armor steel to be used in the test studies are presented in Table 2. In the studies, comparison and initial situation analysis were made according to this table.

 Table 2. Miilux 500 armor steel mechanical properties [10]

Thickness	Yield Strength Rp 0.2 N/mm ²	Tensile Strength N/mm ²	Stretching A5 %	Impact Effect 40°C Kv Joule	Hardness Range HBW	Carbon Ratio CEV
2.5-40mm	1250	1600	8	20	480-560	0.64

In the coating method, if the material to be coated becomes the cathode of the electrical circuit, the resulting process is called "cataphoresis", and the resulting coating is called "cataphoretic electroplating" or "cathodic electroplating" (CED). The general structure of the products used in cataphoresis coatings mainly consists of water, resin, pigments and solvents as in other paint formulations [11].

A typical surface preparation processes applied before cataphoresis coating; It consists of degreasing, rinsing, activation, phosphate coating, 2nd rinsing, passivation and Deionized rinsing stages. The purpose of degreasing is to remove the dirty surface from the metal to be coated.

The purpose of the rinsing process is to prevent the degreasing chemicals from being carried to the next baths [12].

The failure of the adhesion test of the plates processed starting from the cataphoresis coating baths, which is a direct electroplating process, without immersing different types of materials in the pretreatment baths, and the failure of the appearance and gloss tests of the plates processed by immersing in the pretreatment baths and then cataphoresis coating processes, show the importance of the pretreatment process [13].

Activation bath is an important process before phosphating processes. It creates an initial reaction for the formation of the crystal structure. Thanks to its crystal structure, it is aimed to form a covering and homogeneous crystal layer [14]. Figures 1 and 2 show the Crystal appearance of activated and non-activated phosphate coatings. The more the activation affects the surface, the more effective the phosphate coating.



Figure 1. Phosphate coating without activation



Figure 2. Phosphate coating with activation

The main purpose of phosphate coatings is to form a protective layer between the metal surface and the paint, to increase the corrosion resistance of the painted metal surface, to improve the paint adhesion performance, to prevent rust formation in case of a stoppage in the conveyor flow and to improve the corrosion performance on open metal surfaces [15]. It is widely used in the automotive industry and the appliance industry because it is the coating that gives the best result in terms of corrosion performance.

The passivation process is carried out in order to increase the corrosion resistance and to remove the residual ions on the surface. Another purpose of the passivation process is to prevent the formation of rust that may occur on the surface by passivating the surfaces that are not coated with phosphate.

The purpose of rinsing with deionized water before cataphoresis coating is to add Ca, Mg, etc. to the cataphoresis coating bath. to prevent the transport of ions. When these ions stay on the surfaces, they adversely affect the adhesion performance after cataphoresis coating. After the cataphoresis coating pool, it is aimed to destroy the filtrate deposits that may remain on the material surface with the deionized rinsing method.

Although the cooking time varies according to the condition of the material and the coating, the baking process takes place between 25-35 minutes on average. Even if the material varies according to the coating structure, it is necessary to bake at the desired temperature for at least 20 minutes. Convection ovens are the most used oven type in cataphoresis coating processes. In cataphoresis coating ovens, the firing process is usually carried out at a temperature of 200-225 degrees. This temperature may vary according to the value given by the coating company. The loss in the furnace walls in the burner calculation; Appropriate selection should be made by paying attention to the heat received by the coated material, the heat taken by the conveyor or hanger carriers, the heat lost at the entrances and exits, and the heat given to the fresh air taken into the oven [16]. In this study, the tests applied on cataphoresis coated armor steel.

2.1 Cross-cut test

Cross-Cut or adhesion test is a particularly desired measurement method for tools and equipment used in the defense industry. The purpose of the Cross-Cut test is to see the adhesion levels of the armor steels treated with cataphoresis and to give an idea about their resistance to environmental conditions. This study was tested according to ASTM D3359 standard after cataphoresis coating applied on Miilux 500. The parameters to which the tests will be applied are shown in Table 3.

Blade Type	6			6		11	11
Cutting Range	1	mm	2	mm	3 mm	1 m	1,5 mm
Standart	ISO 2409	ASTM D3359	ISO 2409	ASTM D3359	ISO 2409	ASTM D3359	ASTM D3359
Surface Thickness	0-60 μm	0-50 μm	61-120 μm	50-125 μm	121-250 μm	0-50 μm	50-125 μm

The thickness of the sheet cut for Cross-Cut is 8 mm. Its dimensions are determined as 100x100 mm. The tests were prepared as 3 different samples and the pre-test images are shown in the Cataphoresis images in Figure 3.



Figure 3. Cataphoresis armor sheet

2.2 Salt fog test

Salt fog test is performed to observe the resistance to environmental conditions and the adhesion of the coating to the surface. Salt fog test is required for the products used in the defense industry and the test period is determined according to the place of use in design. The salt fog tests were applied as 480 hours according to the ASTM B117 standard [18]. The parameters to which the samples in the test cabinet are exposed are given in Table 4.

Tal	ble	4.	Salt	fog	parameters
-----	-----	----	------	-----	------------

Test Parameters	Nominal	Findings
NaCl Concentration	% 5±0,5	% 5.0
NaCl pH Value	6-7	6.9
NaCl Density Value	1.029-1.036	1.034
Collected Solution pH Value	6.5-7.2	6.9
Collected Solution Density Value	1.029-1.036	1.035
Cabin Temperature (C°)	35±2	35
Humidifier Temperature (C°)	50±2	50
Amount of Collected Liquid (ml/h)	1.5±0.5	130
Pure Water Conductivity		2.77 ms
Salt Ratio		%99

A total of 6 samples were prepared for the salt fog test, 3 without scratches and 3 with cross scratches, made of Miilux 500 armor steel with dimensions of 100x150 mm and a wall thickness of 8 mm (Figure 4).



Figure 4. Salt fog cataphoresis coated specimen

It is a Liebisch brand 1000-ATR model (See figure 5.) used in the salt fog test.



Figure 5. Machine view used in salt fog testing

The device, which has a working capacity of 1000 liters and a working pressure of 0.9-1 bar, has a hanger / shelf system that allows more than one different sample to be placed. [19]

2.3 Hardness test

Three Miilux 500 armor plate samples were used in the hardness measurement test. The size is 100x100mm and the wall thickness is 8 mm. The Brinell hardness measurement method was applied to the samples. In order to carry out Brinell hardness measurement tests, 0.5 mm deep chip removal was performed from the surfaces of the cut uncoated and cataphoresis coated armor steel in order to make accurate hardness measurements. This process is critical for the tests to give accurate results (Figure 6).



Figure 6. Coated surface cleaned sample

The ISO 6506-1 standard was applied to Miilux 500 armor steel, which was tested with and without coating. HBW 10/3000 hardness measurement values were used for the samples connected to the device as shown in Figure 7 [20].



Figure 7. Sample view connected to the device for hardness testing

2.4 Tensile test

The pull rods made of Miilux 500 armor steel have been tested according to the TS EN ISO 6892-1 standard [21]. Three samples of 8 mm thickness were cut for the test.



Figure 8. Tensile test specimen connection view

The test parameters and device information of the materials connected to the test device as shown in Figure 8 are given in Table 5.

	Table 5.	Tensile test	parameters	and device	e information
--	----------	--------------	------------	------------	---------------

Test Parameters					
Test Standard	Micrometer	Measuring Length			
TS EN ISO 6892-1	Watan 0101013662	80 mm			
Test Speed	Test Temperature	Humidity Ratio			
20 mm/dk	23°C	54%			
Device	Device Calibration	Digital Caliper			
Hardway / WAW 600D	D-14162-003	Mitutoyo 500-181-20			

3 Results and discussion

3.1 Cross-cut measurement results

The test result should be evaluated by taking into account the factors affecting the cross-cut test (surface cleaning, performing the cataphoresis processes perfectly and in accordance with the rules). Armor steel has been tested and evaluated with reference to the ASTM D3359 standard. The standard includes a table on how to evaluate the results obtained from the tests. The sample image obtained as a result of the test performed in this study is given in Figure 9.



Figure 9. Cross-cut test image of cataphoresis coated armor steel

When the image is examined, it is seen that the square regions between the parallel lines do not separate from the part or that there are breaks in the form of very small particles from the corners. When this image is evaluated according to the table in ASTM D3359 (see Table 6), it is understood that it falls within the 4B class. This situation clearly shows that the cataphoresis coating application is in accordance with the standard.

Table 6. Tensile test paramet	ers and device information
-------------------------------	----------------------------

Standard ISO ASTM			Scratched Surface
		Explanation	Appearance
			(For 6 parallel lines)
		Minor flaking of the	
		coating is seen at the	
1	4B	intersections of the cuts.	++++++
		Does not affect more than	
		5% of the cross cut	+++++

3.2 Salt fog measurement results

In this study, salt fog test was applied to armor steel with two different methods according to ASTM B 117 standard. In the first method, the cataphoresis coated sample was exposed to salt fog for 480 hours without scratching. Figure 10 shows the image of the tested armor steel. It is visually inspected whether there is any swelling or rust on the sample surfaces. When the sample, which was not scratched and exposed to the salt fog test, was examined, it was determined that there was no problem in adhesion, no rust walking or swelling. This shows that the cataphoresis coating application is appropriate. This coating is not impact resistant, the surface integrity will provide superior protection as long as there is no external impact.



Figure 20. Salt fog test view

In the second method, the surface of the sample was scratched and exposed to the salt fog test for 480 hours. Figure 11 shows the image of the sample that has been scratched on its surface and exposed to the salt fog test. When the image was examined, it was seen that there was no coating swelling in the non-scratched part. Rust has occurred in the scratched area, but no damage in the form of rust walking has occurred. One of the most important purposes of leaving a scratch is to see the scenario that may occur in case of scratching the surface and to observe the adhesion performance of the cataphoresis to the surface. This result shows that the cataphoresis coating application is appropriate.



Figure 31. Salt fog scratch test view

3.3 Hardness test results

Armor steel samples with and without surface coating were subjected to hardness measurement tests according to ISO 6506-1 standard. Measurements were made from three different points for each sample and average values were taken. These values are compared with the values predicted and measured by the manufacturer for Miilux 500 armor steels. The images of the tested samples are given in Figures 12 and 13.



Figure 42. Images of uncoated samples after hardness measurement test



Figure 53. Images of coated samples after hardness measurement test

The values given by the manufacturer for Miilux 500 armor steel and the test result values for uncoated and coated armor steel are given in Table 7. When the table is examined, it is seen that the average hardness values of the coated and uncoated samples are between the values measured by the manufacturer for armor steel. It was determined that the hardness value decreased by approximately 6% by applying cataphoresis coating to the samples. The most important reason for this is the 220-225 °C heat input in the baking process during the cataphoresis coating. This heat input is required to cure the cataphoresis and ensure full surface adhesion.

Table 7. Hardness test results and factory of	data co	omparison
---	---------	-----------

	Miilux 500 Armor Steel Factory data	Uncoated Hardness measurement results	Coated Hardness measurement results
Point 1	Х	533 HBW	510 HBW
Point 2	х	531 HBW	505 HBW
Point 3	х	536 HBW	503 HBW
Average	480-560 HBW	533 HBW	506 HBW

3.4 Tensile test results

Tensile tests were applied to uncoated and coated armor steel in accordance with TS EN ISO 6892-1 standard. Tensile test results were compared with the manufacturer's predicted and measured values for Miilux 500 armor steel. The appearance of uncoated and coated Miilux 500 armor steel as a result of the tensile test is given in Figures 14 and 15, respectively.



Figure 64. Cataphoresis uncoated tensile test result general view



Figure 15. General view of the tensile test result with cataphoresis coating

The tensile graph of the tensile specimen with cataphoresis coating is given in Figure 16.



Figure 76. Tensile test chart

The values predicted and measured by the manufacturer for Miilux 500 armor steel and the tensile strength, yield strength, percent elongation values obtained from the tensile tests of uncoated and coated samples are given in Table 8. When the results obtained are examined, it is seen that the yield strength of the cataphoresis coated sample has increased compared to the catalogue data, and this increase will be resistant to permanent changes that may occur after plastic deformation. On the other hand, tensile strength and percentage elongation values decreased compared to the catalog data.

Table 8.	Tensile	test results
----------	---------	--------------

		Tensi	le Tested S	amples		
	Thickness (mm)	Width (mm)	Yield Strength (N/mm ²)	Tensile Force (N)	Tensile Strenght (N/mm ²)	Percent Elongation (%A)
Average of Uncoated Sample Values	8.55	13.1	1337.5	185602.5	1654	12.2
Average of Cataphoresi s Coated Sample Values	8.5	13	1434	181197	1635	9.35
Factory Values	2.5-40	х	1250	x	1600	8

4 Conclusion

If we examine the changes on the Miilux 500 armor steel of the studies and tests, in substance;

As a result of the cross-cut (Adhesion) test application, it was determined that the adhesion level of the cataphoresis coating to the surface of the armor steel sheet was sufficient.

The salt fog test was applied in two different methods in the factory environment and no swelling or progression was observed on the Miilux 500 armor steel, surface swelling, rust or scratches from the bottom. With this result, it was concluded that the adhesion and surface protection levels are sufficient in cataphoresis coatings on armor steels.

It is stated in the catalog data of Miilux 500 armor steel that the hardness values should be between 480-560 HBW. For reference to the study, one of the samples was tested as raw, after surface cleaning, and the average of the data obtained from three points was 533 HBW. The average of the data taken from the three points of the armor steel, which has been cataphoresis coated and whose surface has been treated for testing, is 506 HBW. When we evaluate these data, it has been observed that there is a 5% decrease in the hardness of the armor steel with cataphoresis coating.

In the tensile test, the values of an uncoated raw material and a cataphoresis coated material were compared. Uncoated raw material; The average yield value was 1329.5 N/mm², the average tensile value was 1654 N/mm² and the yield percentage was 12.2%. As for the coated armor steel; The average yield value was 1434 N/mm², the average tensile value was 1635 N/mm² and the yield percentage was 9.35%. According to the factory catalog values, the yield, tensile strength and elongation percentage of the uncoated material are high. Miilux 500 armor steel sheet with cataphoresis coating; An increase of approximately 7.9% in yield strength, a decrease of approximately 1.2% in tensile strength and a decrease of approximately 18.4% in percent elongation were observed. These changes support the warning of armor steel manufacturers to change their mechanical properties. In this study, it was determined that the application of heat input to the armor steel after the cataphoresis process caused a decrease in its mechanical properties. Considering the superior corrosion resistance of the cataphoresis coating and the decrease in its mechanical properties, the place of use of the armor steel should be determined and design studies should be carried out accordingly.

Acknowledgement

This study is a part of a Master's Thesis carried out by İsmet Can BELLER at Mersin University, Institute of Science. Memduh KARA is the advisor of this thesis. This research did not receive grants from any funding agency in public, commercial, or not-for-profit sectors. My advisor, Prof. Dr. Memduh KARA and BMC Otomotiv Sanayi A.Ş. I would like to thank my managers for supporting my work at my company.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

Similarity Rate (iThenticate): 11%

References

- [1] G. Krauss, Steels: processing, structure, and performance. Asm International, 2005.
- [2] MIL-A 46100D (MR), Armor Plate, Steel, Wrought, Hardness. U.S. Military Specification, 1990.
- [3] Ş. H. Karagöz, Ş and H. Atapek, Fracture Behavior of Boron Doped Armor Steels. Proceedings of the 8th International Fracture Conference, pp. 186-196, Istanbul, Turkey, 7-9 November 2007.
- [4] Chart of the market rate of armor steel in the world market. https://www.factmr.com/report/4659/armour-steel-plate-market, Accessed 12 September 2020.

- [5] L. Sangoy, Y. Meunier and G. Pont, Steels for ballistic protection. Israel journal of technology, 24 (1-2), 319-326, 1988.
- [6] R. Lane, B. Craig and W. Babcock, Materials for blast and penetration resistance. AMPTIAC Quarterly, 6 (4), 39-45, 2002.
- [7] Ş. Karagöz, A. Yılmaz and H. Atapek, Armor Steels and Upgrade. 3. Defense Technologies Congress, Proceedings, Volume: I, pp. 501-511, Ankara, Turkey, 29-30 July 2006.
- [8] J. D. Lawrance, Electroplating Engineering Handbook, 4th ed., New York, 1963.
- [9] M. Arık, Mars 240(MIL A46100) Investigation of Welding Performance by Combining Armor Steel with Shielded Metal Arc Welding, Mersin, 2018, Page 1.
- [10] Miilux Protection 380/400/450/500 Datasheet. https://www.miilux.fi/wpcontent/uploads/2013/03/miil ux_protection_datasheet_2012_web.pdf, Accesed 31 January 2021.
- [11] T. Özçanak, Investigation of surface preparation, drying and coating processes before cataphoresis coating, pp. 2-6, 2009.
- [12] M. Kılınç, Investigation of the effect of duplex coating, which will be formed by solvent-based and water-based lamella coating applications on cataphoresis coating, on corrosion and life test, Eskişehir, 2019.
- [13] N. Karasungur, Effect of cataphoresis coating on different metal types and determination of solution methods. Master's Thesis, Gebze Technical University, Gebze, Turkey, 2023.
- [14] Writing on activation in cataphoresis coating. https://kataforeztesisi.com/kataforeztesisiprosesi/kayn akli-imalattan-gelis4/, Accesed 18 May 2021.
- [15] S. Sayaroglu, Investigation of the ultrafiltration currents observed on the surface of the baked parts after cataphoresis coating process. Master's Thesis, Gebze Technical University, Gebze, Turkey, 2019.
- [16] A. Özcan, Investigation of the evaluation of the hydrogen gas formed in the cataphoresis coating process in the baking oven. Düzce, Turkey, 2019, Page 22.
- [17] Cross-cut test equipment image and technical document.

https://www.tqcsheen.com/en/product/cross-cut-

- adhesion-test-cc1000-en/, Accesed 10 February 2021.
 [18] ASTM B117 19, Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus
- [19] Salt fog test equipment visual and technical documentation. https://www.liebisch.com/Produkte/korrosionspruefge raete/truhengeraete.php, Accesed 10 May 2021.
- [20] TS EN ISO 6506-1 :2014, Metallic materials, Brinell hardness test, Part 1: Test method
- [21] TS EN ISO 6892-1:2016 Metallic materials Tensile test - part 1: Test method at room temperature



NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 649-658



Niğde Ömer Halisdemir Üni**ver**sitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araștırma makalesi / Research article

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



Deep learning on the production line: A novel lightweight CNN model approach for efficient and fast defect detection

Üretim hattında derin öğrenme: verimli ve hızlı kusur tespiti için yeni bir hafif CNN modeli yaklaşımı

Hakan Tatar^{1,*}⁽¹⁾, Muhammed Furkan Küçük²⁽¹⁾

¹ Firat University, Academy Of Civil Aviation, Department of Aircraft Electrics and Electronics, 23200, Elazığ, Türkiye ² Firat University, Electrical and Electronics Engineering Department, 23200, Elazığ, Türkiye

Abstract

This paper presents an optimized lightweight CNN model developed using a unique dataset introduced here for the first time to detect defects in manufacturing processes in a factory. The model performance was analyzed comparatively with widely used large-scale deep learning architectures such as VGG16 and ResNet50. All models were trained on the same original dataset, followed by the same approach in tuning hyperparameters such as learning rate, optimization algorithm, and data augmentation strategies. Performance analyses were conducted using fundamental metrics such as accuracy, precision, and F1 score, along with confusion matrices and randomly selected test images. Our proposed model attained high accuracy while reducing computational cost and significantly shortening training time compared to traditional architectures. The results demonstrate that the proposed CNN model achieves a competitive level of accuracy comparable to large-scale deep learning models while serving as a more suitable alternative for low-power hardware systems.

Keywords: CNN, Fault detection, Solar panel, By-Pass Diode, Classification methods

1 Introduction

Today, image-based defect and error detection systems provide great advantages in terms of both time and cost by making great contributions to the automation of quality control systems in industrial production [1]. Traditional methods are used in product defect detection today, and these systems progress based on human observations. Therefore, human-dependent systems have disadvantages such as fatigue, carelessness and variables caused by human factors [2]. Contrary to these disadvantages, deep learning-based models can be trained on large datasets and detect error outputs faster and with higher success rates; thus, they can help to significantly increase efficiency in a production line [3].

In recent years, numerous studies have been conducted to detect output defects during production stages using various deep learning-based architectures, particularly convolutional neural networks (CNNs) [4]. For instance, an examination of

Öz

Bu makale, bir fabrikadaki üretim süreçlerinde ortaya çıkan kusurların tespiti için burada ilk kez sunulan benzersiz bir veri kümesi kullanılarak geliştirilen, optimize edilmiş hafif bir CNN modelini tanıtmaktadır. Model performansı, VGG16 ve ResNet50 gibi yaygın kullanılan büyük ölçekli derin öğrenme mimarileriyle karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Tüm modeller, aynı özgün veri kümesi üzerinde, öğrenme oranı, optimizasyon algoritması ve veri artırma stratejileri gibi sabit hiperparametrelerle eğitilmiştir. Performans analizleri doğruluk, kesinlik ve F1 skoru gibi temel metriklerin yanı sıra, karmaşıklık matrisleri ve rastgele test görüntüleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Önerdiğimiz model, geleneksel mimarilere kıyasla daha düşük hesaplama maliyeti ve çok daha kısa eğitim süresi ile yüksek doğruluk elde etmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen CNN modelinin büyük ölçekli derin öğrenme modelleriyle rekabet edebilecek düzeyde doğruluk sunarken, düşük güçlü donanıma sahip sistemler için daha uygun bir alternatif olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: CNN, Hata tespiti, Güneş paneli, Baypas diyotu, Sınıflandırma metotları

the study conducted by Elmas and Korkmaz reveals that a deep learning-based model was developed for detecting socket cable defects, achieving a test accuracy of 97.25% [5]. Similarly, in the study of Tan et al., applications for object detection and tracking utilizing deep learning algorithms were examined and incorporated into the literature [6]. In another study, Yıldırım et al. employed image processing and deep learning algorithms to classify assembly parts used in a manufacturing company, achieving a highly accurate automation system for assembly processes [7]. A separate study by Lei and Sui developed a Faster R-CNN-based model for detecting faults in high-voltage electrical transmission lines, accurately identifying insulator breaks and the presence of bird nests using the ResNet-101 architecture [8].

In addition, literature studies have implemented original model designs and conducted comparative analyses with traditional deep learning models. For example, the

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: httatar@firat.edu.tr (H. Tatar)

Geliş / Received: 17.02.2025 Kabul / Accepted: 13.03.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngumuh.1641247

DEA_RetineNet model proposed by Cheng and Yu employs a channel attention mechanism and adaptive spatial feature fusion methods for detecting defects on the surface of steel parts. According to the comparative analysis, this model increased the mAP value to 78.25% and provided a performance improvement of 2.92% compared to the traditional RetinaNet model [9]. Another investigation by He et al. proposed a CNN-based model for detecting steel surface defects. The model aimed to determine defect locations on surfaces by combining a multi-level feature fusion network (MFN) with feature maps produced by the CNN. Subsequently, regions of interest were identified using a Region Proposal Network (RPN), and a model incorporating both a classifier and a bounding box regression module generated the final detection results. The model was evaluated on the NEU-DET dataset, achieving mAP accuracies of 74.8% and 82.3% with 300 proposals using ResNet34 and ResNet50, respectively. Furthermore, it was noted that the model reached 92% of its performance while operating at a speed of 20 ft/s on a single GPU with only 50 proposals. Consequently, the researchers concluded that the proposed method is suitable for real-time defect detection [10].

Based on the findings obtained from the literature, both analytical studies and original deep learning-based model designs addressing the problem are frequently integrated into industrial automation. It is anticipated that the requirements of systems intended to restore production to its most efficient state will be fulfilled by deep learning models.

A review of recent studies reveals a notable emphasis on real-time defect detection applications in industrial production processes. A study by Özcan et al. utilised machine learning and image processing methodologies to identify contamination and deformations on the surfaces of LPG cylinders[11]. In a similar vein, Ozan and Ceylan have proposed a Raspberry Pi-based image processing system for the detection and classification of defective eggs in egg production facilities[12].

A literature review on studies emphasizing the significance of datasets and data quality reveals that class imbalance and data scarcity pose considerable challenges. These challenges hinder the generalization capability of the model, thereby leading to errors in defect detection [13]. An imbalance in datasets directly affects the model's reliability, leading to critical issues such as misclassification and disruptions in the production process [14].

In this context, the study aimed to classify output products labeled as either faulty or intact at a factory producing bypass diodes for solar panels in the Elazığ Organized Industrial Zone, and an original dataset was created by collecting data directly from the production site. Concurrently, data augmentation techniques were applied to prepare this data for the model, thereby enhancing its suitability for diverse inputs and improving its performance. Finally, a unique, lightweight, and efficient CNN-based defect detection model was implemented to detect and classify physical defects in both intermediate and final products within the production process. This paper makes four main contributions to the field, as summarized below:

- We develop a model designed to rapidly achieve high accuracy in detecting faulty intermediate and final products while minimizing the misclassification of non-defective items. Our proposed model achieves an overall accuracy of 94.2% in defect detection and classification.
- We evaluate the effectiveness of the newly designed model by comparing it against traditional architectures. These comparative tests provide an understanding of the strengths and limitations of our approach, emphasizing the specific areas where the proposed model demonstrates superiority.
- We conduct performance comparisons in later stages by benchmarking our model against pre-trained deep learning architectures, including ResNet50 and VGG16. This evaluation ensures an objective analysis of its performance relative to well-established models.
- Finally, we assess the models using a consistent evaluation framework, where all models, including pretrained architectures, are trained on the same custom dataset. The results are analyzed using key performance metrics such as accuracy, loss, and training time, providing a comprehensive understanding of the tradeoffs between model complexity and efficiency.

The rest of the paper is organized as follows.

Section 2 provides key methodological and analytical components in a systematic manner. This section includes a comprehensive discussion of the dataset characteristics, model architecture, training strategies, and computational methodologies employed to evaluate success criteria. Section 3 rigorously assesses the proposed model's performance through both quantitative and qualitative analyses, accompanied by a comparative evaluation against conventional approaches to ensure a critical discussion on the significance of the results. Finally, the paper concludes with the findings presented in Section 4.

2 Materials and methods

In this study, the aim was to systematically process 5751 high-resolution diode images labeled as A, B, and C types, which were originally generated for the first time in this study, to develop a deep learning-based classification model for detecting final and intermediate product defects at an industrial production site manufacturing bypass diodes for solar panels. These images consist of samples collected periodically from the production line that reflect various production defects.

2.1 Creating a data set

In our study, we utilized images collected from the factory operating in the Elazığ Organized Industrial Zone in Elazığ province to train our model. These images depict junction boxes, which are key components of solar energy systems, and within these boxes, bypass diodes are installed.

The components referred to as junction boxes are categorized into three types A, B, and C. Bypass diodes are installed inside the junction boxes and then secured by riveting. During this process, visually detectable errors occur in these products both before and after the riveting procedure.



Figure 1. Type A, B and C empty junction box

The dataset we created to detect these errors, as provided by the manufacturer, contains a total of 5751 images. In our dataset, 3245 product images are labeled "intact" and 2506 are labeled "faulty."

Table 1. Example of "faulty" status

Types of Error
Diode that is not suitable for the body
Reverse riveting of the diode to the body
Wrong body selection.
By-pass diode not fully seated on rivets

Table 1 lists the reasons for "faulty" situations. For example, Figure 1 shows an example of a bypass diode that is not fully seated on the rivets.



Figure 2. Distribution rate of dataset

Figure 2 explains the statistical distribution of the data set.

In the process of creating a dataset, it is essential to remember that data quality directly affects model performance. In this regard, careful attention was paid to ensuring high image quality, with photographs captured from various angles, under different lighting conditions, and at varying distances. Figure 3 illustrates examples of junction boxes containing diodes.



Figure 3. Type A, B and C with By-Pass diode junction box

2.2 Labeling the dataset

Our dataset comprises images of products classified as either "intact" or "faulty," with the latter exhibiting physical defects. This dataset was collected directly from the production site by the researchers, and no public dataset was utilized. The labeling process was conducted by the researchers as well. Consequently, the objective was to train and test the developed model to address challenges encountered in a real production environment.

2.3 Data pre-processing

In the Microsoft Visual Studio Code environment where the research was conducted, the Python programming language was utilized along with the TensorFlow and Keras libraries. Additionally, the OpenCV (cv2) library was employed for visual processing and preliminary preparation steps. In the initial stage of model training, the 5751 images created by the researchers were consolidated into a single dataset and organized into two folders, labeled as "faulty" and "intact" according to their classifications. Subsequently, the resolution of the images was standardized to 55×55 pixels for consistency and normalization, and the pixel values were rescaled to the range [0, 1] to make them suitable for the model. Prior to training, the dataset was partitioned into training (80%) and test (20%) sets, with the parameter "random_state=42" selected to prevent overfitting.

2.4 Data augmentation techniques

Data augmentation techniques were employed to utilize the dataset more comprehensively during training and to enhance the generalization ability of the developed model. The Keras class, ImageDataGenerator, is widely used for both data augmentation and preprocessing in the training of deep learning models. During the augmentation process, various transformations were applied to all training data using ImageDataGenerator to increase its diversity and generalizability. Table 2 shows data augmentation techniques.

Table 2. Data augmentation methods

Data Augmentation Techniques	Parameter
Random Rotation -20, +20	rotation_range = 20
Shifting in Horizontal and Vertical Directions	width_shift_range = 0.2, height_shift_range = 0.2
Shear or Shift	shear_range = 0.2
Zoom Range	zoom_range = 0.2
Horizontal Flip	True
Fill Mode	nearest



Figure 4. Examples of augmented images

Employing data augmentation techniques ensures that the model is not limited solely to the data it encounters directly in the dataset and enhances its generalization ability by learning how defects appear in different sizes, angles, and positions. Figure 4 shows the intermediate images after these data augmentation techniques are applied, demonstrating the transformations introduced to the dataset.

Convolutional Neural Networks exhibit high performance, particularly in image processing and object recognition. In the study by Şeker et al., it was stated that CNNs yielded superior results compared to other deep learning methods in image processing [15]. The feature extraction and classification capabilities of Convolutional Neural Networks are frequently employed in data analysis. For example, in the work of Oyucu and Herdem, the performance of the CNN-LSTM model in capturing longterm dependencies and complex features was emphasized [16].

In our study, Convolutional Neural Networks (CNNs) were employed because they can accurately recognize complex features in visual data.

2.5 Proposed CNN architecture

Our model architecture, illustrated in Figure 5, is constructed in a multi-layered manner based on the Convolutional Neural Network (CNN) model. The first convolutional layer employs 32 filters of size 3×3 , while the subsequent convolutional layer utilizes 64 filters of the same size to extract higher-quality information.

After each convolutional layer, a MaxPooling layer is applied to perform spatial downsampling and reduce the model's size. Additionally, dropout layers, used in conjunction with pooling layers, temporarily disable certain neurons to prevent memorization issues.

After the convolutional layers, the two-dimensional data is flattened into one-dimensional vectors using a flattening layer. These vectors are then fed into a Dense layer with 128 neurons, which employs a ReLU activation function along with L2 regularization. Subsequently, a dropout layer with a rate of 0.5 is applied to enhance regularization. Finally, the output is passed through a Sigmoid activation function to address the binary classification problem of "faulty" and "intact.".

In our study, the Binary Crossentropy loss function, which is frequently employed in two-class classification problems, was used. The purpose of this function is to minimize the difference between the probability distribution predicted by the model and the actual class labels. The function is based on the principle that the model's predictions for the correct class should be as high as possible while those for the incorrect class should be close to zero by evaluating the probability that each example belongs to the correct class in binary scenarios. In this way, it aims to improve the model's ability to distinguish between classes and enhance its generalization capability.

During the compilation phase, the Adam optimizer was employed for model optimization, and the "ReduceLROnPlateau" callback function was utilized to automatically adjust the learning rate based on the validation loss performance. This approach enabled continuous parameter updates and prevented unnecessary computational expenditure by avoiding an excessively high training rate.

To enhance the continuity of the model and improve the reliability of the output, the training process was conducted through five independent trials, with each trial consisting of 300 epochs. This approach allowed for a comparison of the effects of varying initial weight configurations and random conditions on the results. The statistical metrics obtained at the conclusion of each training session were recorded, and their averages were calculated. Additionally, the test data accuracy at the end of each trial was measured and documented separately. Consequently, detailed insights into the temporal dependencies of the model's performance, the learning process trajectory, and the associated performance statistics were obtained.

Our proposed CNN architecture is designed to achieve an optimal balance between complexity and computational efficiency. Unlike deeper networks that require extensive computational resources, our model employs only two convolutional layers, making it lightweight and suitable for real-time or resource-limited applications.

The inclusion of dropout layers after each pooling layer is a deliberate choice to mitigate overfitting, ensuring the model generalizes well across different data distributions.



Figure 5. Proposed model with explanation

In the implemented CNN model, dropout layers with a rate of 0.25 are strategically placed after each max-pooling operation, reducing the risk of over-reliance on specific neurons and improving the model's ability to extract robust features from the input data. Additionally, a higher dropout rate of 0.5 is applied before the final dense layers to further enhance regularization, preventing co-adaptation of neurons and leading to better generalization.

The L2 regularization in the dense layer further prevents excessive weight magnitudes, leading to better stability in training. This regularization technique is particularly crucial in the fully connected layers, where a large number of parameters can increase the risk of overfitting. By penalizing large weight values, L2 regularization ensures a controlled optimization process, resulting in improved model robustness.

Hyperparameter tuning was performed systematically to optimize the model's performance. The initial learning rate was set to 0.001, a standart choice for the Adam optimizer. This adaptive adjustment helps prevent convergence to suboptimal solutions by reducing the learning rate when performance improvements stagnate.

The batch size was experimentally determined to be 16, as it provided a balance between training stability and computational efficiency. A smaller batch size allows for more frequent weight updates, leading to faster convergence, while still maintaining a stable training process. Data augmentation techniques, including rotation, width and height shifts, shear transformation, zoom, and horizontal flipping, were applied to the training data to artificially increase its diversity, further enhancing generalization.

The architecture was designed to maximize feature extraction efficiency while maintaining a compact model size, making it suitable for real-world applications requiring rapid inference. The use of two convolutional layers with 32 and 64 filters, respectively, ensures progressive feature extraction, capturing both low- and high-level patterns in the input images. The choice of 3×3 kernel size and ReLU activation function enables effective non-linear transformations, crucial for deep learning-based visual recognition tasks.

2.6 Other models

By comparing our proposed model with pre-trained large-scale models such as ResNet50 and VGG16, we examined the pursuit of a model that is particularly suited for embedded systems and mobile devices, considering the high parameter counts and processing power requirements.

Figure 6 highlights the visual that shows the mutual aspects of the proposed model with deep learning.



Figure 6. Used models on study

The ResNet50 architecture is a member of the ResNet family introduced by He et al. in 2015 for addressing the gradient vanishing and optimization challenges that arise with deeper neural networks, this architecture enhances gradient flow in deep layers by incorporating residual connections, thereby streamlining the training process. With a total depth of 50 layers, ResNet50 has demonstrated superior performance on the ImageNet dataset and is widely employed in computer vision applications such as object detection and image classification [17].

The VGG16 model, developed by Simonyan and Zisserman, is a CNN-based model comprising 16 deep layers. A significant outcome of VGG16 is that increasing network depth can improve accuracy, and, in this context, the use of convolutional layers with smaller filters has proven to be effective [18].

2.7 Success parameters

In our study, various success parameters of the proposed model, such as accuracy, loss, sensitivity, precision, and F1 score, were analyzed, and the model's performance evaluation was explained in detail. Additionally, a complexity matrix analysis was performed to comprehensively assess the model's classification success after training. Moreover, to objectively analyze the model's real-world outputs, a probabilistic estimation of its output classification was conducted using randomly selected test images.

2.7.1 Confusion matrix

The complexity matrix is a critical analysis tool for evaluating the success of a machine learning model. This matrix compares the model's prediction results with the actual labels to determine which classifications are made correctly and to what extent. Figure 7 details the contents of the confusion matrix.



Figure 7. Confusion Matrix Interpretation

<u>**True Positive**</u>: Data that the model predicts as positive and is actually positive.

<u>**True Negative:**</u> Data that the model predicts as negative and is actually negative.

<u>**False Positive:**</u> Data that the model classifies as positive but is actually positive.

<u>False Negative</u>: Data that the model predicts as negative but is actually positive.

Accuracy

Gives the total correct prediction rate of the model. In general, it is a metric that shows the total success of the model. It is expressed by Equation 1.

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$
(1)

Recall

Essentially, it shows how accurately the data belonging to the positive class are predicted. It is expressed as in Equation 2.

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$
(2)

Precision

It is the metric that measures how accurate the positive predictions made by the model are. It is shown in Equation 3.

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$
(3)

• F1 Score

Precision alone is not a fully sufficient metric. For precision to be meaningful, it must be balanced with sensitivity. The F1-Score is used to measure the balance point of these two metrics. It is expressed as in Equation 4.

$$F1 = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall}$$
(4)

Macro Average

It is the success parameter that calculates the average of the metrics of each class by taking them equally weighted. It is expressed as in Equation 5.

$$Macro Avg = \frac{Precision_1 + \dots + Recall_N}{N}$$
(5)

N: Number of class

Weighted Average

After calculating the metrics of each class, the average is obtained by weighting it with the total number of examples of the class. It is shown in Equation 6.

$$W Avg = \frac{(P_1 \times NE_1) + \dots + (P_N x NE_N)}{Total Number of Samples}$$
(6)

P: Precision, NE: Number of examples, N: Number of class

3 Findings and discussions

The present study trained a CNN-based model on an unique dataset of 5751 images, classifying the products as either "faulty" or "intact.".

The study's results were analyzed using fundamental metrics, including the model's classification performance, recall, precision, and F1 score. In addition, classification errors were examined in detail with the assistance of a confusion matrix.

3.1 Classification performance

Table 3. Classification report

	Cla	ssification	Report	
	Precision	Recall	F1-Score	Support
Intact	0.99	0.90	0.95	3245
Faulty	0.89	0.99	0.94	2506
Accuracy	-	-	0.94	5751
Macro Avg	0.94	0.95	0.94	5751
Weighted Avg	0.95	0.94	0.94	5751

(The values are rounded to closest value.)

Table 3 presents the output metrics of the proposed model. The overall accuracy was determined to be 94%. In class-based evaluations, the precision for "intact" products was 99%, and the recall was 90%. These results indicate that the model is highly accurate in detecting "intact" products; however, in certain cases, products classified as "intact" were misidentified as "faulty," which is undesirable. The recall and precision values for "faulty" products were found to be 99% and 89%, respectively. Consequently, the model almost completely detects defective products correctly, rarely misclassifying defect-free products as faulty.

Class-based evaluation entails computing performance metrics (e.g., accuracy, precision, F1-score) separately for each class, enabling a detailed analysis of the model's performance across different categories. This approach is particularly crucial for imbalanced datasets, as it highlights class-specific variations. In contrast, overall evaluation provides a single aggregated measure of the model's effectiveness across all classes, offering a holistic assessment. This is achieved through macro, micro, or weighted averaging methods. However, overall evaluation may obscure disparities in class-wise performance. Therefore, to ensure a comprehensive assessment, both overall and class-based results are presented in detail in Table 3.

3.2 Confusion matrix



Figure 8. Confusion matrix result

The confusion matrix of the model is given in Figure 8, which enables the analysis of the samples taken by our model in incorrect classification. According to the confusion matrix obtained in our study:

- Approximately 90.3% of error-free products were predicted correctly.
- Approximately 99.2% of defective products were predicted correctly.
- 313 error-free labeled products were classified as faulty due to incorrect prediction.
- Only 20 of the faulty products were classified as faultless.
- 3.3 Validation on real images



Figure 9. Test on real images

The real world labeled outputs of the model are given in Figure 9. During the model design phase, outputs were also validated using randomly selected test images. An examination of these examples indicates that the model produces very high prediction probabilities and accurately classifies error-free products with a proportional accuracy ranging from 95% to 100%.

Based on the analysis of these images, it was observed that the proposed model can successfully distinguish even subtle differences in detail.

3.4 Comparison of models

In the field of deep learning, large-scale models trained using transfer learning techniques are frequently favored, particularly in object recognition and classification tasks. Models such as ResNet50 and VGG16, which achieve high performance in image-based tasks owing to their deep and expansive architectures, have been well established in the literature and are commonly employed in contemporary studies. However, the inherent disadvantages of large-scale models may render specialized, compact models more advantageous in certain contexts.

Within this scope, comparative analyses were conducted using traditional deep learning methods to contextualize the proposed model. The study results were presented in detail, outlining the characteristics of each model based on tests performed with the created dataset on traditional models.

3.4.1 Proposed model vs ResNet50



Figure 10. Proposed model and ResNet50 validation loss analysis



Figure 11. Proposed model and ResNet50 validation accuracy analysis

For the first application, Figure 10 and 11 show the comparative analysis of accuracy and loss values of the CNN architecture proposed in this study and the ResNet50 model. The information in the graph shows the average performance of the models after 300 epochs of training over five different iterations.

Upon examining of Figure 10, it is observed that the proposed model reduces the validation loss more rapidly during the initial epochs and approaches stability after approximately 100 epochs. Conversely, an analysis of the validation loss of the compared ResNet50 model reveals that its loss value decreases at a significantly slower rate and remains higher than that of the proposed model after approximately epoch 10 in each iteration. This indicates that the proposed model exhibits a faster learning capacity and achieves a lower validation loss rate.

An examination of the Figure 11 reveals that proposed model reached to 90% accuracy approximately in 30 epochs and largely maintained this level. In contrast, the compared ResNet50 model remained at 65-70% levels on our dataset and did not show significant improvement in the later stages of training. These results indicate that the specially designed CNN architecture generalizes much better than ResNet50 on our dataset and can successfully distinguish between target classes.

Considering another parameter like a training time our proposed CNN model completes training in 1260 seconds (21 minutes) per iteration on average, whereas the ResNet50 architecture requires 10,558 seconds (175 minutes). In CPUbased training, our model exhibits a significant advantage in updating parameters compared to ResNet50, which is hindered by extended parameter update durations and increased memory management overhead during mini-batch operations.

These results show that the transfer learning-based ResNet50 model cannot achieve optimal results on the uniqe dataset we created and that the CNN model we proposed has a much more suitable, lightweight, fast and reliable architectural design for certain tasks.

3.4.2 Proposed model and VGG16



Figure 12. Proposed model and VGG16 validation loss analysis



Figure 13. Proposed model and VGG16 validation accuracy analysis

In the second application, the performances of the proposed model and the VGG16 model, which is frequently used in the deep learning literature, were compared. In this

study phase, both models were trained five times with 300 epochs and the graphs in Figure 12 and 13 were created based on the average values.

An examination of the graphs reveals that VGG16 can stabilize the validation loss during training on the dataset up to a certain level, owing to its deep and complex structure. The VGG16 model demonstrates a balanced learning curve with low loss values, benefiting from the advantage of pretrained weights. However, in terms of validation accuracy, our proposed model achieves nearly the same accuracy levels as VGG16. Moreover, although our proposed model is not pre-trained like VGG16, it has nonetheless attained a high accuracy rate and exhibited a stable, steadily improving learning process on average.

Compared to the proposed model, the primary disadvantage of VGG16 lies in the weight and computational cost associated with its deep structure. During training, VGG16 requires significant memory due to its large number of parameters, resulting in intensive CPU resource consumption in local training environments. During the training process on the same hardware as the proposed model, the high resource consumption of VGG16 becomes particularly apparent. While our proposed model completes one training iteration in approximately 450 seconds, the VGG16 model requires around 2560 seconds for the same process. Consequently, large-scale models such as VGG16 become less suitable for environments with hardware limitations, such as embedded systems and mobile devices. In contrast, our proposed model trains much faster due to its lighter and simpler structure, and it requires substantially less computational cost to achieve a comparable level of accuracy. These results support the evaluation of the proposed model as a more suitable alternative for practical applications.

Based on this comparative analysis, we concluded that traditional models pre-trained on large datasets, such as VGG16, may encounter limitations and exhibit disadvantages in flexibility when adapting to new datasets. In contrast, our proposed model demonstrates a more targeted and adaptable performance, as it is directly optimized for our originally created dataset.

The model proposed in the study is regarded as a strong alternative to VGG16 due to its shorter training time, lower parameter requirements, and computational efficiency. Although the literature demonstrates that VGG16 performs well on large-scale, general-purpose datasets, a lighter and more problem-oriented model may be preferable in scenarios that demand rapid and frequent optimization.

In future studies, the objective is to test the proposed model on more comprehensive datasets, integrate it into various production areas, and enable real-time object and defect detection. Specifically, detailed analyses of the model's performance metrics on these datasets are planned, along with efforts to enhance its generalization ability by testing it on diverse data. Additionally, hyperparameter optimization aimed at increasing the hardware efficiency of the proposed model—as well as research and implementation of techniques to minimize memory management and computational costs—will be considered key areas for further investigation.

Integration evaluation will be made in different systems in order to increase the portability and effectiveness of the model in practical use areas. In particular, parameter and hyperparameter optimization studies will continue to be carried out to further reduce the processing power requirements of our model.

3.5 Future studies

One of the main goals expected to be achieved as a result of future studies is to make this supported model operable in embedded systems, mobile devices and devices with low hardware power and to be used for real-time applications.

In the light of such an approach, it is expected that the proposed model will contribute to digital industrialization by increasing its share in industrial production sites, IoT devices and platforms with low power consumption.

At the same time, increasing the energy efficiency of the model, improving data processing times and accelerating detection capabilities will be the main focus of future research.

As a result, a comprehensive development process is carried out to increase the applicability potential of the developed model for academic and industrial use, and it is aimed to provide an efficient, low-cost and highly generalizable artificial intelligence solution that appeals to a wide range of uses.

4 Results

In this study, a novel convolutional neural network (CNN) model was developed to detect defects in intermediate and final products within a factory production line. The proposed model was trained using an original dataset, systematically processed and labeled from data collected at regular intervals from the production site. The model's performance was statistically evaluated based on success metrics. Additionally, to ensure a kev comprehensive analysis, the proposed model was compared with widely used deep learning architectures, focusing on computational load, training time, and parameter optimization. To maintain objectivity in the comparative analysis, all models were trained using the same dataset, and hyperparameters such as data augmentation techniques, learning rate, and optimization algorithm were kept constant. The findings demonstrate that the proposed model not only achieves high accuracy and a low loss rate but also offers efficient processing capabilities with reduced computational costs. Furthermore, it represents a viable alternative for deployment on resource-constrained devices, outperforming large-scale deep learning architectures in terms of efficiency. The results indicate that the proposed model is a strong candidate for real-time defect detection in production processes.

Acknowledgement

This paper is produced from the part of Hakan TATAR's Master Thesis. In addition, we would like to express our sincere gratitude to all the management of Hatko - Hatsun Elazig PV-JB Production Factory for their valuable assistance in providing the necessary facilities and permissions to create the dataset used in this study.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

Similarity Rate (iThenticate): %13

References

- [1] I. D. Apostolopoulos and M. Tzani, Industrial object, machine part and defect recognition towards fully automated industrial monitoring employing deep learning. The case of multilevel VGG19, arXiv preprint arXiv:2011.11305, 2020. https://doi.org/10.4 8550/arXiv.2011.11305
- [2] D. Ever and E. N. Demircioğlu, Yapay zekâ teknolojilerinin kalite maliyetleri üzerine etkisi, Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 31 (1), 59-72, 2022. https://doi.org/10.3 5379/cusosbil.1023004
- [3] E. Oğuzay and M. Balta, Rulman titreşim verilerinden derin öğrenme tabanlı arıza tespiti, Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 14 (3), 1159-1175, 2024. https://doi.org/10.31466/kfbd.1434595
- [4] E. Akın and M. E. Şahin, Derin öğrenme ve yapay sinir ağı modelleri üzerine bir inceleme, EMO Bilimsel Dergi, 14 (1), 27-38, 2024.
- [5] B. Elmas and H. Korkmaz, Derin öğrenme ile soket kablo sıralama hata tespiti, Politeknik Dergisi, 1–1, 2025. (Early Access). https://doi.org/10.2339/politek nik.1500454
- [6] F. G. Tan, A. S. Yüksel, E. Aydemir, and M. Ersoy, Derin öğrenme teknikleri ile nesne tespiti ve takibi üzerine bir inceleme, Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi, 25, 159-171, 2021. https://doi.org/10.31590/e josat.878552
- [7] B. Yıldırım and G. Cagıl, Bir Montaj Parçasının Derin Öğrenme ve Görüntü İşleme ile Tespiti, Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications, 3 (2), 31-37, 2020. https://doi.org/10.38016/jista.710144
- [8] X. Lei and Z. Sui, Intelligent fault detection of high voltage line based on the Faster R-CNN, Measurement, 138, 379-385, 2019. https://doi.org/10 .1016/j.measurement.2019.01.072
- [9] X. Cheng and J. Yu, RetinaNet With Difference Channel Attention and Adaptively Spatial Feature Fusion for Steel Surface Defect Detection, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 70, 1-11, 2021. https://doi.org/10.1109/TIM.2020.3 040485.

- [10] Y. He, K. Song, Q. Meng, and Y. Yan, An End-to-End Steel Surface Defect Detection Approach via Fusing Multiple Hierarchical Features, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 69 (4), 1493-1504, 2020. https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2915404
- [11] H. Özcan, H. T. Gençtürk, G. Genç, T. E. Yıldırım, F. Durmuş, and A. Gürleyen, Gerçek zamanlı kusur tespiti: LPG tüplerinin yüzeylerinde kirlilikleri tanımlama için görüntü işleme ve makine öğrenimi teknikleri ile yenilikçi bir yaklaşım, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 24 (2), 330-340, 2024. https://doi.org/10.35414/akufe mubid.1364153
- [12] M. Ozan and M. Ceylan, Endüstriyel Üretim Tesislerinde Yumurtaların Görsel Analizi Ve Sınıflandırılması İçin Raspberry Pi Tabanlı Gerçek Zamanlı Bir Uygulama, SETSCI Conference Proceedings, 3, pp. 727-731, Samsun, Turkey, 2018.
- [13] M. Buda, A. Maki, and M. A. Mazurowski, A systematic study of the class imbalance problem in convolutional neural networks, Neural Networks, 106, 249-259, 2018. https://doi.org/10.1016/j.neunet.2018. 07.011
- [14] R. van den Goorbergh, M. van Smeden, D. Timmerman, and B. Van Calster, The harm of class imbalance corrections for risk prediction models: illustration and simulation using logistic regression, Journal of the American Medical Informatics Association, 29 (9), 1525-1534, 2022. https://doi.org/ 10.1093/jamia/ocac093
- [15] A. Şeker, B. Diri, and H. H. Balık, A Review about deep learning methods and applications, Gazi Journal of Engineering Sciences, 3 (3), 47-64, 2017.
- [16] S. Oyucu and M. S. Herdem, Hibrit derin öğrenme algoritmaları kullanılarak biyogaz reform süreçlerinin optimizasyonu: cnn-lstm modeli ile çıktı parametrelerinin tahmini, Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11 (23), 301-316, 2024. https://doi.org/10.54365/adyumbd.1488710
- [17] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, Deep Residual Learning for Image Recognition, 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, pp. 770-778, 2016. https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90.
- [18] K. Simonyan and A. Zisserman, Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition, arXiv preprint arXiv:1409.1556, 2015. https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.1556



NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 659-667



Niğde Ömer Halisdemir Üni**ver**sitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araștırma makalesi / Research article

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



Seismic performance evaluation of space-frame structures using nonlinear static and time-history analyses

Uzay kafes yapılarının sismik performansının doğrusal olmayan statik ve zamantarih analizleri ile değerlendirilmesi

Fooad Karimi Ghaleh Jough^{1*} (10), Sasan Babaei² (10)

^{1,2} Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Final International University, Via Mersin 10, AS 128, Kyrenia, Northern Cyprus, Türkiye

Abstract

Space-frame structures are extensively used in modern architecture and engineering due to their high load-bearing efficiency, lightweight nature, and suitability for large-span applications. This study assesses their seismic response through nonlinear static and time-history analyses using finite element modeling in ABAQUS. Various configurations with different spans, heights, and column arrangements were analyzed under seismic loads. The response modification factor (R) was evaluated concerning ductility-based reduction, overstrength, and allowable stress factors, ranging from 2.6 to 3.8. Results indicate that structural ductility plays a crucial role in determining the Response modification factor, with notable variations across different configurations. Increasing the number of columns improves this factor, whereas low-story models exhibit reduced ductile behavior. Time-history analysis reveals that base shear values remain within a similar range but are sensitive to frequency content. Additionally, increasing the story height leads to a significant rise in maximum roof displacement, highlighting the influence of height on seismic performance and structural stability in dynamic conditions.

Keywords: Space-frame structures, response modification factor, ABAQUS, time-history analysis, finite element modeling

1 Introduction

Space-frame structures have been widely utilized across the globe for various architectural and engineering applications, including sports stadiums, gymnasiums, recreation centers, aircraft hangars, railway stations, and other large-span structures. Many of these structures exceed spans of 200 meters, demonstrating the efficiency and adaptability of space-frame systems. The purpose of this study is to provide an in-depth examination of space-frame structural forms, with a specific focus on lattices, barrel vaults, and domes. Additionally, the study explores

Özet

Uzay kafes yapıları, yüksek taşıma verimliliği, hafif yapısı ve geniş açıklıklı uygulamalara uygunluğu nedeniyle modern mimari ve mühendislikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmanın amacı, bir sonlu elemanlar yazılımı olan ABAQUS programı kullanılarak, doğrusal olmayan statik ve zaman-tanım alanında analizler ile modellenen uzay kafes yapıların sismik tepkisini değerlendirmektedir. Farklı açıklıklı, yükseklikte ve kolon düzenlemelerine sahip yapılar sismik yükler altında analiz edilmiştir. Yapısal sistem davranış katsayısı (R), süneklik temelli azalma, aşırı dayanım ve izin verilen gerilme faktörleri açısından değerlendirilmiş olup, 2.6 ile 3.8 arasında değiştiği belirlenmiştir. Sonuçlar, yapısal sünekliğin zaman tanım alanında değişen tepkileri ile davranış faktörünü belirlemede kritik bir rol oynadığını ve farklı yapısal değişiklikler altında önemli farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Kolon sayısının artırılması bu faktörü iyileştirirken, düşük katlı modellerin süneklik davranısında azalma gözlemlenmiştir. Zaman-tanım alanında analizler, taban kesme kuvvetlerinin benzer aralıklarda kaldığını fakat frekans içeriğine duyarlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, kat yüksekliğinin artması, maksimum çatı katı yer değiştirmesinde önemli bir artışa neden olarak yüksekliğin sismik performans ve dinamik koşullardaki yapısal stabilite üzerindeki etkisini önemli ölçüde değiştirdiği vurgulanmıştır.

Anahtar kelimeler: Uzay kafes yapıları, tepki değişim faktörü, ABAQUS, zaman-tarih analizi, sonlu elemanlar modellemes

conceptual design tools that facilitate the shaping and structural analysis of space-frame systems.

A space-frame structure is a three-dimensional structural system that differs from planar structures, such as trusses, which primarily operate within a single plane. In contrast, space-frame structures are designed to distribute external loads and internal forces across multiple planes through a combination of interconnected components. This unique characteristic enhances their load-bearing capacity and allows for the construction of lightweight, large-span structures with minimal material usage [1].

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: fooad.karimi@final.edu.tr (F. Karimi Ghaleh Jough) Geliş / Received: 04.02.2025 Kabul / Accepted: 13.03.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngmuh.1633034

The classification of space-frame structures encompasses a diverse family of structural forms, including grids, barrel vaults, domes, towers, cable-supported systems, membrane structures, folding systems, and tensioned fabric designs. These structures exhibit significant variation in geometry, spanning from rectilinear to complex curved forms. The materials employed in space-frame construction include steel, aluminum, wood, and fiber-reinforced composites, each selected based on structural demands and environmental considerations [2].

Throughout history, space-frame structures have evolved significantly, drawing inspiration from ancient architectural marvels. Examples such as the Treasury of Atreus in Mycenae, the Pantheon in Rome, the Hagia Sophia in Istanbul, and the Ctesiphon in Iran illustrate early applications of large-span structures (see Figure 1). These constructions, primarily reliant on heavy masonry and stone materials, laid the foundation for modern space-frame engineering. The advent of iron and, later, steel revolutionized construction methodologies, enabling the creation of advanced space-frame configurations that optimize strength, durability, and aesthetic appeal [3].





(b)

Figure 1. Early examples of large-span structures: (a) Ctesiphon (272 AD), (b) Hagia Sophia (537 AD) [4, 5]

Contemporary space-frame structures can be categorized into three principal types: space frames, rigid shell structures, and soft-shell structures. Space frames, including trusses and grid systems, are commonly utilized for roofs and large-span enclosures. Rigid shell structures, often constructed using reinforced concrete, exhibit exceptional load-bearing efficiency and resistance to external forces. Soft-shell structures, encompassing cable-supported systems, membranes, and inflatable designs, leverage tension-based mechanics to achieve structural stability. Notable examples of modern space-frame applications include the Biosphere of Montreal, Sabiha Gökçen International Airport, and Istanbul Atatürk Olympic Stadium, as portrayed in Figure 2.



(c)

Figure 2. Iconic space-frame structures: a) Sabiha Gökçen International Airport, b) Biosphere of Montreal, c). Istanbul Atatürk Olympic Stadium [6-8]

The fundamental advantages of space-frame structures lie in their ability to distribute loads evenly, reducing localized stress concentrations and enhancing overall stability. Their lightweight nature minimizes material consumption while providing architects with greater design flexibility. Space trusses, a widely employed space-frame configuration, utilize triangular arrangements of members to efficiently resist axial forces. This structural efficiency allows for the construction of column-free spans, making them ideal for stadiums, exhibition halls, and industrial facilities. However, the intricate connections and node detailing of space trusses necessitate meticulous design precision to prevent local buckling and failure [9].

Studies have introduced clustering and optimization techniques to reduce the number of different nodes in space-

frame structures, significantly lowering manufacturing costs while maintaining structural integrity [10]. Moreover, innovative deployable mechanisms utilizing double-scissors link trusses have been explored for applications such as space antennas, showcasing substantial potential for dynamic structural adaptability [11]. Additionally, recent research has developed advanced damage detection techniques that account for semi-rigid connections in spaceframe joints, enhancing the accuracy of identifying structural vulnerabilities [12].

Recent innovations in space-frame engineering focus on hybrid systems that integrate reinforced concrete with upper chord layers to enhance structural rigidity while reducing material costs. Advanced connection mechanisms, such as force-limiting devices, improve post-buckling behavior and load-bearing capacity. Modular systems like MERO, NODUS, and UNIVAT simplify assembly, accelerating construction timelines and reducing labor requirements. Moreover, the seismic resilience of space-frame structures, attributed to their high redundancy and lightweight properties, makes them particularly suited for regions prone to dynamic loads, such as earthquakes and wind forces [13, 14].

The selection of materials significantly influences the performance of space-frame structures. Steel remains the predominant material due to its high strength-to-weight ratio and ease of fabrication. However, alternative materials such as aluminum, wood, and fiber-reinforced composites are increasingly utilized for specialized applications. Lattice transmission towers, for instance, leverage the structural efficiency of space-frame principles to achieve high stability with minimal material use [15].

The geometric versatility of space-frame structures further contributes to their widespread adoption in modern architecture. Common configurations include flat one- or two-layer grid systems, barrel vaults, lattice towers, and domes. Double-layer space structures incorporate diagonal trusses between upper and lower layers to enhance load distribution and structural efficiency. Domes, in particular, exhibit exceptional redundancy, making them resilient against localized damage. Different types of domes, including ribbed, Schwedler, lamella, and geodesic domes, provide distinct structural and aesthetic advantages based on specific application needs [16].

The means and tools of seismic analysis are being refined continuously, with several methods introduced to enhance accuracy and reliability. Among these advancements, new cooperative coevolutionary-based algorithms have demonstrated superior optimization techniques for the shape and sizing of space truss structures, significantly improving structural efficiency while reducing material costs [17]. Additionally, recent developments in equivalent beam models have refined dynamic simulations for large periodic beam-like space truss structures, reducing computational errors and enhancing the reliability of vibration control assessments [18].

Among these advancements, improving seismic resilience remains a critical area of research, as space-frame structures are widely used in earthquake-prone regions.

Therefore, a comprehensive time-history analysis of their nonlinear behavior and dynamic characteristics is a prerequisite for their effective design and application [19, 20]. This study evaluates the seismic performance of spaceframe structures using nonlinear static and time-history analyses in ABAQUS. Six numerical models were analyzed, differing in the number of columns, span lengths, and overall height. The response modification factor (R-factor) varies between 2.6 and 3.8, influenced by structural ductility, column count, and configuration. Increasing columns enhances ductility, while low-story models exhibit reduced ductility. Additionally, taller structures experience greater roof displacement, emphasizing height's impact on dynamic stability. The analyses were conducted using two seismic records, Chi-Chi and Loma Prieta, to assess structural response under different earthquake conditions.

2 Response modification factor (R)

A key parameter that represents the inelastic performance of structures under seismic loading is the response modification factor (R). It accounts for the hidden reserve strength in the nonlinear phase and is used to estimate the required design force by dividing the elastic seismic force by R. Most seismic design codes incorporate response modification factors in defining equivalent lateral forces, effectively reducing the elastic response spectrum to consider the structure's energy dissipation capacity. Thus, the design force is determined as [21-23]:

$$V = \frac{V_e}{R} \tag{1}$$

Where V is the design base shear, V_e is the elastic base shear, and R is the response modification factor. This factor depends on multiple parameters, including ductility, fundamental period, damping ratio, soil characteristics, earthquake properties, force-deformation behavior, overstrength factor, higher mode effects, and design safety factors.

To determine the response modification factor, researchers have developed various methods, primarily categorized into European and American approaches. While American approaches, including the Freeman capacity spectrum method and the Yuang ductility coefficient method, prioritize practicality and simplicity, European methods, such as the ductility theory and energy-based approach, rely on more intricate theoretical and analytical foundations. Among these, the Yuang method is widely preferred due to its simplicity in deriving structural behavior characteristics by approximating the capacity curve as a bilinear model [24, 25].

Structural ductility capacity is determined by the ratio between ultimate displacement and yield displacement [26]. A higher ductility ratio (μ) signifies greater energy absorption capacity, leading to an increased response modification factor. For multi-degree-of-freedom systems, the response modification factor consists of three key components: the ductility-based reduction factor (R_{μ}), the overstrength factor (Ω), and the allowable stress factor (Y). The relationship is given by [21-23]:

$$R_w = \frac{V_e}{V_w} = \frac{V_e}{V_y} \frac{V_y}{V_s} \frac{V_s}{V_w} = R_\mu \Omega Y$$
(2)

Where R_{μ} accounts for inelastic deformation capacity, Ω represents overstrength due to redundancy and material capacity, and Y is used to reduce the design base shear when applying allowable stress design (ASD). Overstrength arises from various factors, such as internal force redistribution, the sequential yielding of structural components, plastic hinge formation, and inherent conservatism in section design. It is expressed as:

$$\Omega = \frac{V_y}{V_s} \tag{3}$$

Where V_y is the yield base shear and V_s is the design base shear. Similarly, the allowable stress factor (Y) is given by [23]:

$$Y = \frac{V_s}{V_w}$$
(4)

Where V_w is the allowable stress-based shear force.

The capacity curve of a building can be derived from a pushover analysis, where lateral forces are incrementally applied to capture progressive stiffness degradation due to plastic hinge formation [27]. The resulting forcedisplacement response is typically idealized into a bilinear model such that the area under the nonlinear curve matches that of the bilinear representation. The initial segment intersects 60% of the total deformation length, ensuring an equivalent energy dissipation capacity.



Figure 3. A structure's capacity curve, along with its bilinear approximation [23]

Ductility-based force reduction is further studied through empirical relationships developed by myriads of researchers. These models provide mathematical formulations linking the response modification factor to system ductility, period, and soil conditions. For example, Miranda & Bertero's equation is expressed as [23]:

$$R_{\mu} = \frac{\mu - 1}{\emptyset} \tag{5}$$

where Φ varies based on site classification (rock, alluvial, or soft soil). These formulations allow for a more precise estimation of response modification factors, enhancing the seismic performance assessment of structures.

3 Investigated models

In this study, the target lattice shell was first designed in SAP according to Table 1 and then analyzed in ABAQUS using nonlinear seismic analysis. ABAQUS was employed for the finite element analysis of space-frame structural forms, including lattices, barrel vaults, and domes. The software supports various element types, such as beam and shell elements, which are crucial for accurately modeling these structures. Its advanced meshing techniques enable precise structural analysis, ensuring a realistic evaluation of structural performance [28-30].

Abaqus software has been widely used in the evaluation of R-factor across various structural systems. In the study of steel slit panel frames, Abaqus was utilized to perform static pushover and nonlinear incremental dynamic analyses, determining an R-factor of 8.11 for moment-resisting frames with steel slit panels [31]. Similarly, in the seismic design of steel-fiber-reinforced concrete segmental tunnels, an experimental and numerical approach was used to estimate R-factors, highlighting the influence of hybrid steel-fiberreinforced concrete mixes on structural performance [32]. Furthermore, a multilevel approach for dual momentresisting frames with vertical links demonstrated that the addition of eccentric braces significantly increased the Rfactors, with values ranging between 7 and 10 depending on the seismic hazard level and performance target [33].

The shell models had diameters of 25 m and 50 m, with 8, 12, or 24 columns and a grid spacing of 1.2×1.2 m. The shell was rigidly connected to the columns and supported at its edges by a perimeter beam, which transferred forces to the columns. Steel pipes were used for the shell, columns, and edge beams, with ST37 steel as the material. The structure was modeled for Tabriz, a high-seismic-risk zone, with an importance factor of 1.2 and soil type 3. Figures 4 and 5 illustrate the constructed finite element models in ABAQUS.

 Table 1. Specifications of the constructed models

Case	Lattice Shell	Height (m)	Span (m)	Number of Columns
1	25-25-2.5	2.5	25	8
2	25-25-5	5	25	8
3	25-25-7.5	7.5	25	12
4	50-50-5	5	50	24
5	50-50-7.5	10	50	24
6	50-50-15	15	50	24

To optimize computational efficiency and prevent convergence issues, an ideal elastoplastic model was used. Two steel types were considered: cold-formed lightweight steel for the frame members and conventional steel for bracing elements, with a yield stress of 370 MPa and a fracture strain of 0.018.



Figure. 4. Modeling of the analyzed space frame structure in SAP2000 (a) Case 1 (b) Case 2



Figure 5. Modeling of the analyzed space frame structure for Case 1 in ABAQUS

The structure was modeled using truss elements available in ABAQUS. These two-force members transfer loads only at their nodes and have axial resistance without bending capacity. Two-dimensional truss elements are used for symmetric models such as trusses and bolts, while threedimensional truss elements are suitable for spatial structures like space frames and prestressed cables in reinforced concrete or pipelines.

Two interaction modeling approaches were considered. The first method, using shared nodes, is applied in macroscale modeling where members are directly connected via multi-point constraints. This approach is computationally efficient. The second method, contact modeling, involves separate nodes for columns, beams, and angles, with interaction defined in ABAQUS. However, due to the significant computational cost, this approach was deemed impractical. The primary reasons for the increased computational demand in contact modeling include a substantial rise in the number of simultaneous equations in nonlinear analysis and the necessity for smaller time steps to maintain numerical stability [34]. For boundary conditions, all translational and rotational degrees of freedom were fixed at the base of the columns.

4 Nonlinear elastic analysis (Pushover)

The structural models analyzed in this study, in addition to gravitational load, are subjected to both nonlinear static analysis and time-history accelerations. During nonlinear static analysis, loads are incrementally introduced to evaluate the stress-strain response at different stages. For accurate analysis, structural elements modeled as beam elements use the two-node T3D2 element for meshing. Due to the independent assembly of components, each part is meshed separately, with finer meshes in critical areas to enhance precision. The connections are designated as rigid. A standard solver is employed to analyze nonlinear equilibrium equations using the Newton-Raphson method.



Figure 6. Comparison of the nonlinear static pushover responses of the evaluated models



Figure 7. Comparison of the response modification factor and its components in the analyzed models

Due to the presence of geometric and material nonlinearity, multiple interactions, and the necessity for precise and stable outcomes, this study employs an implicit solver for the analysis. In this method, the software automatically determines the appropriate time increments to ensure a reliable and efficient simulation process.

Figure 6 illustrates a comparison of the nonlinear static pushover curves for the six evaluated models. Case 4 exhibits the highest stiffness among all, featuring 24 columns and a story height of 5 meters. In contrast, Case 2, which comprises 8 columns and the same story height, demonstrates the lowest stiffness. Case 3, with 12 columns and a story height of 7.5 meters, shows the most ductile behavior, sustaining a displacement of nearly 10 cm. Although Case 4 has the highest stiffness, its relatively short height contributed to brittle failure, leading to collapse at a displacement of approximately 6.5 cm.

Figure 7 illustrates a comparison of the response modification, overstrength, and ductility-based force reduction factors. The response modification factor of the system ranges from 2.6 to 3.8, with Case 6 exhibiting the highest value and Case 1 the lowest. Among the contributing factors, the ductility-based reduction factor has the most significant influence on the response modification factor, varying between 2.0 and 2.6, with Case 6 demonstrating the greatest impact. In contrast, the overstrength factor, ranging from 1.3 to 1.8, has the least contribution to the response modification factor. Consequently, Case 4, characterized by 24 columns and the lowest story height, exhibits higher response modification factors.

5 Time history analysis

In this study, the models were subjected to the acceleration components of the 7.6 magnitude Chi-Chi and 6.9 magnitude Loma Prieta earthquakes. These records were obtained from the PEER Strong Motion Database and were chosen from sites 8 to 20 km from the fault, classified as

ordinary ground motions according to FEMA 440. Based on the USGS classification, they correspond to site type B, which aligns with soil type II in Standard 2800. The selected ground motions exhibit a significant duration, defined as either a minimum of 10 seconds or three times the structure's predominant period, whichever is longer, as assessed using SeismoSignal software.



Figure 8. Unscaled acceleration-time history: (a) Chi-Chi earthquake, (b) Loma Prieta earthquake

The acceleration records were scaled using SeismoSignal to ensure their spectral values met the required criteria. The response spectra of the scaled ground motions were calculated with 5% damping and combined using the SRSS method to create a unified response spectrum for each record pair. These spectra were then averaged and compared with the Standard 2800 design spectrum, ensuring the average spectral values remained at least 1.4 times the corresponding design spectrum values. The scaling factors for the Chi-Chi and Loma Prieta earthquake records were determined as 0.6g and 0.65g, respectively. These scaled records were then used in nonlinear time-history dynamic analysis. The unscaled record is portrayed in Figure 8.

The time-history analysis of Cases 4 and 6, which have the highest response modification factors of 3.76 and 3.825, respectively, was conducted for comparison. As shown in Figure 9 a and b, the displacement of both cases is higher under the Loma Prieta record. Figures 10 and 11 indicate that, despite having nearly the same response modification factor, Case 6 exhibits the lowest maximum displacement 2.42 and 1.23—compared to Case 4, which experiences maximum roof displacements of 5.95 and 5.3 under the two seismic records.



Figure 9. Displacement-time history for (a) Case 4 and (b) Case 6



Figure 10. Displacement time history comparison for Case 4 and Case 6 under Chi-Chi ground motion



Figure 11. Displacement time history comparison for Case 4 and Case 6 under Loma Prieta ground motion

Figure 12 presents the base shear time history for the two cases under the two records. Case 6, which experiences the least maximum displacement, undergoes greater base shear, reaching 9.1 kN and 13.3 kN. In contrast, Case 4 exhibits displacements of 8.1 cm and 6.76 cm.



Figure 12. Base shear time history for Cases 4 and 6: (a) Chi-Chi earthquake, (b) Loma Prieta earthquake

6 Conclusions

This study explored the structural behavior and seismic performance of space-frame structures, particularly focusing on lattices, barrel vaults, and domes. Through finite element nonlinear static pushover and time-history analyses, the response modification factor (R) was assessed to understand the influence of ductility, overstrength, and force reduction on seismic resilience. Findings indicate that ductility is the key factor in defining the response modification factor, with Case 6 achieving the highest value due to its enhanced deformation capacity. In contrast, Case 4, characterized by its high stiffness, showed a more brittle response with lower deformation capacity. Time-history analysis further demonstrated that while both cases exhibited similar response modification factors, Case 6 experienced lower maximum displacements and higher base shear forces, suggesting improved energy dissipation capabilities. The results emphasize the significance of optimizing space-frame configurations to improve seismic performance. Future studies should prioritize the integration of advanced materials, hybrid structural systems, and innovative connection technologies to further improve the efficiency and resilience of space-frame structures. These insights contribute to the development of sustainable and highperformance architectural solutions, ensuring the continued evolution of space-frame engineering in modern construction.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 5%

References

- [1] T. Takeuchi, H. Nakayama, and T. Ogawa, Buckling and seismic response of grid shell with cylindrical joints. Proceedings of IASS Symposium, 2011.
- [2] K. J. Hwang, Advanced investigations of grid spatial structures considering various connection systems. University of Stuttgart, 2010.
- [3] T. Bulenda and J. Knippers, Stability of grid shells. Computers & Structures, 79(12), 1161-1174, 2001. https://doi.org/10.1016/S0045-7949(01)00011-6.
- [4] Wikipedia.https://en.wikipedia.org/wiki/File:Ctesipho n-ruin_1864.jpg/, Accessed. 5 January 2025.
- [5] B. Pentcheva, Eternal victory: Byzantine territorial expansion and Constantinopolitan liturgical splendour at Hosios Loukas (Steiris, Greece). Journal of the International Society for Orthodox Music, 6(1), 1-70, 2022. https://doi.org/10.57050/jisocm.113301
- [6] Cermex. https://www.cerm-ex.com/sabiha-gokcenterminal/ Accessed, 4 January 2025.
- [7] J. Sharma, J. Eppler, J. Busler, Urban Infrastructure monitoring with a spatially adaptive multi-looking InSAR technique. 113, 2015. http://www.doi.org/10.5270/Fringe2015.pp113
- [8] Tekfen Holding. https://www.tekfenmuhendislik.com/ istanbul-ataturk-stadium/, Accessed. 5 January 2025.
- [9] K. Gidófalvy, Effect of connection rigidity on the behaviour of single-layer steel grid shells. presented at the Conference: Proceedings of the Conference of Junior Researchers in Civil Engineering, Budapest, Hungary, 2012.
- [10] Y. Liu, T.-U. Lee, A. Koronaki, N. Pietroni, and Y. M. Xie, Reducing the number of different nodes in space frame structures through clustering and optimization. Engineering Structures, 284, 116016, 2023: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116016.
- [11] M. Sattar, N. U. Rehman, and N. Ahmad, Design, kinematics and dynamic analysis of a novel double – scissors link deployable mechanism for space antenna truss, Results in Engineering, 22, 102251, 2024. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102251.
- [12] R. Hou, J. L. Beck, X. Zhou, and Y. Xia, Structural damage detection of space frame structures with semi-

rigid connections. Engineering Structures, 235, 112029, 2021. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112029.

- [13] S. Babaei, P. Zarfam, A. Sarvghad Moghadam, and S. M. Zahrai, Assessment of a dual isolation system with base and vertical isolation of the upper portion. (in Korean), Structural Engineering and Mechanics, 88(3), 263-271, 2023. https://doi.org/10.12989/sem.2023.88.3.263.
- [14] R. Mesnil, C. Douthe, O. Baverel, and B. Léger, Linear buckling of quadrangular and kagome gridshells: A comparative assessment. Engineering Structures, 132, 337-348, 2017, https://doi.org/10.1016/ j.engstruct.2016.11.039.
- [15] F. Ruo-qiang, Y. Bin, and Y. Jihong, Stability of lamella cylinder cable-braced grid shells. Journal of Constructional Steel Research, 88, 220-230, 2013: https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.05.019.
- [16] D. Naicu, R. Harris, and C. Williams, Timber Gridshells: Design methods and their application to a temporary pavilion. presented at the World Conference on Timber Engineering (WCTE), Canada, 2014.
- [17] B. Etaati et al., Shape and sizing optimization of space using truss structures a new cooperative coevolutionary-based algorithm. Results in Engineering, 21, 101859, 2024, https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101859.
- [18] D. Zhu, X. Yan, J. Sun, F. Liu, and D. Cao, An improved equivalent beam model of large periodic beam-like space truss structures. Chinese Journal of Aeronautics, 36(12), 297-308, 2023. https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.06.034.
- [19] S. Babaei and F. Karimi Ghaleh Jough, Parametric Study of Vertically Isolated Steel Braced Frames Controlled by Shape Memory Alloys. Journal of Applied Engineering Sciences, 14(2), 194-201, 2024. https://doi.org/10.2478/jaes-2024-0024
- [20] S. Babaei and F. Karimi Ghaleh Jough, A comprehensive evaluation of tuned vertical isolation system for seismic risk mitigation. Journal of Applied Engineering Sciences, 14(1), 27-34, 2024. https://doi.org/10.2478/jaes-2024-0004.
- [21] F. Karimi Ghaleh Jough and S. B. Beheshti Aval, Uncertainty analysis through development of seismic fragility curve for an SMRF structure using an adaptive neuro-fuzzy inference system based on fuzzy C-means algorithm. Scientia Iranica, 25(6), 2938-2953, 2018. https://doi.org/10.24200/sci.2017.4232.
- [22] F. K. G. Jough and S. Şensoy, Prediction of seismic collapse risk of steel moment frame mid-rise structures by meta-heuristic algorithms. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 15(4), 743-757, 2016. https://doi.org/10.1007/s11803-016-0362-9.
- [23] Building and Housing Research Center. Derivation of response modification factors for concrete moment resisting frames. Tasnimi A., Masoumi A., Publication No. 4361st edition.; 2006.
- [24] S. Babaei and P. Zarfam, Optimization of shape memory alloy braces for concentrically braced steel

braced frames. 9(1), 697-708, 2019. https://doi.org/10.1515/eng-2019-0084.

- [25] F. K. G. Jough, M. Veghar, and S. B. Beheshti-Aval, Epistemic uncertainty treatment using group method of data handling algorithm in seismic collapse fragility. Latin American Journal of Solids and Structures, 18, 2021.
- [26] F. Karımı Ghaleh Jough and B. Ghasemzadeh, Reliability prediction of SMRF based on the combination of neural network and incremental dynamic analysis. Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology, 5(2), 91-105, December 2023. https://doi.org/10.60093/jiciviltech.1317804.
- [27] N. Mert and A. Nzapfakumunsi, Seismic design evaluation of t shaped irregular RC building plans by using pushover analysis. Sakarya University Journal of Science, 23(2), 259-268, 2019. https://doi.org/ 10.16984/saufenbilder.471209.
- [28] F. Kıpçak and B. Erdil, Yığma yapıların düzlem dışı davranışlarına yan duvarın ve yan duvar boşluğunun etkisi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12(3), 853-860, 2023. https://doi.org/10.28948/ngumuh.1268912.
- [29] S. Babaei, A. Habib, M. Hosseini, and U. Yildirim, Investigating the inelastic performance of a seismic code-compliant reinforced concrete hospital under long sequence of ground motions records. Sustainable Civil Engineering at the Beginning of Third Millennium,

Singapore, U. Türker, Ö. Eren, and E. Uygar, Eds., Springer Nature Singapore, 364-373, 2024.

- [30] B. Sivri and B. Temel, Değişken kesitli Timoshenko kolonlarının tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemiyle burkulma analizi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11(1), 122-128, J 2022. https://doi.org/10.28948/ngumuh.994891.
- [31] F. Aliakbari and H. Shariatmadar, Seismic response modification factor for steel slit panel-frames. Engineering Structures, 181, 427-436, 2019. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.027.
- [32] M. Jamshidi Avanaki, Response modification factors for seismic design of steel fiber reinforced concrete segmental tunnels. Construction and Building Materials, 211, 1042-1049, 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.275.
- [33] V. Mohsenian, N. Gharaei-Moghaddam, and I. Hajirasouliha, Response modification factors for dual moment-resisting frames with vertical links: Multilevel approach. Advances in Structural Engineering, 24(14), 3299-3314, 2021. https://doi.org/ 10.1177/13694332211026220.
- [34] F. Karimi Ghaleh Jough and B. Ghasemzadeh, Uncertainty interval analysis of steel moment frame by development of 3D-Fragility curves towards optimized fuzzy method. Arabian Journal for Science and Engineering, 49(4), 4813-4830, 2024. https://doi.org/10.1007/s13369-023-08223-8.





NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 668-679 Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araștırma makalesi / Research article

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



CatBoost algoritmasının taşınmaz değerlemede kullanımı: Bayesian hiperparametre optimizasyonu ile karşılaştırmalı analiz

The use of Catboost algorithm in real estate valuation: A comparative analysis with Bayesian hyperparameter optimization

Berra Nur Tunç^{1*} (10), Ümit Haluk Atasever² (10)

^{1,2} Erciyes Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 38030, Kayseri Türkiye

Öz

Taşınmaz değerlemede, makine öğrenimi modelleri kullanılarak objektif, bilimsel ve hızlı tahminler elde edilmektedir. Bu çalışmada, hiperparametre optimizasyonu vapılmış farklı makine öğrenimi modelleri kullanılarak taşınmaz değerlemede en tutarlı ve başarılı sonucu veren model belirlenmiştir. Özellikle CatBoost regresyonu, modern makine öğrenimi ihtiyaçlarına uygun olarak geliştirilmiş, yüksek doğruluk ve hız sunan bir model olarak ön plana çıkmaktadır. Çalışmada CatBoost'un yanı sıra Destek Vektör Regresyonu, Lasso Regresyonu, Karar Ağaçları Regresyonu ve AdaBoost Regresyonu da değerlendirilmiştir. Deneysel hesaplamalar için Boston şehrinde toplanmış 506 konutun çeşitli öznitelikleri ve fiyatlarına sahip bir veri seti kullanılmıştır. Hata metrikleri karşılaştırıldığında, optimize edilmiş CatBoost regresyonu, tüm modeller arasında en yüksek performansı göstermiştir. Özellikle, literatürdeki diğer yöntemlere kıyasla daha tahminler sunarak, taşınmaz değerleme basarılı çalışmalarında öne çıkmıştır. Destek Vektör Regresyonu ise nispeten daha düşük başarı sergilemiştir.

Anahtar kelimeler: Taşınmaz Değerleme, Makine Öğrenimi Modelleri, CatBoost Regresyonu, Hiperparametre Optimizasyonu

1 Giriş

Taşınmaz, arazi, bina, bahçe gibi yer değiştirilmesi mümkün olmayan malları ifade eden bir kavramdır. Taşınmaz değerlemesi, bir taşınmazın konumu, fiziksel özellikleri ve çevresel faktörlerini dikkate alarak değerini belirlemek amacıyla yapılan bilimsel değerlendirme sürecidir. Bir taşınmazın tam değerini belirlemek gerçekte mümkün değildir. Çünkü her taşınmaz, bulunduğu konum ve kullanım şekline göre farklı özellikler sergiler ve bu özellikler, kişiden kişiye önem olarak değişmektedir. Bu nedenle taşınmaz değerlemesinde kriterlerin önem derecesi olarak kesin bir bilgi yoktur. Ancak, bilimsel yöntemler kullanılarak yapılan değerleme işlemleri ile taşınmazın değeri daha doğru bir şekilde belirlenebilmektedir [1].

Bir taşınmazın değeri farklı fiziksel ve çevresel özelliklerin bir araya gelmesiyle belirlenmektedir. Bu yüzden taşınmazın değerini doğru şekilde yansıtacak özelliklerin belirlenmesi ve analiz edilmesi büyük önem

Abstract

In real estate valuation, machine learning models enable objective, scientific, and rapid predictions. This study aimed to determine the most consistent and accurate model for real estate valuation using various machine learning models with hyperparameter optimization. Specifically, CatBoost regression stands out as a modern model developed to meet contemporary machine learning needs, offering high accuracy and speed. In addition to CatBoost, Support Vector Regression, Lasso Regression, Decision Tree Regression, and AdaBoost Regression were also evaluated. For experimental calculations, a dataset comprising various attributes and prices of 506 properties collected in Boston was used. When error metrics were compared. the optimized CatBoost regression demonstrated the highest performance among all models. Particularly, it provided more accurate predictions than other methods in the literature, establishing itself as a standout approach in real estate valuation studies. Support Vector Regression, on the other hand, exhibited relatively lower success.

Keywords: Real Estate Valuation, Machine Learning Models, CatBoost Regression, Hyperparameter Optimization

taşımaktadır. Özelliklerin seçimi yapılırken, kriterler arasındaki ilişkilerin modelin doğruluğu üzerindeki etkisi dikkate alınmalıdır [2].

Değerleme sürecinde bir taşınmazın piyasa değerini belirleyen unsurlar; yapısal özellikleri, bulunduğu konum, kullanım alanı, ulaşım imkanları gibi çevresel faktörler, toplumsal yapı gibi sosyal faktörler ve kişisel etmenler olarak sıralanabilmektedir [3]. Taşınmaz değerleme sürecinde kullanılan parametrelerin doğru, tutarlı ve tarafsız bir şekilde değerlendirilmesi amacıyla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında klasik, istatistiksel analizler, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), çok kriterli karar analizleri ve makine öğrenimi teknikleri sayılmaktadır. Özellikle son yıllarda birçok akademik çalışmada kullanılan makine öğrenimi yöntemleri çok sayıda taşınmaz verisini bir arada inceleyerek bilimsel bir yaklaşımla değerleme süreçlerini sağlamaktadır [4, 5]. Son yıllarda, algoritmaların performansını artırmak amacıyla modelin eğitildiği

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: berranursen@erciyes.edu.tr (B. N. Tunç) Geliş / Received: 06.12.2024 Kabul / Accepted: 14.03.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngumuh.1597288

hiperparametrelerin ayarlanması veya optimize edilmesi amacı ile hiperparametre optimizasyonu üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Hiperparametreler, makine öğrenimi modellerinin yapılandırılması sürecinde kullanıcı tarafından belirlenen ve modelin öğrenme sürecine rehberlik eden parametrelerdir [6]. Hiperparametre optimizasyonu makine öğrenimi modellerinin sürecini direkt olarak etkileyen ve değerleri en üst düzeve cıkarabilen hiperparametre kombinasyonlarının bulunması sürecidir. Bu süreç çoğunlukla deneme yanılma, grid araması, rastgele arama ve Bayesian hiperparametre optimizasyonu gibi farklı teknikler aracılığıyla uygulanır [6, 7].

Literatürde makine öğrenimi modelleri kullanılarak farklı birçok çalışma gerçekleştirilmiştir.

Türkan vd. [4] çalışmalarında kent ölçeğinde toplu taşınmaz değerlemesi sürecinde farklı makine öğrenimi tekniklerinin uygulanmasını ele almaktadır. Çalışmanın amacı, Niğde kentinde 1200 taşınmaza ait verileri kullanarak Lineer Regresyon, Yapay Sinir Ağları, Regresyon Ağaçları, Destek Vektör Regresyonu ve Gaussian Process Regresyonu gibi algoritmalarla taşınmaz değer tahmini gerçekleştirmektir. Çalışmaları sonucunda, eğitim verileri üzerinde en başarılı modelin Gaussian Process Regresyonu olduğu, ancak test verilerinde en yüksek doğruluğa Yapay Sinir Ağları ile ulaşıldığı belirlenmiştir. Çalışma, kent ölçeğinde toplu taşınmaz değerlemede makine öğrenimi tekniklerinin etkinliğini ortaya koyması ve Yapay Sinir Ağları'nın en güvenilir tahminleri sağladığını göstermesi acısından literatüre önemli bir katkı sunmaktadır.

Hazer vd. [6] calısmalarında kücük ölcekli kentlerde taşınmaz değerlemesi sürecinde hiper-optimize makine öğrenimi tekniklerinin uygulanmasını ele almaktadır. Çalışmanın amacı, 2022 ve 2023 yıllarına ait taşınmaz verilerini kullanarak Bayes Tekniği ile optimize edilmiş kullanarak regresyon modellerini değer tahmini gerçekleştirmektir. Çalışmaları eğitim verileri üzerinde en başarılı modelin Çekirdek Regresyonu, test verilerinde ise Topluluk Regresyonu olduğu sonucuna varmışlardır. Çalışma, toplu taşınmaz değerlemede hiper-optimize edilmiş makine öğrenimi tekniklerinin heterojen özelliklere sahip alanlarda bile güvenilir sonuçlar sağlayabileceğini kanıtlaması açısından literatüre önemli bir katkı sunmaktadır.

Baur vd. [8] çalışmalarında konut fiyatlarının tahmininde yapı özelliklerinin haricinde ilan metnini de dikkate alarak konut değerleme modellerinin doğruluğunu artırmayı amaçlamışlardır. Berlin'deki kiralık daireler ve Los Angeles'taki ev satış teklifleri verilerini kullanarak çeşitli makine öğrenimi modellerini değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak ilan metninin modele dahil edilmesinin ortalama mutlak hata (MAE) oranını azalttığını belirlemişlerdir.

Hernes vd. [9] çalışmalarında 2016-2022 yıllarında Wroclaw'daki arsa emlak verilerini ele alıp regresyon modellerinden rastgele orman ve yapay sinir ağlarının tahmin performansını değerlendirerek taşınmaz değerleme sürecinde makine öğrenimi modellerinin uygulanabilirliğini araştırmayı amaçlamışlardır. Çalışmalarının sonucunda en düşük tahmin hatası oranı olan %13 MAPE ile yapay sinir ağı modelinin en yüksek doğruluk seviyesine ulaştığını belirlemişlerdir. Bu sonuçlar ile makine öğrenimi modellerinin taşınmaz değerleme için etkili sonuçlara ulaşılabileceğini ortaya koymuşlardır.

Jafary vd. [10] çalışmalarında Melbourne Metropol Bölgesi'nde fiziksel, coğrafi, sosyoekonomik ve çevresel faktörlere dayalı olarak XGBoost, Destek Vektör Regresyonu, Rastgele Orman ve Derin Sinir Ağı olmak üzere dört farklı makine öğrenimi modelini kullanarak otomatik değerleme modellerinin performansını karşılaştırmayı amaçlamışlardır. Sonuçlara göre XGBoost diğer modellere göre üstün performans gösterdiğini belirlemişler.

Konhauser vd. [11] çalışmalarında konut binalarının enerji verimliliği özelliği ile mülk değeri arasındaki ilişkiyi analiz etmeyi amaçlamışlardır. Birleşik Krallıktaki Enerji Performans Sertifikaları ve emlak işlem verilerini birleştirerek XGBoost ve CatBoost gibi iki gelişmiş makine öğrenimi modelini uygulamışlardır. Enerji verimli binaların Londra dışındaki bölgelerde finansal fayda sağladığı sonucuna ulaşmışlardır. Çalışmadan elde ettikleri sonuçlar ile enerji verimliliği yatırımlarının ekonomik faydalarını ve karbonsuz bir topluma geçişteki önemi vurgulamışlardır.

Grzybowska vd. [12] çalışmalarında Orta Avrupa'daki dört ülkede konut kalabalıklığını ve sosyoekonomik faktörleri incelemeyi amaçlamışlardır. Araştırmalarında 2022 yılına ait gelir ve yaşam koşulları üzerine en son istatistiksel verileri kullanmışlardır. Makine öğrenimi modeli olarak Random Forests, Balanced Random Forests, Extreme Gradient Boosting ve yeni bir yöntem olan CatBoost gibi modelleri uygulamışlardır. CatBoost modelinin diğer modellere kıyasla doğruluk ve eğri altındaki alan (AUC) açısından en yüksek performansı sergilediğini belirlemişlerdir. Çalışmaları sonucunda, ülke faktörünün konut yoksulluğunun belirlenmesinde önemli bir etkiye sahip olduğunu vurgulamışlardır.

Kalliola vd. [13] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Helsinki'deki taşınmaz fiyatlarını tahmin etmek için yapay sinir ağlarının (YSA) hiperparametre optimizasyonunu ele almaktadır. Çalışmalarında YSA modellerinin hiperparametrelerini Bayesian optimizasyonu kullanarak en iyi hale getirmek ve fiyat tahmin doğruluğunu artırmayı amaçlamışlardır. Çalışma sonucunda hiperparametre optimizasyonunun model performansında önemli bir iyileşme sağlandığını göstermişlerdir. Bu çalışma, taşınmaz değerleme sürecinde makine öğrenimi modellerinin doğruluğunu artırmada Bayesian optimizasyonunun önemini ortaya koymaktadır.

Aydınoğlu vd. [14] çalışmalarında, toplu taşınmaz değerleme süreclerinde farklı makine öğrenme algoritmalarının etkinliğini ve konumsal/konumsal olmayan özniteliklerin tahmin doğruluğuna etkilerini incelemektedir. Calısmanın amacı, İstanbul Pendik ilçesindeki 1475 taşınmaza ait verileri kullanarak Çoklu Doğrusal Regresyon (CDR), Genelleştirilmiş Doğrusal Model (GDM), Destek Vektör Makineleri (DVM), Karar Ağaçları (KA) ve Rastgele Orman (RO) algoritmaları ile taşınmaz değer tahmini gerçekleştirmektir. Çalışmalarında, en yüksek doğruluğa Rastgele Orman algoritması ile ulaşıldığını, en düşük doğruluğun ise Karar Ağaçları ve GDM modellerinde gözlendiğini belirlemişlerdir. Ayrıca, konumsal ve konumsal

olmayan veri setlerinin model doğruluğuna etkileri incelendiğinde, konumsal verilerin taşınmaz değer tahmininde daha büyük bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Çalışma, toplu taşınmaz değerlemede makine öğrenme algoritmalarının farklı veri setleriyle test edilerek etkinliğinin karşılaştırılması açısından literatüre önemli bir katkı sunmaktadır.

Literatürde taşınmaz değerleme süreçlerinde makine öğrenimi modellerinin kullanımı yaygınlaşmış olsa da hiperparametre optimizasyonu ile iyileştirilmiş modellerin karşılaştırmalı analizi çalışmaları sınırlıdır. Bu çalışma, Bayesian hiperparametre optimizasyonu ile iyileştirilmiş modern makine öğrenimi yöntemlerinden biri olan ve kategorik değişkenlerle doğrudan çalışabilme avantajına sahip CatBoost regresyon yönteminin ve literatürde yaygın olan diğer regresyon yöntemlerini kullanılarak, taşınmaz değerleme de en başarılı sonucu üreten modeli elde etmeyi amaçlamaktadır. Çalışma taşınmaz değerleme alanında geleneksel literatürde kullanılan makine öğrenimi yöntemlerinden farklı olarak modern yöntemlerden biri olan CatBoost algoritmasında hiperparametre optimizasyonu kullanımı ile literatürdeki diğer çalışmalardan farklılaşmaktadır.

Çalışmada Boston veri seti [15] kullanılmış olup makine öğrenimi yöntemlerinden CatBoost Algoritması, Destek Vektör Regresyonu (DVR), Lasso Regresyonu ve Karar Ağaçları Regresyonu, AdaBoost Regresyonu modelleri kullanılmıştır. Calışmada hiperparametrelerinin doğru belirlenebilmesi icin hiperparametre optimizasvon yöntemlerinden Bayesian hiperparametre optimizasyonu ve farklı regresyon modellerinin hata metrikleri kullanılarak bu modellerin birbirine göre kıyaslaması gerçekleştirilmiştir. Hiperparametre optimizasyonu ile iyileştirilmiş yöntemlerin hem eğitim hem test verileri için genel olarak sonuçlarına bakıldığında yöntemlerin kendi içinde tutarlı sonuçlar elde ettiği görülmüştür. Ancak yöntemleri kıyaslandığında CatBoost regresyon yöntemi en başarılı sonucu verirken DVR regresyon yöntemi ise görece daha başarısız sonucu vermistir.

2 Materyal ve metot

Bu çalışma, hiperparametre optimizasyon yöntemlerinden Bayesian hiperparametre optimizasyonu ile iyileştirilmiş regresyon yöntemleri kullanılarak, taşınmaz değerleme de en tutarlı ve başarılı sonucu üreten modeli elde etmeyi amaçlamaktadır. Çalışmada daha önce birçok uygulamada kullanılmış olan Boston veri seti kullanılmıştır. Bu veri seti Massachusetts eyaletinin başkenti olan Boston şehrine toplam 506 konuta ait verileri içermektedir. Bu konutlara ait toplam 13 özellik verisi bulunmaktadır. Veriler tamamen rastgele bir şekilde %70'i eğitim ve %30'u test verisi olmak üzere bölünmüştür. Boston Veri setindeki 506 adet konut için seçilen 13 adet özellik Tablo 1' de verilmiştir.

Kullanılan bu veri setinde konum bilgisiolarak. Boston'daki beş ana iş merkezine olan mesafe ağırlığı, otoyollara erişim indeksi, Charles Nehrine yakınlık gibi konumsal faktörler bulunmaktadır. Bu veri setinin seçilme nedeni taşınmaz fiyatlarını etkileyen geniş bir değişken skalasına sahip olması ve literatürde yaygın olarak karşılaştırmalı analizler için kullanılmasıdır. Özellikle fiziksel özellikler (oda sayısı, bina yaşı), ekonomik özellikler (emlak vergisi, düşük gelirli nüfus yüzdesi) ve konum özellikleri (otoyollara erişim, iş merkezlerine uzaklık) gibi değişkenlerin taşınmaz fiyatları üzerindeki etkisinin önemidir. Çalışmada bu değişkenler hiperparametre optimizasyonu uygulanarak makine öğrenimi modellerinde kullanılmış ve taşınmaz değerleme süreçlerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir.

Tablo 1. Boston veri setindeki özellikler

Özellik	Açıklama
0	Crim: Kişi başına düşen suç oranı (kasaba bazında)
1	Zn: 2350 m²'den büyük arsalara sahip konut alanının oranı
2	Indus: Kasaba başına düşen ticaret dışı iş alanlarının oranı
3	Chas: Charles Nehri için değişken (1: nehre sınırsa; 0: değilse)
4	Nox: Azot oksit konsantrasyonu (milyonda birim)
5	Rm: Konut başına ortalama oda sayısı
6	Age: 1940'tan önce inşa edilmiş, sahibi tarafından kullanılan birimlerin oranı
7	Dis: Boston'daki beş ana iş merkezine olan mesafe ağırlığı
8	Rad: Radyal otoyollara erişim indeksi
9	Tax: Her 10.000 dolar başına tam değerli emlak vergisi
10	Ptratio: Kasabadaki öğrenci-öğretmen oranı
11	B: kasabadaki siyahi nüfus oranını içeren bir ölçüt
12	Lstat: Düşük statüye sahip nüfus yüzdesi

2.1 Makine öğrenimi modelleri

2.1.1 CatBoost algoritması

CatBoost regression modeli Yandex araştırmacıları tarafından karar ağacı gradyanını arttırmak amacıyla geliştirilmiş ve kategorik verileri ön işlemeye ihtiyaç duymaksızın doğrudan veriyi kullanabilen etkili bir öğrenme modelidir [16]. CatBoost modelinin büyük eğitim verisi gereksinimlerine bakılmaksızın verimli sonuçlar elde edebilmesi, modeli diğer modellerden ayıran en belirgin özelliktir. CatBoost'un gerçek dünya uygulamalarında etkili sonuçlar elde etmesini sağlayan avantajlar arasında kategorik değişkenleri otomatik olarak etkili bir şekilde işleyebilmesi, sınıflandırma doğruluğunun yüksek olması, hiperparametrelerin kolaylıkla ayarlanabilmesi için optimizasyon mekanizması içermesi ve aşırı öğrenmenin kontrol edilerek azaltılması olarak sıralanabilmektedir [16].

CatBoost yönteminin temelinde zayıf regresyon modellerinin bir araya getirilerek daha güçlü bir model oluşturulabileceği fikri yatmaktadır. L(.) kayıp fonksiyonudur ve model beklenen kayıp fonksiyonu gradyan inişi yöntemi ile Denklem (1)'deki gibi minimize ederek eğitilir [17]:

$$h^{t} = \underset{h \in H}{\arg\min L(F^{t-1} + h)}$$

=
$$\underset{h \in H}{\arg\min \mathbb{E}L(y, F^{t-1}(x) + h(x))}$$
(1)

Burada y çıktıyı temsil eder ve h, H fonksiyon ailesinden seçilen bir gradyan adım fonksiyonudur. Bu fonksiyonun hesabı Denklem (2)'deki gibidir;

$$h(x) = \sum_{j} b_{j} I\{x \in R_{j}\}$$
⁽²⁾

Bu denklemde R_j , karar ağacının yapraklarına karşılık gelen bölgeleri, b_j ise karşılık gelen bu bölgelerin tahmin değerlerini ifade eder. *I* ise bir gösterge fonksiyonudur [16, 18, 19].

2.1.2 Destek vektör regresyonu

Destek vektör regresyonu Vapnik ve Cortes [20] tarafından geliştirilen ve özellikle verilerin lineer olarak ayrılamaması durumunda iyi performans gösteren bir makine öğrenme modelidir [4]. DVR temel olarak bir aşırı düzlem oluşturarak çalışmaktadır. Bu düzlem, veri noktaları ile bu noktaların tahmin edilen regresyon değerleri arasındaki farkı kontrol etmeye odaklanmaktadır. Amaç, bu farkın belirli tolerans aralığı içinde kalmasını sağlamaktır. Bu şekilde model, tahmin edilen değerlerle gerçek değerler arasındaki uyumu optimize etmektedir [6, 21].

DVR regresyon fonksiyonun matematiksel ifadesi Denklem (3)'deki gibidir.

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n} (w_i, \varphi(x_i)) + b$$
(3)

Burada f(x) tahmin edilen değeri, w_i modelin öğrenme sürecinde her bir destek vektörüne ne kadar önem verileceğini belirler, $\varphi(x_i)$ destek vektörlerini tanımlar ve verileri daha yüksek boyutlu bir uzaya dönüştürmek için kullanılan bir fonksiyon, *b* ise aşırı düzlemin veri noktalarına göre konumunu ayarlayan bir sabittir [6].

2.1.3 Lasso regresyonu

Lasso regresyonu, verilerin belirli hata sınırları içerisinde kalacak şekilde hedef değişken için tahmin performansını artırmayı amaçlamaktadır. Lasso regresyonda L_1 düzeltmesi kullanılmaktadır. L_1 düzeltmesi $\sum_{j=1}^{p} |\beta_j|$ olarak ifade edilmektedir [22]. Lasso regresyonunun matematiksel ifadesi Denklem (4)'deki gibidir.

$$\hat{\beta}_{Lasso} = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^{p} \beta_j x_{ij})^2 + \lambda \sum_{j=1}^{p} |\beta_j| = AKT + \lambda \sum_{j=1}^{p} |\beta_j|$$
(4)

Burada λ ceza terimini temsil eder ve sıfıra yaklaştıkça Lasso doğrusal regresyona yakın sonuç elde etmektedir. Bu yüzden λ parametresinin seçimi modelin temsili için oldukça önemlidir. y_i gerçek değerleri, β_0 model sabit terimini, β_j *j*'inci bağımsız değişkenin regresyon katsayısını, x_{ij} *i*'inci gözlemin *j*'inci bağımsız değişkenine karşılık gelen değeri, *AKT* artık kareler toplamını ifade etmektedir[22].

2.1.4 Karar ağaçları regresyonu

Karar ağaçları regresyonu, tahmini gerçekleştirilen değişken değerinin bağımsız değişkenler yardımı ile tahmin edilmesinde kullanılan bir makine öğrenmesi yöntemdir. Karar ağaçlarının temel amacı değer kümesini $(x_1, x_2, ..., x_p)$ *j* sayıda yaprağa ayırarak $(R_1, R_2, ..., R_j)$ her yaprak için tahminlerde bulunmaktır. Regresyon ağaçlarında, değer noktaları yapraklara ayrıldıkça her yaprak için gözlemlenen sonuçların ortalaması hesaplanmaktadır. R_j yaprağındaki tahmin Denklem (5)'deki şekildedir.

$$\hat{y}_{R_j} = \frac{1}{n_j} \sum_{i \in R_j} y_i \tag{5}$$

Burada \hat{y}_{R_j} tahmin edilen değeri, $n_j R_j$ yaprağına düşen veri sayısı, $y_i R_j$ yaprağındaki her bir gözlemin gerçek değerini, R_j karar ağacının j'inci yaprağını ifade etmektedir [22].

2.1.5 AdaBoost regresyonu

AdaBoost regresyonu, örneklerin özellik uzayını yinelemeli bir şekilde tarayıp eğitim verilerinin ağırlıklarını belirlemektedir. Bu regresyonun asıl amacı zayıf modellerin güçlü yönlerini alarak en iyi modeli oluşturmaktır. AdaBoost, birden fazla model üretir ve her modelin avantajlı yanlarını bir araya getirerek bu modellerden başarılı bir model çıkarmaya çalışmaktadır. AdaBoost algoritması, zayıf modelleri birleştirerek en başarılı modelin sonucunu Denklem (6) ile üretmektedir.

$$h_f(x) = \inf[y \in Y: \sum_{t:h_{t(x) \le y}} \log\left(\frac{1}{\alpha_t}\right) \ge \frac{1}{2} \sum_t \log\left(\frac{1}{\alpha_t}\right)]$$
(6)

Burada $h_f(x)$ tahmin edilen değeri $h_{t(x)}$ zayıf öğrenicileri, α_t model ağırlığını ifade etmektedir [23, 24].

2.2 Çalışmada kullanılan hata metrikleri

Makine öğrenim modelleri ile veri seti ile ilgili yapılan tahminlerin ne kadar başarılı olduklarının belirlenebilmesi için hata metrikleri kullanılmaktadır. Bu hata metriklerinden, MSE (Karesel Ortalama Hata), MAE (Ortalama Mutlak Hata), R² (R-Kare), MAPE (Ortalama Mutlak Yüzdesel Hata), COD (Tahminlerin Gerçek Değerler ile Sapma Oranı) ve PRD (Fiyata Bağlı Fark Oranı) kullanılmıştır.

Bu hata metriklerine ait formüller sırasıyla Denklem (7), Denklem (8), Denklem (9), Denklem (10), Denklem (11), Denklem (12), Denklem (13) ile ifade edilmiştir. Özellikle COD ve PRD gayrimenkul değerleme amacı ile kullanılan bir ölçüttür. COD, tahmin edilen değerlerin standart sapmasının gerçek değere oranını temsil eden dağılım katsayısı iken PRD, bir gayrimenkulün piyasa değeri ile tahmin edilen değeri arasındaki tutarlılığı ölçmek için kullanılmaktadır [5].

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2$$
(7)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |y_i - \hat{y}_i|$$
(8)

$$R^{2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \hat{y}_{i})^{2}}{\sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \bar{y}_{i})^{2}}$$
(9)

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{|y_i|}$$
(10)

$$COD = \frac{100}{m} * \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} \left| \frac{y_i}{\hat{y}_i} - m \right|}{n-1} \right)$$
(11)

$$m = medyan(y_i * \sqrt{\hat{y}_i}) \tag{12}$$

$$PRD = \frac{mean(\frac{y_i}{\hat{y}_i})}{\sum_{i=1}^n y_i / \sum_{i=1}^n \hat{y}_i}$$
(13)

Burada y_i gerçek değeri, \hat{y}_i tahmin edilen değeri ve \overline{y}_i ise gerçek değerlerin ortalamasını ifade etmektedir.

2.3 Bayesian hiperparametre optimizasyonu

Bayesian hiperparametre optimizasyonu, makine öğrenimi modellerinin hiperparametrelerini sistematik olarak optimize etmek için kullanılan bir yöntemdir. Geleneksel ızgara arama veya rastgele arama yöntemlerinden farklı olarak, Bayesian optimizasyon olasılıksal modeller kullanarak hiperparametrelerin performansını tahmin eder. Bayesian optimizasyon hiperparametrelerin model performansı üzerindeki etkisini tahmin etmek için bir vekil model (örneğin Gaussian Süreci, Rastgele Orman veya Ağaç Yapılı Parzen Tahmincisi) kullanır. Daha sonra yeni hiperparametre değerleri seçmek için bir kazanım fonksiyonu devreye girer. Süreç yeni hiperparametre ve hata değerleri kullanılarak vekil modelin sürekli güncellenmesiyle iteratif olarak devam eder [25]. Bayesian optimizasyon ilk aşamasında hiperparametre arama alanı tanımlanır. Buradaki amaç optimize edilecek hiperparametrelerin türü (örneğin sürekli, kategorik veya tamsayı) ve aralıkların belirlenmesidir. Daha sonra başlangıçta birkaç rastgele hiperparametre kombinasyonu seçilerek model üzerinde değerlendirilerek hata hesaplanır ve bu sonuçlarla vekil model oluşturulur. Bu vekil model ile kazanım fonksiyonunun en iyi performansı vereceği tahmini hiperparametreleri önermesini sağlanır. Bu hiperparametreler model üzerinde değerlendirilerek sonuclar vekil modele eklenir ve süreç iteratif olarak tekrarlanır [25].

Bayesian optimizasyonun en büyük avantajı, modelin performansını tahmin etmek için daha az sayıda denemeye ihtiyaç duymasıdır. Ayrıca arama alanında hem keşif (bilinmeyen bölgelerin araştırılması) hem de sömürü (bilinen iyi bölgelerin daha fazla değerlendirilmesi) arasında dengeli bir strateji izler. Bayesian optimizasyon hem sürekli hem de kategorik hiperparametreleri optimize edebilmesiyle nedeniyle hemen hemen tüm regresyon modellerinin hiperparametrelerini optimize edilmesi için kullanılabilir [26].

Literatürde yapılan önceki çalışmalarla kıyaslandığında bulguların büyük ölçüde örtüştüğü görülmektedir. Baur vd. [8] tarafından yapılan konut değerleme çalışmasında, makine öğrenimi modellerinde hiperparametre optimizasyonunun hata oranlarını düşürdüğü ifade edilmiş ve çalışmamızda da hiperparametre optimizasyonunun doğruluk üzerindeki olumlu etkisi gösterilmiştir. Hernes vd. [9] tarafından yapılan çalışmada da hiperparametre optimizasyonu uygulanmış modellerin daha yüksek doğruluk sağladığı belirlenmiştir. Jafary vd. [10] tarafından yapılan otomatik taşınmaz değerleme çalışmasında, XGBoost ve DVR'nin performansı karşılaştırılmış ve optimizasyon sonrası XGBoost'un en başarılı model olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada DVR başarısız bulunmuş olup, çalışmamızın bulguları ile örtüşmektedir. Konhauser vd. [11] tarafından yapılan çalışmada XGBoost ve CatBoost regresyonları karşılaştırılmış ve CatBoost'un yüksek doğruluk sunduğu görülmüştür. Kalliola vd. [13] tarafından yapılan çalışma hiperparametre optimizasyonunun taşınmaz değerleme sürecindeki önemini vurgulamıştır. Bu çalışmada kullanılan Bayesian optimizasyon yönteminin model performansını artırdığı görülmüştür. Prokhorenkova vd. [18] tarafından yapılan çalışmadaki CatBoost'un hiperparametre optimizasyonu sonrası üstün performans gösterdiği bulgularıyla paralellik göstermektedir.

3 Bulgular ve tartışma

Regresyon modellerinin hiperparametre optimizasyonunda model başarısını en üst düzeye çıkarmak için kontrol parametrelerinin hangisinin ayarlanacağının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır [27]. Hiperparametre optimizasyonu uygulanmış regresyon modellerinde, veriler rastgele bir şekilde %70'i eğitim ve %30'u test verisi olacak şekilde eğitim ve test aşamaları için bölünmüştür. Bu bağlamda kullanılan regresyon modellerinde optimize edilen hiperparametreler literatürde yaygın olarak kullanılan değer aralıklarına dayandırılmış olup, Tablo 2'de bu aralıklar, Tablo 3'te ise optimizasyon sonucunda en iyi performansı gösteren hiperparametreler verilmiştir.

Şekil 1'de verilen korelasyon matrisi, çeşitli özelliklerin bir hedef değişken arasındaki korelasyonları ve göstermektedir. Korelasyon matris grafiği genellikle 1s1 görselleştirilmektedir. haritası olarak Korelasyon katsayılarının renklerle ifade edildiği ve böylece yüksek veya düşük korelasyonların kolayca gözlemlenebildiği bir yöntemdir. Özellik-8 (Radyal otoyollara erişim indeksi) ve özellik-9 (Her 10.000 dolar başına tam değerli emlak vergisi) hedefle pozitif korelasyonlar (sırasıyla 0.62 ve 0.58) sergilerken, özellik-11 (kasabadaki siyahi nüfus oranını içeren bir ölçüt) ise negatif bir korelasyona (-0.39) sahiptir. Ayrıca özellikler arasındaki korelasyonların genel olarak çok yüksek olmaması, regresyon süreçlerinde kullanılmalarını oldukça uygun hale getirmektedir.

Şekil 2-6' da sunulan grafikler kurulan modelin gerçek değerler ile tahmin değerleri arasındaki ilişkiyi

değerlendirmek amacı ile kullanılmaktadır. Grafik üzerindeki noktalar kesikli çizgi etrafında yoğunlaşmışsa model genellikle tutarlı tahminler yapmıştır aksi durumda yani noktalar geniş bir alana yayılmışsa modelin tahminlerinde hata yaptığı anlamına gelmektedir.

Tablo 2. Regresyon yöntemleri için hiperparametre optimizasyon arama limitleri [28, 29, 30, 31, 32]

Regresyon Modelleri	Bayes Tekniği ile Optimize Edilmiş Hiperparametreler
CatBoost Regresyonu	Öğrenme oranı (learning rate): [1e-5- 1e-1] Bagging sıcaklığı (bagging temperature): [0-1] Sınır sayısı (border count): [32-255] Derinlik (depth): [3-11] İterasyon sayısı (iteration): [50-200] L ₂ yaprak düzenleme parametre değeri (L ₂ leaf regularization): [1-10]
Destek Vektör Regresyonu	Ceza terimi parametresi (C): [1e-2- 1e2] Epsilon değeri: [1e-3- 1e-1] Kernel: [Lineer- RBF]
Lasso Regresyonu	Düzenleme katsayısı (alpha): [0.01- 10.00] Modelin eğitilmesi için maksimum iterasyon sayısı (max. iter): [100-1000] Tolerans (tol) parametresi: [1e-5- 1e-1]
Karar Ağaçları Regresyonu	Maksimum derinlik (max. depth): [3-21] Her bir yaprak için minimum örneklem sayısı (min. samples leaf): [1-10] Minimum örneklem bölme oranı (min. samples split): [0.1-1.0]
AdaBoost Regresyonu	Öğrenme oranı (learning rate): [1e-5- 1e-1] Temel öğrenici sayısı (n estimators): [50-200]

Tablo 3. Modeller için hesaplanmış en iyi hiperparametreler

Regresyon Modelleri	Modeller için hesaplanmış en iyi hiperparametreler
CatBoost Regresyonu	Öğrenme oranı (learning rate): 0.0955 Bagging sıcaklığı (bagging temperature): 0.0795 Sınır sayısı (border count): 54 Derinlik (depth): 5 İterasyon sayısı (iteration): 176 L2 yaprak düzenleme parametre değeri (L2 leaf regularization): 5.6554
Destek Vektör Regresyonu	Ceza terimi parametresi (C): 0.6593 Epsilon değeri: 0.00001 Kernel: Lineer
Lasso Regresyonu	Düzenleme katsayısı (alpha): 0.01 Modelin eğitilmesi için maksimum iterasyon sayısı (max. iter): 841 Tolerans (tol) parametresi: 0.0949
Karar Ağaçları Regresyonu	Maksimum derinlik (max. depth): 16 Her bir yaprak için minimum örneklem sayısı (min. samples leaf): 2 Minimum örneklem bölme oranı (min. samples split): 0.1
AdaBoost Regresyonu	Öğrenme oranı (learning rate): 0.0299 Temel öğrenici sayısı (n estimators): 200





Eğitim verileri için gerçekleştirilen modeller incelendiğinde tümünde orta değer aralığında (yaklaşık 10-30) verilerin yoğunlaştığı ve bu değer aralığında noktaların çoğunun ideal çizgiye yakın yer aldığı gözlenmektedir. Bu da bu değer aralığında modellerin başarılı olduklarını göstermektedir. Ancak düşük ve yüksek değerlerde değerlerden tahminlerin gerçek sapmış oldukları gözlenmektedir. Bu da modelin bu değer aralıklarını tahmin etme konusunda zorlandığını ve bu bölgelerde hataların artabileceğini göstermektedir.

CatBoost, tahminlerin genel doğruluğu ve gerçek değerlere yakınlığı açısından en iyi performansı göstermiş ve noktaların çoğu ideal doğruya oldukça yakın yerleşmiştir. AdaBoost ve Karar Ağaçları modelleri orta düzeyde performans sergilemişlerdir. Her iki model de belirli aralıklarda iyi uyum sağlamış, ancak bazı tahminlerde büyük sapmalar gerçekleşmiş ve yüksek değerlerde ve bazı düşük değerlerde sapmalar göstermişlerdir. Lasso ve DVR, veri seti üzerindeki tahminlerde daha geniş dağılımlar göstermiş ve ideal doğrudan daha fazla sapmalar sergilemişlerdir.

Makine öğrenimi modellerinde artık değerler ve tahmin değerleri grafiği modelin tahmin ettiği değerler ile gerçek değerler arasındaki farkları analiz ederek modelin doğruluğunu ifade etmektedir. Modelden beklenen artıkların sıfır çizgisine yakın ve rastgele bir dağılım göstermesidir. Şekil 7-11' de modellere ait artık değerler ve tahmin değerleri grafiğinde eğitim ve test verilerinin genel olarak sıfır çizgisine yakın olduğu görülmektedir. CatBoost modelinde artık değerler çoğunlukla ± 2.5 aralığında kümelenmekte olması modelin daha tutarlı tahminler yaptığını göstermektedir. DVR, Karar Ağaçları ve Lasso modellerinde de eğitim ve test verileri için artık değerler sıfır çizgisine yakın yayılım göstermektedir. Ancak bazı büyük sapmalar da mevcuttur. Bu sapmalar modelin bazı durumlarda yüksek hata oranlarına sahip olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 2. CatBoost modeline ait gerçek- tahmin değerleri grafiği



Şekil 3. DVR modeline ait gerçek- tahmin değerleri grafiği



Şekil 4. Lasso modeline ait gerçek- tahmin değerleri grafiği



Şekil 5. Karar Ağaçları modeline ait gerçek- tahmin değerleri grafiği



Şekil 6. AdaBoost modeline ait gerçek- tahmin değerleri grafiği



Şekil 7. CatBoost modeli için eğitim ve test verilerine ait artık değerler grafiği



Şekil 8. DVR modeli için eğitim ve test verilerine ait artık değerler grafiği



Şekil 9. Lasso modeli için eğitim ve test verilerine ait artık değerler grafiği



Şekil 10. Karar Ağaçları modeli için eğitim ve test verilerine ait artık değerler grafiği



Şekil 11. AdaBoost modeli için eğitim ve test verilerine ait artık değerler grafiği
Makine öğrenme uygulamalarında önem dereceleri her bir özelliğin hedef değişkene olan etkisinin gücünü ve önemini ifade etmektedir. Şekil 12-14'te özellik önem grafiği oluşturulabilen modellere ait grafikler verilmiştir.

CatBoost, Karar Ağaçları ve AdaBoost'a ait özellik önem grafikleri incelendiğinde model tahminlerinde özellik-5 (Konut başına ortalama oda sayısı) ve özellik-12'nin (Düşük statüye sahip nüfus yüzdesi) en yüksek öneme sahip olduğu görülmektedir. Modeller bu özellikleri diğer özelliklere kıyasla hedef değişkeni tahmin etmede daha fazla kullanıyor anlamına gelmektedir. Modellerin karar sürecinde daha az etkili olan özellik-2 (2350 m²'den büyük arsalara sahip konut alanının oranı) ve özellik-11'in (kasabadaki siyahi nüfus oranını içeren bir ölçüt) öneminin daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 12. CatBoost modeline ait seçilen özelliklerin önem grafiği



Şekil 13. Karar Ağaçları modeline ait seçilen özelliklerin önem grafiği



Şekil 14. AdaBoost modeline ait seçilen özelliklerin önem grafiği

Hiperparametre optimizasyonu, makine öğrenimi modellerinde performansı en üst düzeye çıkarmak amacı ile en uygun hiperparametre değerlerini belirleme sürecidir. Şekil 15-19'da verilen grafikler hiperparametre kombinasyonlarının her bir iterasyonda test edilmesiyle elde edilen hata değerlerini göstermektedir.

Bu optimizasyon grafiklerine göre CatBoost ve AdaBoost modellerinde dalgalanmalar olmasına rağmen diğer modellere kıyasla düşük hata seviyelerinde olduğunu ve hiperparametrelerin etkin bir şekilde optimize edildiğini göstermektedir. DVR ise tutarlılık göstermesine karşın daha yüksek hata seviyesi ile diğer modellerden daha zayıf bir performans sergilemiştir.



Şekil 15. CatBoost modeline ait hiperparametre optimizasyon hata değerleri grafiği



Şekil 16. DVR modeline ait hiperparametre optimizasyon hata değerleri grafiği



Şekil 17. Lasso modeline ait hiperparametre optimizasyon hata değerleri grafiği



Şekil 18. Karar Ağaçları modeline ait hiperparametre optimizasyon hata değerleri grafiği



Şekil 19. AdaBoost modeline ait hiperparametre optimizasyon hata değerleri grafiği

Hiperparametre optimizasyonu süresi, modelin etkili kullanımı açısından önemli bir faktördür. Uzun süreli optimizasyonlar büyük veri setlerinde modelin kullanılabilirliğini etkilemektedir. Şekil 20' de eğitim verileri için gerçekleştirilen analizde kullanılan regresyon modellerine ait hiperparametre optimizasyon süreleri bulunmaktadır. Şekil incelendiğinde DVR modelinin en uzun optimizasyon süresine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 20. Kullanılan modellere ait hiperparametre optimizasyon süreleri

Eğitim ve test olarak ayrılan veriler için kullanılan her regresyon modeline ait hata metriklerinin karşılaştırılması Tablo 4'de verilmiştir. Hem eğitim hem de test veri setleri için karesel ortalama hatasında (MSE) daha düşük değer elde ederek en başarılı model CatBoost iken, en yüksek hata oranı ile başarısız olan model ise DVR modelidir. Ortalama mutlak hata (MAE), en düşük hata oranı ile CatBoost modeline ait iken Lasso ve yine DVR modeli en yüksek hata oranı ile diğer modellere kıyasla zayıf performans sergilemektedirler. R² değerlerinde 1'e yakınlığı ile CatBoost modelinin hem eğitim hem de test veri setindeki performansının oldukça güçlü olduğu görülmektedir. Buna karşılık DVR modeli ise 1 değerinden en uzak değeri elde etmesi sebebi ile en düşük başarıyı sergilemektedir. Ortalama mutlak yüzdesel hata (MAPE) değerlerinde CatBoost en düşük yüzde hata oranına sahiptir. Bu hata oranı tahmin edilen değerlerin gerçek değerlere yüzde bazında oldukça yakın olduğunu göstermektedir. Fiyata bağlı fark oranı (PRD) değerlerinde CatBoost modelinin hem eğitim hem de test veri setindeki değerinin 1'e yakınlığı ile test setinde en iyi doğruluğu sağlayan modeldir. En düşük COD değerlerine sahip olan CatBoost'un hem eğitim hem de test verilerinde en iyi performansı göstererek en tutarlı ve güvenilir tahminleri ürettiği görülmektedir.

Tablo 4. Kullanılan regresyon modelleri için hata metrikleri

Model	Karar Ağaçları	CatBoost	DVR	AdaBoost	Lasso
Eğitim- MSE	9.25689	2.16538	25.57186	8.74242	22.84782
Test- MSE	13.91379	8.00561	21.97877	12.04399	21.09454
Eğitim- MAE	2.11411	1.14457	3.15629	2.32317	3.29109
Test- MAE	2.51355	1.94250	3.13806	2.50424	3.38462
Eğitim- R ²	0.89027	0.97433	0.69686	0.89636	0.72915
Test- R ²	0.83468	0.90488	0.73885	0.85689	0.74936
Eğitim- MAPE	0.11248	0.06040	0.15546	0.13017	0.16631
Test- MAPE	0.12750	0.08882	0.14458	0.12772	0.15712
Eğitim- PRD	1.02448	1.01203	0.99570	1.04990	1.03650
Test- PRD	1.03786	1.00077	0.93858	1.03773	0.98178
Eğitim- COD	5.96330	4.31963	20.21973	6.78529	19.82453
Test- COD	6.87365	5.16742	19.01744	7.36941	19.10098

Hiperparametre optimizasyonu eğitim verisi üzerinde gerçekleştirilmiş olmasına rağmen, daha önce kullanılmamış test verileriyle yapılan değerlendirmelerle elde edilen hata metriklerinin de modellerin yüksek genelleme kabiliyetine ve tutarlı performansa sahip olduğunu göstermektedir. Analizde kullanılan beş regresyon modeli arasında CatBoost hem eğitim hem de test veri setlerinde düşük hata metrikleriyle en başarılı model olarak öne çıkmaktadır. MSE, MAE, R², MAPE, COD ve PRD değerlerinde CatBoost'un güçlü performansı, modelin yüksek genelleme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir.

4 Sonuçlar

Taşınmaz değerleme sürecinde kullanılan parametrelerin doğru ve tutarlı bir şekilde değerlendirilebilmesi için makine öğrenme modelleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışma, literatürde yaygın olarak kullanılan farklı makine öğrenme modellerinin yanı sıra modern yöntemlerden olan CatBoost algoritmasını da kullanarak taşınmaz değerleme süreçlerinde daha doğru ve etkili sonuçlar elde etmeyi hedeflemiştir. Çalışma güncel modellerden olan CatBoost regresyonu modelini kullanarak ve hata metriklerini detaylı analiz etmesi ile literatürden farklılaşmaktadır.

Analizler sonucunda CatBoost modeli eğitim ve test veri setlerinde en düşük hata oranları ve en yüksek doğruluk doğruluk değerleri elde edilmiştir. CatBoost regresyonunda eğitim ve test verilerinde R² (0,97/0,90) ve PRD (1,01/1,00) değerleri 1'e en yakın ve MSE (2,16/8,00), MAE (1,14/1,94), MAPE (0,06/0,08) ve COD (4,31/5,16) değerleri için 0'a en yakın sonuçları sağlamaktadır. Bu durumda elde edilen eğitim ve test verileri sonuçlarına göre optimize edilmiş CatBoost regresyonu en başarılı sonuçlara ulaşmıştır. Destek vektör regresyonunda ise eğitim ve test verilerinde R² (0,69/0,73) ve PRD (0,99/0,93) değerleri 1'e ve MSE (25,57/21,97), MAE (3,15/3,13), MAPE (0,15/0,14) ve COD (20,21/19,01) değerleri 0'a en uzak sonuçları sağlamaktadır. Bu durumda DVR elde edilen eğitim ve test verisi sonuçlarına göre en düşük sonuçları elde etmiştir.

Çalışmanın bulguları hiperparametre optimizasyonunun CatBoost algoritması üzerindeki olumlu etkisini doğrulamakta ve literatürdeki diğer çalışmalardan elde edilen sonuçlarla uyum göstermektedir. Literatürle yapılan karşılaştırmalar CatBoost'un geleneksel regresyon yöntemlerine kıyasla daha başarılı olduğunu ve taşınmaz değerleme sürecinde tercih edilmesi gereken modellerden biri olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak CatBoost algoritmasının daha etkin çalıştığı, kategorik değişkenleri ön işlemeye gerek kalmadan doğrudan isleyebildiği, asırı öğrenmeye karsı direnc gösterdiği, diğer birçok makine öğrenme yöntemlerine kıyasla daha hızlı olduğu hem eğitim hem test verisi üzerinde tutarlı sonuçlar üreterek genelleme gücünün yüksek olduğu ve hiperparametre optimizasyonu sayesinde model performansını artırdığı gözlemlenmiştir. Bu özellikleriyle CatBoost taşınmaz değerleme sürecinde daha güvenilir ve hassas tahminler sunarak diğer yöntemlere kıyasla üstün performans sergilemektedir. Ayrıca CatBoost'un farklı veri setleri ve coğrafi bölgelerde benzer doğruluk sağlayabileceği öngörülmektedir. Modelin sahip olduğu güçlü genelleme kabiliyeti farklı taşınmaz değerleme uygulamalarında ve farklı ölçeklerde kullanılabilirliğini desteklemektedir. Ancak, model performansının farklı veri yapıları ve bölgesel değişkenlere bağlı olarak değişebileceği göz önünde bulundurularak modelin parametre ayarlarının bölgesel ihtiyaçlara göre optimize edilmesi gerekmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

- [1] B. Demirel, A. Yelek, H. M. Alağaş ve T. Eren, Taşınmaz değerleme kriterlerinin belirlenmesi ve kriterlerin önem derecelerinin çok ölçütlü karar verme yöntemi ile hesaplanması, Kırıkkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 8 (2), 665-682,2018.
- [2] S. Yalpır, "Enhancement of parcel valuation with adaptive artificial neural network modeling," Artificial Intelligence Review, cilt 49, ss. 393–405, 2018.

- [3] P. Çakır ve F. A. Sesli, Arsa vasıflı taşınmazların değerine etki eden faktörlerin ve bu faktörlerin önem sıralarının belirlenmesi. Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi, 5(3), 1-16, 2013.
- [4] M. Türkan, A. Bozdağ, A. E. Karkınlı ve A. G. Ulucan, Kent ölçeğinde konutlara ilişkin toplu değer değişiminin makine öğrenim algoritmaları ile analizi. Türkiye Arazi Yönetimi Dergisi, 5(2), 66-77, 2023. https://doi.org/10.51765/tayod.1275671
- [5] N. Chuhan, House price prediction based on different models of machine learning, Applied and Computational Engineering, 49, 47-57, 2024. https://doi.org/10.54254/2755-2721/49/20241058
- [6] A. Hazer, A. Bozdağ ve Ü. H. Atasever, Hiper-optimize edilmiş makine öğrenim teknikleri ile taşınmaz değerlemesi, Yozgat Kenti örneği, Geomatik, 9(3), 299-312, 2024. https://doi.org/10.29128/geomatik.1454915

https://doi.org/10.29128/geomatik.1454915

- [7] W. Yijia and Z. Qiaotong, House price prediction based on machine learning: A Case of King County, Proceedings of the 2022 7th International Conference on Financial Innovation and Economic Development, Atlantis Press, pp. 1547-1555, 2022.
- [8] K. Baur, M. Rosenfelder, B. Lutz, Automated real estate valuation with machine learning models using property descriptions, Expert Systems with Applications, Vol 213, Part C, 119147, 2023. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119147
- [9] M. Hernes, P. Tutak, M. Nadolny, A. Mazurek, Real estate valuation using machine learning, Procedia Computer Science, Vol 246, Pages 4592-4599, 2024. https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.09.323
- [10] P. Jafary, D. Shojaei, A. Rajabifard, T. Ngo, Automated land valuation models: A comparative study of four machine learning and deep learning methods based on a comprehensive range of influential factors, Cities, Vol 151, 105115, 2024. https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105115
- [11] K. Konhauser, T. Werner, Uncovering the financial impact of energy-efficient building characteristics with eXplainable artificial intelligence, Applied Energy, Vol 374, 123960, 2024. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123960

[12] U. Grzybowska, H. Dudek, A. Wojewódzka-Wiewiórska, Socioeconomic factors associated with household overcrowding in the Visegrad Group countries – analysis based on machine learning approach, Procedia Computer Science, Vol 246, Pages 4441-4450, 2024. https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.09.294

- [13] Kalliola, J., Kapočiūtė-Dzikienė, J., and Damaševičius, R., Neural network hyperparameter optimization for prediction of real estate prices in Helsinki, PeerJ computer science, 7, 444, 2021.
- [14] A. Ç. Aydınoğlu ve R. Bovkır, İ. Çölkesen, Toplu taşınmaz değerlemede makine öğrenme algoritmalarının kullanımı ve konumsal/konumsal olmayan özniteliklerin tahmin doğruluğuna etkilerinin

karşılaştırılması, Journal of Geodesy and Geoinformation, Vol. 10, 63-83, 2023.

- [15] Boston şehrine ait veri seti. https://www.kaggle.com/datasets/schirmerchad/boston houstingmlnd
- [16] A. Coşkuner, Gayrimenkul Yatırım Ortaklıklarında Kârlılık Belirleyicilerinin Veri Madenciliği Yöntemleri İle Tahminlemesi, Ankara, 2024.
- [17] A. Dorogush, V. Ershov, A. Gulin, CatBoost: gradient boosting with categorical features support, 2018. https://doi.org/10.48550/arXiv.1810.11363
- [18] L. Prokhorenkova, G. Gusev, A. Vorobev, A.V. Dorogush and A. Gulin, CatBoost: unbiased boosting with categorical features, Proceedings of the 32nd International Conference on Neural Information Processing Systems, Curran Associates Inc., pp. 6639– 6649, Montréal, Canada, 2018.
- [19] H. Nasiri, A. Tohry and H. R. Heidari, Modeling industrial hydrocyclone operational variables by SHAP-CatBoost - A "conscious lab" approach, Powder Technology, 420, 2023. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118416
- [20] C. Cortes, V. Vapnik, Support-Vector Networks, Machine Learning, 20, 273-297, 1995. https://doi.org/10.1007/BF00994018
- [21] A.J. Smola, B. Schölkopf, A tutorial on support vector regression, Statistics and Computing, 14, 199– 222,(2004). https://doi.org/10.1023/B:STCO.0000035301.49549.8 8
- [22] G. James, D. Witten, T. Hastie and R. Tibshirani, An Introduction to Statistical Learning, 2013.
- [23] M. Apaydın, M. Yumuş, A. Değirmenci, ve Ö. Karal, Evaluation of air temperature with machine learning regression methods using Seoul City meteorological data, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28 (5),737–747, 2022.

- [24] S. Rosset, H. Zou, T. Hastie, Multi-class AdaBoost, Statistics and its interface, 2(3), 2006. https://doi.org/10.4310/SII.2009.v2.n3.a8
- [25] T. T. Joy, S. Rana, S. Gupta and S. Venkatesh, Hyperparameter tuning for big data using Bayesian optimization, 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 2574-2579, 2016.
- [26] Feurer, M., Springenberg, J., ve Hutter, F., Initializing bayesian hyperparameter optimization via metalearning, In Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, Vol. 29, No. 1, 2015.
- [27] M. Khosravi, S. B. Arif, A. Ghaseminejad, H. Tohidi, H. Shabanian, Performance evaluation of machine learning regressors for estimating, Real Estate House Prices. Preprints 2022. https://doi.org/10.20944/preprints202209.0341.v1
- [28] A. Anghel, N. Papandreou, T. P. A. de Palma and H. Pozidis, Benchmarking and optimization of gradient boosting decision tree algorithms, Workshop on Systems for ML and Open Source Software at NeurIPS, Canada, 2018. https://doi.org/10.48550/arXiv.1809.04559
- [29] L. Yang and A. Shami, On hyperparameter optimization of machine learning algorithms: theory and practice, Neurocomputing, 2022. https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.15745
- [30] K. Šehić, A. Gramfort, J. Salmon and L. Nardi, LassoBench: A high-dimensional hyperparameter optimization benchmark suite for lasso, AutoML Conference,2022. https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.02790
- [31] A. Duran ve H. Bakır, Hiperparametreleri ayarlanmış makine öğrenimi algoritmalarını kullanarak android sistemlerde kötü amaçlı yazılım tespiti, USBTU 2(1):
- 1-19, 2023.[32] R. Gao and Z. Liu, An Improved adaboost algorithm for hyperparameter optimization, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1631, 2020.



NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 680-687 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



Fırçasız doğru akım motorların adaptif filtre tabanlı MRAS ile hız algılayıcısız doğrudan moment kontrolü

Speed sensorless direct torque control of brushless direct current motors with adaptive filter based MRAS

Canberk Tuzcu¹, Engin Cemal Mengüç^{2*}, Rıdvan Demir³, Remzi İnan⁴

^{1,2,3}Kayseri Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38280, Kayseri, Türkiye
⁴Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

Öz

Bu çalışma, kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motoru (SMFDAM) sürücüsünde gereken rotor hızını tahmin etmek için en küçük ortalama kare (Least mean square, LMS), en küçük ortalama kurtosis (LMK) ve en küçük ortalama dördüncü (Least mean fourth, LMF) yaklaşımlarına dayalı model referanslı adaptif sistem (Model reference adaptive system, MRAS) tahmin edicilerini tanıtmaktadır. Önerilen MRAS tahmin edicileri, referans modeli olarak hizmet eden ölcülen stator akımları ile adaptif modelin çıkışında üretilen stator akımları arasındaki hata terimini minimize ederek rotor hızını doğrudan kestirmektedir. Ayrıca, rotor hızını kapsayan ağırlık vektörleri üç tahmin edicide de her örnekleme adımında adaptif olarak güncellendiğinden, geleneksel MRAS çerçevelerinde yaygın olarak kullanılan sabit kazançlı orantılı-integral bir denetleyiciye olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır. Önerilen tahmin edicilerin başarımları, zorlu çalışma senaryoları altında doğrudan moment kontrolü (DMK) tabanlı bir SMFDAM sürücüsü aracılığıyla değerlendirilmiştir. Benzetim sonuçları, önerilen kestiricilerin başarımlarının birbirlerine alternatif olduğunu göstermiştir. Özellikle, hız kestiriminde LMF tabanlı MRAS yapısı diğer MRAS yapılarından bir miktar daha iyi başarım sağlarken, 3-faz stator akım kestiriminde LMS ve LMK tabanlı MRAS yapıları daha iyi başarımlar sağlamıştır.

Anahtar kelimeler: SMFDAM, DMK, En küçük ortalama kare, En küçük ortalama kurtosis, En küçük ortalama dördüncü, Model referans adaptif sistem.

1 Giriş

Sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım motorları (SMFDAM), yüksek verimli olmaları ve bakım gerektirmemeleri ile birlikte düşük boyutlarına rağmen yüksek yük momenti kabiliyetine sahip olmaları nedeniyle elektrikli araç teknolojilerindeki gelişime paralel olarak hızla artan kullanım alanı bulmaktadır. Ulaşım ve taşıma alanındaki kullanımından ziyade havacılık ve savunma sektörlerinde de sahip oldukları özellikleri nedeni ile çoğunlukla kullanılmaktadır. Bununla birlikte literatürde ve

Abstract

This study introduces model reference adaptive system (MRAS) estimators based on least mean square (LMS), least mean kurtosis (LMK), and least mean fourth (LMF) approaches for estimating the rotor speed required in a permanent magnet brushless direct current motor (SMFDAM) drive. The proposed MRAS estimators directly estimate the rotor speed by minimizing the error term between the measured stator currents, serving as the reference model, and the stator currents generated at the adaptive model's output. Additionally, since the weight vectors, which encapsulate rotor speed, are updated adaptively at each sampling step in all three estimators, the necessity for a fixed-gain proportional-integral controller commonly employed in conventional MRAS frameworks is removed. The performances of the proposed estimators are assessed through a direct torque control (DTC)-based SMFDAM drive under demanding operating scenarios. Simulation results show that the performances of the proposed estimators are alternative to each other. In particular, while the LMF-based MRAS structure performs slightly better than the other MRAS structures in speed estimation, the LMS and LMK-based MRAS structures provide better performances in 3-phase stator current estimation.

Keywords: PMBLDC, DTC, Least mean square, Least mean kurtosis, Least mean fourth, Model reference adaptive system.

endüstride SMFDAM'lerin verimli ve yüksek başarımlı kontrolüne yönelik çalışmalar hala devam etmektedir.

SMFDAM sürücülerinde alan yönlendirmeli kontrol (AYK) [1], [2], [3], [4] doğrudan moment kontrol (DMK) [5], [6], [7], [8] ve model öngörülü kontrol (MÖK) [9] gibi yüksek başarımlı kontrol yöntemleri kullanılmaktadır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde; Rekioua vd. (1990) [1], SMFDAM'lerin alan yönlendirmeli kontrolünü (AYK) gerçekleştirmiş ve yüksüz durumdaki hız ve akım değerlerinde önemli iyileştirmeler sağlandığını göstermiştir.

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: enginmenguc@kayseri.edu.tr (E.C. Mengüç) Geliş / Received: 14.02.2025 Kabul / Accepted: 14.03.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngumuh.1639562

Gujjar ve Kumar (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada [2], AYK yönteminin SMFDAM'ler üzerindeki başarımı analiz edilmiştir. Bu bağlamda, sinüzoidal darbe genliği modülasyonu (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM) ve uzay vektör darbe genliği modülasyonu (Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM) teknikleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında geliştirilen AYK sistemi MATLAB Simulink ortamında test edilmiş ve SVPWM yönteminin, SPWM yöntemine kıyasla daha üstün bir başarım sergilediği sonucuna ulaşılmıştır. Irimia vd. (2019) [3], es-zamanlı sinüzoidal modülasyon (Synchronous sinusoidal modulation, SSM) ile uzay vektör modülasyonunu (Space vector modulation, SVM) karşılaştırmış ve önerilen yöntemlerin kontrol başarımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Islam vd. (2017) [4]'te yer alan çalışmada ise, SVPWM yöntemi kullanılarak bir SMFDAM'nin akım ve hız algılayıcılı AYK'sı gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, kontrol yöntemi olarak oransal-integral (Proportional-Integral, PI) kontrolcü yapısı kullanılmış ve elde edilen sonuçlar, bu yöntemin iyi bir tepki süresi sağladığını ortaya koymuştur. Noroozi vd. (2012) [5] SMFDAM'lerin DMK'sı üzerine bir çalışma ise, yapmışlardır. Çalışmada, iki fazlı ve üç fazlı iletim incelenmiştir. modlarının ayrıntıları Motorun, MATLAB/Simulink ortamında on iki gerilim vektörü kullanılarak kontrol edilmesi hedeflenmis ve önerilen kontrol vönteminin basarımı benzetim ortamında test edilmiştir. İnan ve Üzüm (2022) [6], SMFDAM'ler için hız algılayıcısız DMK tabanlı bir sürücü önermistir. Önerilen DMK tabanlı sürücü sistemi ile moment dalgalanmalarına karşı kararlı bir kontrol yapısı elde edilmiştir.

SMFDAM'lerin yüksek başarımlı kontrolü için, kontrol sistemleri (AYK, DMK vb.) motorun hız ve konum bilgisine ihtiyaç duymaktadır. Bu bilgiler ya hız ve konum algılayıcılar tarafından ölçülerek ya da kestirici/gözlemleyici algoritmaları aracılığı ile kestirilerek elde edilirler. Bu bilgilerin algılayıcı kullanımı ile elde edilmesi donanım karmaşıklığını ve maliyeti artırmaktadır. Literatürde SMFDAM'ların durum ve parametre kestirimi için genişletilmiş Kalman filtresi (GKF) [6], [10], adaptif gözlemleyici [8], yapay sinir ağları tabanlı kestirici [11], kayma kipli gözlemleyici [7] ve model referans adaptif sistem (Model reference adaptive system, MRAS) [12] gibi algoritmalar önerilmiştir. Bu çalışmalardan İnan ve Üzüm (2022) [6]'da bir SMFDAM'nin üç-faz stator akımları, konum, rotor hızı ve yük momenti kestirimleri, Kettle ve Murray [15]'te ise rotor konumu ve rotor hızı kestirimleri GKF ile gerceklestirilmistir. Saha vd. (2025) [8], SMFDAM'nin rotor hızı ve rotor konumu kestirimleri için adaptif gözlemleyici önermişlerdir. Gamazo-Real vd. (2022) [11]'de yapay sinir ağı temelli konum ve hız kestiricisi sunulmuştur. Kaf vd. (2024) [7]'de ise kayma kipli gözlemleyici ile SMFDAM'nin zıt-elektromotor kuvvetleri (EMK) kestirilmiş ve bu zıt-EMK'lar kullanılarak konum ve rotor hızı elde edilmiştir. Joshi vd. (2014) [12]'de stator akım tabanlı MRAS yapıları ile rotor hızı ve rotor konumu kestirimi gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, son yıllarda elektrik motorları için adaptif filtre tabanlı MRAS hız kestiricileri literatüre tanıtılmıştır [13], [14], [15], [16]. Bu

çalışmalardan Demir (2023) [13]'te sürekli mıknatıslı senkron motorların hız kestirimi en küçük ortalama kare (Least mean square, LMS) ve en küçük ortalama kurtosis (Least mean kurtosis, LMK) tabanlı MRAS ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca asenkron motorların hız kestirimi, Zerdali ve Mengüç (2019) [14]'te kompleksdeğerli LMS ve LMK tabanlı MRAS ile, Demir vd. (2023) [15]'te LMS tabanlı MRAS ile, Yıldız vd. (2023) [16]'da ise LMK tabanlı MRAS ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda adaptif filtre tabanlı MRAS hız kestiricilerinin, geleneksel PI denetleyici kullanan MRAS hız kestiricilerine kıyasla daha yüksek başarıma sahip olduğu gösterilmiştir.

Bu çalışmada, FDFDAM sürücüsü için gerekli olan hız bilgisinin kestirimi için LMS, LMK ve en küçük ortalama (Least mean fourth, LMF) tabanlı MRAS kestiricileri önerilmiştir. Önerilen MRAS kestiricileri, referans model olarak adlandırılan ölçülen stator akımları ile adaptif modelin çıkışındaki stator akımları arasındaki hatayı hesaba katarak SMFDAM'nin rotor hızını doğrudan kestirmiştir. Dahası, hem LMS tabanlı, hem LMK tabanlı hem de LMF tabanlı MRAS kestiricilerindeki rotor hızını içeren ağırlık vektörleri her bir örneklemede adaptif olarak güncellendiğinden, önerilen kestiriciler geleneksel MRAS yapılarında sıklıkla kullanılan sabit kazançlı bir PI denetleyiciye olan ihtiyacı ortadan kaldırmıştır. Önerilen kestiricilerin başarımı zorlayıcı senaryolar altında DTC tabanlı SMFDAM sürücüsü ile test edilmis ve doğrulanmıştır. Sonuç olarak, bu çalışmanın temel katkısı, adaptif filtre tabanlı MRAS hız kestiricilerini kullanan hızalgılayıcısız DMK tabanlı SMFDAM sürücüsünün tasarımı ve benzetim temelli doğrulanması olarak ifade edilebilir.

Bu makalenin geri kalan kısmı şu şekildedir. Bölüm 2'de SMFDAM modeli ve adaptif filtre tabanlı MRAS hız kestiricileri detaylı olarak sunulmuştur. Bölüm 3'te adaptif filtre tabanlı MRAS hız kestiricilerinin kestirim başarımlarına ait benzetim sonuçları verilmiştir. Son olarak Bölüm 4'te makalenin sonuç kısmına yer verilmiştir.

2 SMFDAM modeli ve adaptif filtre tabanlı MRAS hız kestiricileri

2.1 SMFDAM modeli

SMFDAM'nin 3-faz stator akım eşitlikleri ve mekanik hareket eşitliği aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\frac{di_{sa}}{dt} = -\frac{R_s}{L_{ls}}i_{sa} + \frac{1}{L_{ls}}v_{sa} - \frac{1}{L_{ls}}E_a$$
(1)

$$\frac{di_{sb}}{dt} = -\frac{R_s}{L_{ls}}i_{sb} + \frac{1}{L_{ls}}v_{sb} - \frac{1}{L_{ls}}E_b$$
(2)

$$\frac{di_{sc}}{dt} = -\frac{R_s}{L_{ls}}i_{sc} + \frac{1}{L_{ls}}v_{sc} - \frac{1}{L_{ls}}E_c$$
(3)

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{\tau_e}{J_t} - \frac{B_t}{J_t} \omega_m - \frac{\tau_l}{J_t}$$
(4)

$$\tau_e = (\varphi_{ra}i_{sa} + \varphi_{rb}i_{sb} + \varphi_{rc}i_{sc})p_p \tag{5}$$

Burada v_{sa} , v_{sb} ve v_{sc} 3-faz stator gerilimlerini i_{sa} , i_{sb} ve i_{sc} 3-faz stator akımlarını R_s ve L_{ls} stator direncini ve stator kaçak indüktansını E_a , E_b ve E_c 3-faz stator zıt-EMK değerlerini, ω_m rotor mekanik hızını τ_e ve τ_l sırasıyla indüklenen moment ve yük momentini B_t ve J_t sırasıyla motor ve yükün toplam eylemsizliğini ve viskoz sürtünme terimini, p_p kutup çifti sayısını φ_{ra} , φ_{rb} ve φ_{rc} ise rotor akılarını temsil etmektedir.

3-faz stator zıt-EMK değerleri motorun hızına, rotor elektriksel konum bilgisine (θ_e 'ye) ve rotordaki manyetik akıya (λ_m 'ye) bağlıdır. 3-faz stator zıt-EMK'ları motor tipine bağlı olarak sinüzoidal veya trapezoidal olabilirler. Eğer zıt-EMK'lar trapezoidal ise 3-faz zıt-EMK değerleri aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$E_a = p_p \omega_m \lambda_m f(\theta_e) = p_p \omega_m \varphi_{ra}$$
(6)

$$E_b = p_p \omega_m \cdot \lambda_m \cdot f\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) = p_p \omega_m \varphi_{rb}$$
(7)

$$E_c = p_p \omega_m \cdot \lambda_m \cdot f\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) = p_p \omega_m \varphi_{rc}.$$
 (8)

2.2 Adaptif filtre tabanlı MRAS hız kestiricileri

Bu bölümde, LMS, LMF ve LMK adaptif filtre tabanlı MRAS kestiricileri tasarımı gerçekleştirilecektir. Bilindiği üzere, stator akımları, yani referans model çıktıları ile stator akımı modelinden elde edilen kestirilmiş akımlar, yani adaptif model çıktıları arasındaki karşılaştırmaya dayanan bir sistemdir. Stator akımı tabanlı MRAS kestiricisinin blok şeması Şekil 1'de gösterilmiştir. İlgili kestiricinin gerçekzamanlı olarak bir DSP ortamında çalıştırılabilmesi için adaptif model olarak ifade edilen stator akım denklemlerinin (Denklemleri (1)-(3)) sürekli-zamanlıdan ayrık-zamanlı hale getirilmesi gerekir. Bu kapsamda, Denklem (1)-(3) ilk olarak ileri Euler yaklaşımıyla aşağıdaki gibi ayrıklaştırılır:



Şekil 1. Adaptif filtre algoritması kullanan stator akım tabanlı MRAS kestiricisi

$$i_{sa,k+1}^{a} = \left(1 - \frac{TR_{s}}{L_{ls}}\right)i_{sa,k} - \omega_{m,k}\frac{p_{p}T\varphi_{ra,k}}{L_{ls}} + \frac{TV_{sa}}{L_{ls}}$$
(9)

$$i_{sb,k+1}^{a} = \left(1 - \frac{TR_{s}}{L_{ls}}\right)i_{sb,k} - \omega_{m,k}\frac{p_{p}T\varphi_{rb,k}}{L_{ls}} + \frac{TV_{sb}}{L_{ls}}$$
(10)

$$i_{sc,k+1}^{a} = \left(1 - \frac{TR_{s}}{L_{ls}}\right) i_{sc,k} - \omega_{m,k} \frac{p_{p} T\varphi_{rc,k}}{L_{ls}} + \frac{TV_{sc}}{L_{ls}}.$$
 (11)

Ardından, Denklem (9)-(11), adaptif modelin çıkışı olarak aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\mathbf{i}_{s,k+1}^a = \mathbf{x}_k^T \mathbf{w}_k \tag{12}$$

burada \mathbf{x}_k ve \mathbf{w}_k sırasıyla giriş matrisini ve adaptif modelin ağırlık vektörünü temsil eder ve bu iki nicelik şu şekilde tanımlanır:

$$\mathbf{x}_{k} = \begin{bmatrix} \frac{i_{sa,k}}{-p_{p}T\varphi_{ra,k}} & \frac{i_{sb,k}}{-p_{p}T\varphi_{rb,k}} & \frac{i_{sc,k}}{L_{s}} \\ \frac{-p_{p}T\varphi_{ra,k}}{v_{sa,k}} & \frac{-p_{p}T\varphi_{rc,k}}{L_{s}} \end{bmatrix}$$
(13)
$$\mathbf{w}_{k} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{TR_{s}}{L_{s}} \\ \omega_{m,k} \\ \frac{T}{L_{s}} \end{bmatrix}.$$
(14)

Böylece, referans ve adaptif model çıkışları arasındaki farkı ölçen hata sinyali aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}} = \mathbf{i}_{s,k}^r - \mathbf{i}_{s,k}^a. \tag{15}$$

Ardından, Denklem (15) kullanılarak, bu çalışma kapsamında üç farklı maliyet fonksiyonu sırasıyla LMS, LMF ve LMK algoritmalarını türetmek için aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$J_k^{LMS} = \frac{1}{2} E\{\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}^T \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}\}$$
(16)

$$J_k^{LMF} = E\{\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}^T \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}} \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}^T \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}\}$$
(17)

$$J_{k}^{LMK} = 3E^{2} \left\{ \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}^{T} \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}} \right\} - E \left\{ \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}^{T} \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}} \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}^{T} \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}} \right\}$$
(18)

burada $E\{.\}$ ifadesi beklenen değeri temsil etmektedir.

Denklem (16), (17) ve (18), adaptif modelin ağırlık vektörü \mathbf{w}_k 'ya göre minimize edilirse, sırasıyla LMS [17], LMF [18] ve LMK [19] algoritmalarına ait güncelleme kuralları aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k + \mu_{LMS} \mathbf{x}_k \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{S,k}} \tag{19}$$

$$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k + \mu_{LMF} \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}^T \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}} \mathbf{x}_k \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}$$
(20)

$$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k + \mu_{LMK} (3\sigma_{e_k}^2 - \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}^T \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}) \mathbf{x}_k \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}$$
(21)

burada μ_{LMS} , μ_{LMF} ve μ_{LMK} ifadeleri sırasıyla LMS, LMF ve LMK algoritmalarının adım büyüklüklerini temsil ederken, $\sigma_{e_k}^2 = E\left\{\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}^T \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}\right\}$ ifadesi hata sinyalinin varyansını temsil eder ve aşağıdaki özyinelemeli denklem vasıtasıyla hesaplanır [19]:

$$\sigma_{e_k}^2 = \lambda \sigma_{e_{k-1}}^2 + \boldsymbol{e}_{i_{s,k}}^T \boldsymbol{e}_{i_{s,k}}$$
(22)

burada $\lambda \in [0,1)$ unutma faktörüdür.

Ayrıca, LMS, LMF ve LMK algoritmalarının kararlı bir şekilde çalıştırılabilmesi için adım büyüklüğü parametreleri μ_{LMS} , μ_{LMF} ve μ_{LMK} 'nın sırasıyla aşağıda verilen sınırlar içerisinde sabit bir şekilde seçilmesi gerekir [18], [20], [21], [22]:

$$0 < \mu_{LMS} < \frac{2}{\lambda_{\max}(\mathbf{R})}$$
(23)

$$0 < \mu_{LMF} < \frac{2}{6\sigma^2 \lambda_{\max}(\mathbf{R})}$$
(24)

$$0 < \mu_{LMK} < \frac{1}{4.5\sigma^2 \lambda_{\max}(\mathbf{R}) \left(\frac{\lambda^3 + \lambda^2 - 4\lambda + 8}{-\lambda^3 - 2\lambda^2 + \lambda + 2}\right)}$$
(25)

burada $\lambda_{\max}(\cdot)$ ve σ^2 ifadeleri sırasıyla otokorelasyon matrisi $\mathbf{R} = E\{\mathbf{x}_k \mathbf{x}_k^T\}$ 'nin maksimum özdeğerini ve ölçüm gürültüsünün varyansını temsil etmektedir.

3 Benzetim sonuçları

Şekil 1'de gösterilen adaptif filtre tabanlı MRAS hız kestiricilerinin kestirim başarımı ile bu kestirim algoritmalarını kullanan ve blok şeması Şekil 2'de verilen hız-algılayıcısız DMK'lı SMFDAM sürücüsünün kontrol başarımı MATLAB/Simulink'te oluşturulan benzetim çalışmaları ile test edilmiş ve doğrulanmıştır. Benzetim çalışmalarında kullanılan SMFDAM'ye ait parametreler Tablo 1'de verilmiştir. Algoritmalara ait parametreler ise $\mu_{LMS} = 0.5$, $\mu_{LMF} = 10$, $\mu_{LMK} = 0.2$ ve $\lambda = 0.995$ olarak kurulmuştur.



Şekil 2. Hız-algılayıcısız DMK tabanlı FDAM sürücüsü

Tablo 1. FDAM paremet	eleri.
-----------------------	--------

Doğru Akım Güç Kaynağı	V	72
Nominal hızı	rpm	750
Nominal Torku	N.m	21
Eylemsizlik Momenti	$kg.m^2$	0.0073
Faz Ters-EMK Katsayısı	V _{peak} /krpm	96
Stator Direnci	Ω	0.033
Stator Endüktans	mH	0.16
Mıknatıslama Endüktansı	mH	0.0255
Kutup Çifti Sayısı	-	23

Şekil 2'de verilen hız-algılayıcısız DMK sisteminde τ_e^r referans değerini üretmek için geleneksel PI tipi hız kontrolörü, sürücü sisteminin akı ve moment tepkisini belirlemek için ise iki ve üç seviyeli histerezis karşılaştırıcılar kullanılmıştır. Üç fazlı rotor akıları ve stator akımları Clarke dönüşümü ile stator duran eksenine ($\alpha\beta$ –eksenine) dönüştürülür. Akı sektörü, rotor akısı ve stator akımının $\alpha\beta$ – bileşenleri kullanılarak 3 boyutlu arama tablosuyla belirlenir. Bu prosedür sırasında stator akısının $\alpha\beta$ – bileşenleri ($\varphi_{s\alpha}$ ve $\varphi_{s\beta}$), stator kaçak endüktans, rotor akısı ve stator akımının akısının $\alpha\beta$ –bileşenleri kullanılarak [6]'daki gibi hesaplanır.

DMK tabanlı SMFDAM sürücüsünün kontrol başarımı ve önerilen hız kestiricilerinin kestirim başarımı Şekil 3'te verilen hız referansı ve yük momenti değişimlerini içeren senaryo altında gerçekleştirilen benzetim çalışmalarıyla test edilmiştir. Şekil 3 ile verilen senaryoda SMFDAM'ye ait hız referansı ileri ve geri yönde sıfır hız ile anma hızını içeren geniş bir aralıkta uygulanmıştır. Böylelikle önerilen sürücü sisteminin hem sürekli-hal hem de geçici-hallerdeki hız ve moment başarımı gözlemlenebilmiştir. Motora uygulanan yük momenti ise SMFDAM'nin farklı hız değerlerinde çalışması esnasında 5 N.m ile 20 N.m arasında basamak şeklinde değiştirilmiştir. Böylelikle de SMFDAM sürücüsünün farklı yük koşullarında indüklenen moment kontörlündeki başarımı ve kararlılığı test edilmiştir.



Şekil 3. Sürücü sistemine verilen hız referansı ve motora uygulanan yük momenti değişimleri

Sekil 3'te sunulan hız referansı ve yük momenti değişimleri ile oluşturulan senaryo ile SMFDAM'nin hız kestirimi için önerilen LMS, LMK ve LMF tabanlı MRAS kestiricilerinin de kestirim başarımları DMK'lı SMFDAM sürücüsü üzerinde test edilmiş ve hız kestirimindeki yüksek başarımın DMK üzerindeki etkisi de gözlemlenebilmiştir. SMFDAM'nin hız-algılayıcısız DMK'sı için önerilen sürücü sistemine ait benzetim sonuçları Şekil 4-6'da sunulmuştur. Kontrol ve kestirim sonuçları ile birlikte kestirim hataları da sunulmustur. belirtilen sekillerde Ayrıca önerilen kestiricilere ait ortalama kare hata (Mean square error, MSE) değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2 kestirilen hız hataları ile birlikte stator akımlarına ait hata değerlerini içermektedir.



Şekil 4. LMS tabanlı MRAS hız kestiricisini kullanan SMFDAM sürücüsüne ait benzetim sonuçları



Şekil 5. LMK tabanlı MRAS hız kestiricisini kullanan SMFDAM sürücüsüne ait benzetim sonuçları



Şekil 6. LMF tabanlı MRAS hız kestiricisini kullanan SMFDAM sürücüsüne ait benzetim sonuçları

Tablo 2. MSE değerleri.

$MSE^{LMS}_{\omega_m}$	0.0017	$MSE_{i_{sa}}^{LMS}$	0.0020	$MSE_{i_{sb}}^{LMS}$	0.0021	$MSE_{i_{sc}}^{LMS}$	0.0021
$MSE^{LMK}_{\omega_m}$	0.0017	$MSE_{i_{sa}}^{LMK}$	0.0021	$MSE_{i_{sh}}^{LMK}$	0.0021	$MSE_{i_{sc}}^{LMK}$	0.0021
$MSE_{\omega_m}^{LMF}$	0.0016	$MSE_{i_{sa}}^{LMF}$	0.0047	$MSE_{i_{sb}}^{LMF}$	0.0048	$MSE_{i_{sc}}^{LMF}$	0.0048

SMFDAM'nin üç farklı hız kestiricisi ile oluşturulan hızalgılayıcısız DMK'sının kontrol başarımının önerilen hız kestiricilerinin kestirim başarımından doğrudan etkileneceği muhakkaktır. Şekil 4-6 ve Tablo 2 incelendiğinde aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir;

- Hem ileri yönde hem de hızın terslendirildiği bölgelerde yüksek hız ve düşük hızda çalışmayı kapsayan geniş bir hız aralığında önerilen kestirici yapıları yüksek başarımla hız kestirimini gerçekleştirmiştir. Ayrıca belirtmek gerekir ki; LMK ve LMF tabanlı MRAS yapıları hata sinyalinin yüksek dereceden istatistiksel özelliklerini kullanırken, LMS tabanlı MRAS yapısı hata sinyalinin sadece ikinci dereceden istatistiksel özelliklerini kullanmaktadır.
- Kestirilen hız bilgisinin ve 3-faz stator akım bilgilerinin kullanıldığı hız-algılayıcısız DMK tabanlı SMFDAM sürücüsü yüksek kontrol başarımına sahiptir.
- Önerilen kestiricilere ait MSE değerleri kestiricilerin birbirlerine alternatif olduğunu göstermektedir. Özellikle, hız kestiriminde LMF tabanlı MRAS yapısı, diğer MRAS yapılarından bir

miktar daha iyi başarım sağlarken, 3-faz stator akım kestiriminde LMS ve LMK tabanlı MRAS yapıları daha iyi MSE başarımları sağlamıştır.

Özetle benzetim sonuçları bu çalışmada önerilen adaptif filtre tabanlı MRAS hız kestiricilerinin kestirim başarımını ve bu kestiricileri kullanan DMK tabanlı SMFDAM sürücüsünün başarımını onaylamaktadır.

4 Sonuç

Bu çalışmada hız algılayıcısız SMFDAM sürücüsünün ihtiyaç duyduğu hız bilgisinin kestirimi LMS, LMK ve LMF tabanlı MRAS yapıları ile gerçekleştirilmiştir. Önerilen MRAS kestiricileri, ölçülen (referans) stator akımları ile adaptif modelin çıkışındaki stator akımları arasındaki hatayı hesaba katarak SMFDAM'nin rotor hızını doğrudan kestirmiştir. Dahası, hem LMS tabanlı, hem LMK tabanlı hem de LMF tabanlı MRAS kestiricilerindeki rotor hızını içeren ağırlık vektörleri her bir örneklemede adaptif olarak güncellendiğinden, önerilen kestiriciler geleneksel MRAS yapılarında sıklıkla kullanılan sabit kazançlı PI denetleyiciye olan ihtiyacı ortadan kaldırmıştır. Önerilen MRAS kestiricilerin başarımı zorlayıcı senaryolar ile DMK tabanlı SMFDAM sürücüsü ile test edilmiş ve doğrulanmıştır. Ayrıca, tasarlanan MRAS yapılarına hız kestiriminin yanı sıra parametre kestiriminin eklenmesi ve ilgili yapıların gerçek-zamanlı olarak çalıştırılması gelecek çalışma olarak planlanmaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %12

Kaynaklar

- T. Rekioua, F. Meibody Tabar, and R. le Doeuff, A new approach for the field-oriented control of brushless, synchronous, permanent magnet machines, in 1990 Fourth International Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drives (Conf. Publ. No. 324), pp. 46–50 Jul. 1990.
- [2] M. N. Gujjar and P. Kumar, Comparative analysis of field oriented control of BLDC motor using SPWM and SVPWM techniques, in 2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), pp. 924–929, May 2017. https://doi.org/ 10.1109 /RTEICT.2017.8256733.
- [3] N. D. Irimia, F. I. Lazar, and M. Luchian, Comparison Between Sinusoidal and Space Vector Modulation Techniques on the Resulting Electromagnetic Torque Ripple Produced by a Three-Phase BLDC Motor under Field-Oriented Control, in 2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), pp. 640–645, Apr. 2019. https://doi.org/10.1109/CoDIT.2019.8820718.
- [4] Md. A. Islam, Md. B. Hossen, B. Banik, and B. C. Ghosh, Field oriented space vector pulse width modulation control of permanent magnet brushless DC motor, in 2017 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC), pp. 322–327, Dec. 2017. https://doi.org/10.1109/R10-HTC.2017. 8288966.
- [5] M. A. Noroozi, J. S. Moghani, J. Mili Monfared, and H. Givi, An improved direct torque control of brushless DC motors using twelve voltage space vectors, in 2012 3rd Power Electronics and Drive Systems Technology (PEDSTC), pp. 133–138, Feb. 2012. https://doi.org/10. 1109/PEDSTC.2012.6183312.
- [6] R. İnan, B. Aksoy, and O. K. M. Salman, Estimation performance of the novel hybrid estimator based on machine learning and extended Kalman filter proposed for speed-sensorless direct torque control of brushless direct current motor, Eng. Appl. Artif. Intell., 126, p. 107083, Nov. 2023. https://doi.org/10.1016/j. engappai.2023.107083.
- [7] A. A. Kaf, X. Cheng, C. Zhang, A. Almadwami, A. Abdullah, and H. Almadwami, Sensorless Direct Torque Control in Brushless DC Motor Using Sliding Mode Observer, in 2024 4th International Conference on Emerging Smart Technologies and Applications (eSmarTA), pp. 1–8, Aug. 2024. https://doi.org/10.1109/eSmarTA62850.2024.10638846.
- [8] B. Saha and B. Singh, Torque Ripple Mitigation in Sensorless PMBLDC Motor Drive With Adaptive

Observer for LEV, IEEE Trans. Power Electron., 40, no. 1, pp. 1739–1747, Jan. 2025. https://doi.org/10.1109/TPEL.2024.3457677.

- [9] R. Inan, An Improved Model Predictive Current Control of BLDC Motor With a Novel Adaptive Extended Kalman Filter–Based Back EMF Estimator and a New Commutation Duration Approach for Electrical Vehicle, Int. J. Circuit Theory Appl., 53(2), pp. 1135-1150, 2024. https://doi.org/10.1002/cta.4407.
- [10] P. Ubare, D. Ingole, and D. N., Sonawane, Nonlinear Model Predictive Control of BLDC Motor with State Estimation, IFAC-Pap., 54(6), pp. 107–112, 2021. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.531.
- [11] J.-C. Gamazo-Real, V. Martínez-Martínez, and J. Gomez-Gil, ANN-based position and speed sensorless estimation for BLDC motors, Measurement, 188, p. 110602, Jan. 2022. https://doi.org/10.1016/j. measurement.2021.110602.
- [12] D. Joshi, D. Deb, and A. K. Giri, MRAS disturbance observer-based sensorless field-oriented backstepping control of BLDC motor drive, Electr. Eng., 106(5), pp. 6681–6701, Oct. 2024. https://doi.org/10.1007/s00202-024-02378-9.
- [13] R. Demir, Speed-sensorless Predictive Current Controlled PMSM Drive With Adaptive Filteringbased MRAS Speed Estimators, Int. J. Control Autom. Syst., 21(8), pp. 2577–2586, Aug. 2023. https://doi.org /10.1007/s12555-022-0698-z.
- [14] E. Zerdali and E. C. Mengüç, Novel Complex-Valued Stator Current-Based MRAS Estimators With Different Adaptation Mechanisms, IEEE Trans. Instrum. Meas., 68(10), pp. 3793–3795, Oct. 2019. https://doi.org/ 10.1109/TIM.2019.2932161.
- [15] R. Demir, R. Yıldız, and M. Barut, Speed-sensorless predictive torque control of the IM based on MRAS, Niğde Ömer Halisdemir Univ. J. Eng. Sci., 12(1), pp. 126–133, 2023. https://doi.org/10.28948/ngumuh. 1208031.
- [16] R. Yıldız, R. Demir, E. Zerdali, and M. Barut, Least mean Kurtosis algorithm-based MRAS estimator for speed-sensorless model predictive control of induction motor, presented at the V. International Turkic World Congress on Science and Engineering, pp. 80–92, Bishkek, Kırgızistan, Jul. 2023.
- [17] B. Widrow and M. E. Hoff, Adaptive switching circuits, IRE, pp. 96–104.
- [18] E. Walach and B. Widrow, The least mean fourth (LMF) adaptive algorithm and its family, IEEE Trans. Inf. Theory, 30(2), pp. 275–283, Mar. 1984. https://doi.org/10.1109/TIT.1984.1056886.
- [19] O. Tanrikulu and A. G. Constantinides, Least-mean kurtosis: A novel higher-order statistics based adaptive filtering algorithm, Electron. Lett., 30(3), pp. 189–190, Feb. 1994. https://doi.org/10.1049/el:19940129.
- [20] S. Haykin, Adaptive Filter Theory, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall., 1996.
- [21] E. C. Mengüç and N. Acır, An Augmented Complex-Valued Least-Mean Kurtosis Algorithm for the Filtering of Noncircular Signals, IEEE Trans. Signal

Process., 66(2), pp. 438–448, Jan. 2018. https://doi.org/ 10.1109/TSP.2017.2768024.

[22] E. C. Mengüç, N. Acır, and D. P. Mandic, Widely Linear Quaternion-Valued Least-Mean Kurtosis Algorithm, IEEE Trans. Signal Process., 68, pp. 5914–5922, 2020. https://doi.org/10.1109/TSP.2020. 3029959.



NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 688-700 Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi



Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araștırma makalesi / Research article

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



Malsmsdetector: Malicious text message detector with hybrid feature vector and stacked ensemble model: a comparative study

Malsmsdetector: Hibrit özellik vektörü ve istiflenmiş topluluk modeli kullanan kötücül mesaj tespit aracı: karşılaştırmalı bir çalışma

Recep Sinan Arslan^{1,*}

¹ Kayseri University, Computer Engineering Department, 38000, Kayseri, Türkiye

Abstract

In recent years, the emergence of telecommunication systems has led to an increase in global electronic messaging traffic. Most of this traffic contains unwanted content for the user. In this study, an approach is proposed in which feature vectors generated using DBOW and PV-DM techniques are used for classification as a hybrid for spam SMS detection. In the training and testing of the proposed method, four different datasets (UCI, BEC, Big NUS and DITNUS) that are widely used are combined and used. This dataset is tested with 10 different machine learning algorithms and then a unique stacked ensemble model is proposed to increase the performance. In the tests using the model, accuracy, precision, recall, F-score and AUC values are 98.38%, 98.39%, 98.39%, 98.37% and 96.81%, respectively. When 10-fold cross validation is applied to the obtained results, the standard deviation value is 0.004. The analysis time per sample is 0.087 milliseconds.

Keywords: Mobile spam filtering, Short message service (SMS), Bag of Words (BOW), Doc2Vec, hybrid feature vector (HFV)

1 Introduction

Technological development makes people's lives easier. This development is a continuous and rapid process. The use of these technological infrastructures in many fields, such as biomedicine, information technology and communication [1], has now become mandatory [2]. Technological developments have responded well to this need, solving many problems with high efficiency and performance over the last 30 years [3]. For this reason, it is used in all areas of life and facilitates opportunities. Nowadays, people are becoming more and more dependent on computers every day, and they use computers that they think are safe to perform their tasks. Improvements have also been made in the field of communication and it has helped people to connect with the outside world by telephone [4]. Over the past 10 years, mobile technology applications have been an exciting area for researchers and developers. By 2021, there

Öz

Son yıllarda telekomünikasyon sistemlerinin ortaya çıkması, küresel elektronik mesajlaşma trafiğinde (SMS veya e-posta) artışa yol açmıştır. Bu trafiğin çoğu, kullanıcı için istenmeyen içerikler içermektedir. Bu çalışmada, spam SMS tespiti için DBOW ve PV-DM teknikleri kullanılarak üretilen öznitelik vektörlerinin hibrit olarak sınıflandırma için kullanıldığı bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yöntemin eğitim ve testlerinde yaygın olarak kullanılan dört farklı veri kümesi (UCI, BEC, Big NUS ve DIT NUS) birleştirilerek kullanılmıştır. Bu veriseti 10 farklı makine öğrenmesi algoritması ile test edilmiş daha sonra başarımı artırmak için özgün bir yığılmış topluluk modeli önerilmiştir. Model kullanılarak yapılan testlerde doğruluk, kesinlik, geri çağırma, F-puanı ve AUC değerleri sırasıyla %98.38, %98.39, %98.39, %98.37 ve %96.81 olmuştur. Elde edilen sonuclara, 10 katlı cross validation yapıldığında elde edilen standart sapma değeri 0,004'tür. Örnek başına analiz süresi 0.087 milisaniyedir. Testler sonucunda hibrit özellik vektörünün kullanımının SMS spam tespiti için başarılı sonuçlar sağladığı ve sistem performansının iyileştirilmesine katkıda bulunduğu gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Mobil spam filtreleme, Kısa mesaj servisi (SMS), Kelime Torbası (BOW), Doc2Vec, hibrit özellik vektörü (HFV)

will be 5.27 billion individual mobile phone users worldwide, which is a high proportion of the world's population, approximately 67.1% [5]. In addition to normal telephone communication, the introduction of smartphones has led to the creation of applications that support many new features. Smartphones and tablets are used for many daily activities, such as internet research, entertainment, some mobile payments, access to personal data, banking services and, more recently, distance learning [6, 7].

Security structures in mobile devices are not as advanced and diversified as computers. The main reason for this is that the infrastructure in mobile devices has limited resources and users do not care enough about the security mechanism. However, these devices can store many personal data that is not available in traditional computer systems. This contradiction is an issue that needs to be worked on because of the situation [8]. Hence, mobile devices are becoming a

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sinanarslanemail@gmail.com (R.S. Arslan) Geliş / Received: 09.10.2024 Kabul / Accepted: 17.03.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngumuh.1563906

much more inviting target for cyber attackers [9]. Spam or unwanted messages are one of the easiest ways to reach these targets [10]. These messages can be a medium for malware types, such as phishing scams, worms, backdoors, and key loggers. As a result, operational and financial losses may occur. Through the software that might come with these messages, cyber attackers can perform some malicious activities, such as calling certain numbers without the users' consent, stealing the contact data of people, and joining fraud or botnet groups [11]. Mobile devices offer many textual communication modes to communicate with people for personal or commercial purposes. These modes can be in the form of instant communication or short message services. One of the biggest problems of these communication methods is the increase in the rate of unwanted messages [12]. According to the report published by DataProt in 2021, 122.33 billion messages are sent daily around the world. Approximately 85% of these are spam messages [13]. Spam messages can be unsolicited adult material, violent material, a waste of resources, or a hotspot for various security breaches.

Short message service, or SMS, is very popular among mobile phone users [14]. SMS is used as a medium to send purchase notifications or advertisements because it is the most cost-effective way to reach large audiences. By 2021, approximately 98% of the 272 million smartphone users in the US will be using short message services, and this usage rate is increasing by 6.2% each year. Statistics show that 98% of SMS messages are opened and 95% are read and replied to within 3 minutes of receipt [15]. This increased use of SMS makes it a useful and convenient tool for attackers. SMS is one of the methods used by cyber attackers because of the high response rate of text messages, the low cost of sending them in bulk, and the difficulty of detecting the malicious URL addresses that accompany the messages [16]. Most of the existing approaches to spam filtering are for email spam filtering [17]. The so-called frequency-inverse document frequency method, in which emails are weighted by examining them one by one, is the most basic approach used for this problem [18]. Statistical or machine learning (ML) models are then used to determine whether a message is spam or benign using training data [19]. The modelling takes into account not only the content of spam messages, but also the style characteristics. In addition, although spam emails and spam SMS messages have many similarities, SMS messages are shorter, contain less contextual information, and use a lot of abbreviations and jargon [20]. The official restrictions in countries have a problematic structure for content-based classification because of phonetic abbreviations, lack of or poor punctuation, use of emotional symbols, etc. [21].

In the future, the next generation of mobile technologies will have a much higher security risk. Rule-based or contentbased systems are recommended to prevent or filter the proliferation of large volumes of spam SMS messages. Many of the available techniques work with spam filters. In this technique, different parts of the messages are examined to detect spam and decide whether they are spam or not. In particular, rule-based systems are used by many software companies that provide security services [22]. Similarly, studies on rule-based classification have been carried out by brief researchers [23, 24] in news services. The rule-based approach is an efficient method, but it is necessary to constantly create and update large amounts of rules to maintain high filtering accuracy. As the number of rules increases, it becomes more difficult to check a text message against all the rules, and this takes more and more time each day. This aspect will reduce the efficiency of the developed system [25]. Therefore, it is necessary to replace or support rule-based systems with content-based systems to filter malicious messages. This will improve both the classification accuracy and the efficiency of the system [22]. On the other hand, content-based security systems have attracted much attention in recent years and are preferred as the main method for detecting spam SMS [26]. Recently, several hybrid methods have been proposed for SMS spam detection [27, 28]. However, the accuracy is still relatively low and research is still needed to propose different computational and classification approaches using new features.

The aim of this study is to create a dataset with more samples in SMS classification, to improve the performance of the existing SMS classification and to reduce the analysis time per sample. To this end, the main research questions are as follows:

1- Is it possible to create a dataset collection with more samples for SMS classification?

2- Does a feature vector with more features contribute positively to the classification?

3- Can the performance of SMS classification be further improved with a new classifier to be designed?

4- Can the analysis time per application be reduced?

The results of the studies carried out according to these objectives and questions are presented in this article. It presents a comparative analysis of the hybrid feature vector and stacking ensemble model, created by combining feature vectors extracted by different methods, with machine learning models and standard feature extraction methods. First, 4 different benchmark datasets were analysed and combined. Feature vectors were then extracted from these datasets using PVDM and DBOW networks. The resulting feature vectors were used in the training and testing processes of the proposed stacking ensemble model. Thus, the most successful feature generation and classification method for SMS classification with unbalanced datasets is revealed. The contributions of this work focus on addressing the above issues by further increasing the accuracy.

The contributions of Hybrid Feature Vector Design and Stacking Ensemble Model are as follows:

- A larger dataset built from 4 benchmark ensembles: BEC, Big NUS, DIT Nus, SMS Spam Collection.

- All necessary preprocessing steps (text cleaning, lemmatisation, stemming, stop word removal, spelling correction, rare and common word removal, etc.) have been applied.

- A proposed hybrid feature vector is obtained by combining the feature vector obtained by training the DBOW and PVDM models.

- A proposed stacked ensemble model with effective optimisation is designed for higher classification performance.

- The maximum classification value is 99.22% with 0.04 standard deviation, which is one of the highest classification values in the literature. A performance increase of 4% was achieved.

- The analysis time per SMS is only 0.087 milliseconds.
- The proposed model is language independent.

The rest of this paper is organised as follows: In Section 2, studies on binary classification of SMS are summarised. In section 3, the dataset, text embedding approaches (PVDM, DBOW), training and testing parameters, materials and methodology are explained. In section 4, the obtained results are presented and discussed in comparison with other studies. In the last section, the proposed study is summarised and information about future studies is given in the light of the limitations encountered during the study.

2 Related works

A substantial corpus of research has been dedicated to the analysis of SMS classification, with the findings being disseminated in the form of systematic reviews. These reviews encompass a wide range of classification methods, feature extraction and selection approaches [29]. The BoW model, a conventional approach employed in SMS spam detection, is deficient in its treatment of word order. The limitation imposed by SMS systems on the number of characters per message renders the distinction of word importance in frequency systems, which count the frequency of a word in the text, impractical. The study by Xia et al. [30] proposes a new method based on the HMM model to solve the low-frequency problem in SMS spam detection using word order information. Tests are performed on the University of California, Irvine (UCI) spam dataset and a separate Chinese SMS spam dataset containing 2000 messages. The experimental results demonstrate that the proposed model can effectively detect spam SMS with high accuracy, irrespective of the language. The proposed method is a language-insensitive SMS classification method that uses HMM. In tests on the Chinese SMS dataset, the proposed model demonstrated an accuracy of 95.9%. Xia et al. [22] proposed a Hidden Markov Model (HMM)-based SMS classifier design. The method utilises weighted features of tag words in SMS. In tests on the UCI dataset, which is one of the datasets utilised in this study, the HMM was shown to outperform the LSTM model and achieve classification performance comparable to that of the CNN. Convolutional neural networks (CNNs) and long short-term memory (LSTM) models have been proposed by Roy et al. [31] for highly accurate spam SMS detection. The proposed model is based on text data and extracts the feature set itself. The efficacy of the proposed model was evaluated through a series of tests conducted on 5574 messages, resulting in a

classification rate of 97.7%, signifying its notable performance in accurately identifying spam SMS messages.

Sjarif et al [32] used TF-IDF features to extract frequencies in SMS messages and performed classification with RF. Fewer features and smaller messages were analysed. Several classifiers are combined with the voting model. With this hybrid classifier including RF, 97.5% success was achieved. Liu et al [33] proposed a transformer model to classify SMS spam messages. ML models were used in the tests using the SMS Spam Collection v.1 dataset. In the tests, the Transformer model achieved 98.92% success, while the F-score value was 96.13. Ebadati et al [34] proposed a more efficient spam detection system with fewer processes, while selecting features that reduce classification performance. The tests were carried out on samples from Hewlett-Packard (HP) laboratories. Using Bayes' theorem, a genetic algorithm was used to select features without specifying a number. Benign and spam classification was then performed using NB. Similar results were obtained using NB and a hybrid genetic algorithm (GA)-NB. Zhao et al [35] proposed a heterogeneous infrastructure to improve the impact of class imbalance on spam detection in social networks. A cost-sensitive learning model was built using a deep neural network. Different costs of misclassification were specified and the prediction results were dynamically adjusted. Experimental results showed that the proposed platform significantly improved the spam detection rate in unstable datasets. Hong et al [36] proposed a multimodal architecture based on model fusion to filter out spam emails hidden in text or sent openly as images. A hybrid structure was created by combining the CNN and LSTM models. The text parts were classified with the LSTM and the image parts with the CNN and a binary fusion model was used. Hyperparameter optimisation was used with grid search and validation was done with k-fold cross validation. The result was spam detection with a higher accuracy than traditional models. Jain et al [37] used the LSTM architecture, which is a type of recurrent neural network (RNN) used for spam classification. The feature generation has the ability to learn abstract features, not manually. The vectors needed for classification were generated using word2vec, wordnet and conceptnet. Classification results were compared with SVM, NB, ANN, k-NN and random forest. Experiments were conducted on the SMS spam collection and the Twitter dataset. The results showed that the LSTM model was more successful in detecting spam than the traditional methods. Srinivasarao et al [38] processed the dataset with word2vec for SMS classification and started the processing with data augmentation. Then six different feature selection methods were fed into an equilibrium optimisation. A hybrid classifier was designed using KNN and SVM. Rat Swarm Optimisation (RSO) was used to parameterise the network and AFINN and SentiWordNet were used for sentiment analysis. After this long process, high performance in SMS classification was achieved. Jain et al [39] proposed an NLP technique using a semantic CNN network and Word2vec word vectors. The concept network searches for similar words in the data for a given word. The model has a success rate of 86.5% on the SMS spam dataset. Sharaff et al [40]

proposed an SMS filtering algorithm inspired by krill swarm optimisation and the biological dendritic cell algorithm. Tests were performed with different ML classifiers such as NB, LR and SVM and the results were compared. The results show that the proposed model is more successful than standard ML models. Gazal [41] proposed a model using a high-level filter, a fuzzy logic-based second-level evaluation layer, and a low-level classifier. The model performs majority voting classification for RF and has high performance. There are also some commercial applications that provide services in this area. Apache SpamAssassin is a platform designed to classify and block spam messages. It is a successful and typical example of rule-based systems [42].

In almost all studies using UCI data, either smote (data balancing) was performed or the performance was too low for spam classification. This is why there is a difference between the accuracy and f-score values. In this study, despite the significant imbalance in the amount of data, no data balancing was performed and the results were designed to be high for both raw and spam messages. High performing models tend to use either a complex classifier design or a combination of attributes. In addition, the studies are mostly based on text classification and NLP techniques. Text-based problems such as spam Twitter messages and spam emails have been studied. The model proposed in this study achieves the highest performance on the UCI dataset compared to the literature.

3 Material and methods

The proposed model for classifying SMS as spam and ham is described in this section. The proposed model structure includes (1) dataset acquisition, (2) preprocessing, (3) feature engineering with text embedding, (4) hybrid feature vector design, (5) machine learning approaches, and (6) three different ensemble model designs (hard voting ensemble, soft voting ensemble, and stacking ensemble). All these steps are visually illustrated in Figure 1. In addition, the details of the proposed ensemble model structures are given in Figure 2.

The flowchart of the model proposed in this study is shown in Figure 1. In the first stage of the proposed model, a large dataset consisting of different datasets was created. By combining 4 different datasets, the aim is to create a broad and homogeneously distributed dataset that contains more samples. Although there is sample imbalance between classes, as in many studies, a SMOTE-like data balancing process was not performed. This is because the reliability of tests with synthetically generated data is reduced. The next step was to perform a series of pre-processing operations on the data. In this step, a number of operations that can be applied to natural language processing problems, such as text cleaning, stemming, lemmatisation, tokenisation, and removal of common and rare words, can be applied. For the model proposed in this study, the operations indicated by the green arrow in the figure provide an improvement in performance, while the operations indicated by the red arrow cause a decrease in performance. The next step is to convert the texts into numerical vectors. This makes it possible to train and test machine learning models. In the literature,

feature extraction algorithms such as Bag of Words (BOW), N-gram, TF-IDF, Word2vec (CBOW) and Doc2vec (PVDM) have been used [43, 44]. In general, these features can be used individually or as a hybrid. In this study, a hybrid vector was obtained by combining the feature vectors of the DBOW model and the PVPM model, which achieved the highest performance for the proposed model. Thus, the aim is to obtain more features for each sample text and to capture distinctive features. For this process, training and test data were trained separately with DBOW and PVDM models.



Figure 1. Methodology diagram of the proposed SMS malware detection model

Machine learning or deep learning models can be used to classify the resulting 3 different feature vectors. For this problem, 3 different ensemble models were designed and tested. The structure of the 3 different ensemble models used to solve the problem is shown in Figure 2. A total of 12 different classifiers, of which 3 are boosting ensembles and 2 are bagging ensembles, are used in the design of 3 different ensemble models. Both comparative results were obtained and analysed and the most successful model was revealed. The predictions made with 12 different classifiers in the first layer were subjected to a final evaluation in the second layer and the final decision was determined.

In the voting soft and hard models, all classifiers are included in the voting. In the stacking ensemble model, SVC is used as the decision maker (layer 1). Since the proposed model in this study aims to classify SMS with the highest performance, a large number of comparative tests and hybrid feature structures were used. The test results with the model with the highest performance are presented in the next section.



Figure 2. Systematic representation of the proposed ensemble models

3.1 Datasets

SMS classification studies are generally tested using the UCI SMS dataset. The main difference between the studies comes from the feature extraction and classifier design. Accordingly, different classification performances have been obtained. The UCI dataset contains 747 spam and 4827 raw messages. The total number is quite small, and the number of samples belonging to the spam and ham classes is quite unbalanced. In order to find a solution to this problem and to prepare a dataset for further examples, 4 different benchmark datasets in this area, shown in Table-1, were discussed and analysed. The datasets are stored in a text file where each line represents a message. Each row contains a message and information about the class it represents. The issue of user privacy is the most important factor affecting the collection of SMS data and the creation of large datasets worldwide. Most existing SMS datasets are based on the compilation and combination of small SMS datasets. These different datasets, which contain little data, were converted into a common format by performing the necessary preprocessing for this study. This allowed the proposed model to be trained and tested on more comprehensive data.

Table 1. List of datasets

Corpus Name	Number of spam messages	Number of ham messages
DIT (Dublin Institute of Technology) [21]	1351	1353
UCI SMS Spam Collection [45]	747	4827
Corpus v.0.1 big NUS [46]	322	1002
British English Corpus (BEC) [47]	425	450
TOTAL	2845	7632
TOTAL (after remove duplicates)	1811	6660

When the datasets shown in Table-1 were combined into a single dataset, a more comprehensive dataset was created containing 2845 spam and 7623 raw messages. However, when these datasets were examined, it was found that some data was found in more than one dataset. This situation led to data repetition in the dataset and caused the problem of working with repetitive data in the training and testing processes of learning models. To overcome this, it was necessary to clean up the duplicated data and create a dataset in which all samples are unique. As a result of the study carried out for this purpose, a dataset of 1811 spam and 6660 raw messages was created. All testing was carried out on this original dataset.

3.2 Pre-processing

In order to obtain better data processing and results, it is useful to remove some unnecessary information from the SMS. In this study, the pre-processing process included cleaning the dataset, tokenisation, and removal of stop words.

3.2.1 Cleaning Text

Prior to the utilisation of the resulting dataset for classification purposes, a Python library was employed to eliminate extraneous elements such as spaces, new lines, missing values, punctuation marks, special characters, and XML and HTML tags. Given the case sensitivity of certain Python libraries, it was necessary to convert all characters to lower case. Duplicate words were removed. This process resulted in a reduction of both the size of the data and the time required for classification. Stemming and lemmatisation operations, which are frequently employed in NLP studies, were not performed as they have been shown to cause degradation in performance metrics [48]. The binary categorical classification scores, in the form of both raw and spam, were converted to a numerical form using the labelencoding module in the scikit-learn library.

3.2.2 Stop words removal

Stop word removal is one of the most common approaches used in natural language processing [49]. Stop words are considered to be the most common words in any language and in many cases they have a negative impact on text classification and may not contain any semantic information. Removing these words and punctuation from the text is considered useful for NLP. Informal words, spoken language texts, emoji's, abbreviations, acronyms and many unintelligible words are called stop words. In the tests conducted in this study, it was found that removing stop words had no positive impact on classification, while it had a positive impact on training and testing time. In line with the goal of faster classification, stop word removal was applied to the database using the nltk library in the preprocessing phase.

3.2.3 Tokenization

Tokenisation is the process of extracting words from SMS text [41]. It is a kind of data normalisation process. The Doc2Vec network models used in this study are language independent. In the tokenisation process, there is no problem with western languages such as English and Turkish, as the separation into words is done according to the space character. However, since the sentence structure is different in languages such as Chinese and Japanese, some preprocessing may be required before tokenisation [22]. The pre-processing should be in the form of separation into words and use of punctuation. Separating the text into words and preserving the original order is critical in the tokenisation process. In this study, classification of SMS messages of one word or less was not used. Since the classification was based on the context according to the paragraph, the context could not be determined in one-word messages. The input features were converted to numerical values using the Keras tokeniser. The resulting result was divided by 70%-30% and used in the training and testing process.

3.3 Text representation methods

3.3.1 Paragraph Vector PV-DM (Doc2Vec)

Doc2vec takes the whole sentence as input and transforms it into vectors using the structure shown in Figure 4, where a feature representing the concept of the SMS replaces the word. In the training process, the word vector and the sentence vector are trained. This model is called the PV-DM model. This model structure was generated using the Gensim library for hybrid feature vector generation and benchmarking in our study [50].

3.3.2 DBOW Model (Distributed Bag of Words)

Bag of words (BOW) is one of the most basic approaches to representing data. When training the model, words are scored independently of their position in the text. BOW differs from PV_DM in that it forces the prediction of selected words from a sentence without considering the context [50].

4 Results

4.1 Experimental environment and hyper-parameters

In order to evaluate the effectiveness of the proposed model, the most frequently used 5 datasets were used. It has been shown that the traditional BOW models have some problematic points in the classification of SMS, which contain short texts and are full of idioms, symbols and abbreviations; therefore, their performance may decrease. A similar situation occurs in applications with a character limit, such as instant messaging systems like WhatsApp or Bip, and social networks or forums such as Twitter, Facebook, etc. All possible types of concatenation have been identified in the tests and the tests have been performed with each combination. These algorithms are currently the best available techniques [34]. All the codes for testing the proposed model were written in Python version 3.8.1. The codes handled the reading of the SMS data, the tokenisation, the generation of feature vectors with the Word2Vec network and the classification with 10 different algorithms. All methods are available in the scikit-learn library. The results presented in this study were computed on a desktop computer with an Intel Core i7-9700 CPU 3.0 GHz processor and 8 GB memory.

While the majority of parameters in machine learning models are learned by extracting them directly from the data, it is not possible to automatically learn hyper-parameters in this way, and the state of these parameters directly affects the classification performance, regardless of the complexity of the model. It is difficult to find the most optimal combination of multiple hyper- parameters because there is a wide range of values that multiple parameters can take. The grid search algorithm is a common approach that performs tuning for multiple parameters with a predefined range. This ensures that the best parameters are found. The grid search algorithm was used to select the parameters that would achieve the highest performance for 12 different machine learning models used in this study. After running the algorithm, the parameter details for each classifier and the design of the stacked ensemble model proposed for this study are shown in Table 2.

4.2 Classification results and evaluation

In this study, (1) hybrid feature vector generation and (2) stacking ensemble classifier design are proposed. The aim is to improve the performance of SMS classification independent of the data set. In line with this goal, tests were conducted with a total of 15 different classifiers, including 2 different text embedding approaches and 3 ensemble models, and the results are presented in detail in this section. When analysing the test results given in Table 3 with the feature vector generated with both DBOW and PVDM embedding models, it can be seen that the proposed 3 different ensemble models have a higher performance than the standard machine learning models. This performance is valid for all metrics, including accuracy and AUC. The best values are obtained with the stacking ensemble model structure proposed in this study. This proves that the stacking ensemble model contributes positively to the classification.

Classifier	Model Details						DBOW		PVDM		
LR	C=1000.0, random_state=0, others parameters with default value	Туре	Algorith m	Acc (%)	Pre (%)	Rec (%)	F- score (%)	Acc (%)	Pre (%)	Rec (%)	F- score (%)
KNN	n_neighbors=5, p=2, metric='minkowski', others parameters with default value	Regression	LR	95.7	95.6	95.7	95.6	95.6	95.6	95.6	95.5
SVC	kernel='linear', C=1.0, random_state=0, probability=True, shrink=true, verbose=false, others parameters with default	Instance- based	KNN	95.2	95.2	95.2	95.0	94.5	94.7	94.5	94.3
C4 5	value	Decision	SVC	95.8	95.8	95.8	95.7	95.7	95.7	95.7	95.6
04.5	Tandoni_state=0, otiers parameters with default value	Tree	C4.5	92.8	92.7	92.8	92.8	90.8	90.7	90.8	90.7
GNB	parameters with default value	Bayesian	GNB	86.2	88.5	86.2	86.8	90.6	90.8	90.6	89.9
LDA	solver=svd, n_components=None, others parameters with default value	LDA Artificial	LDA	94.8	95.1	94.8	94.6	91.8	92.5	91.8	91.1
MLP	max_iter=1000,activation='relu', alpha= 0.5, hidden_layer_sizes= (10, 20, 10), learning_rate= 'adaptive', solver= 'adam'	Neural Network	MLP	94.8	94.8	94.8	94.8	95.1	95.0	95.1	95.0
Ada Boosting	parameters with default value		ADA	95.0	94.9	95.0	95.0	94.3	94.3	94.3	94.1
GB	loss=logloss, learning_rate=0.01, max_depth=None, others parameters with default value		GB RF	95.5 95.8	95.5 95.8	95.5 95.8	95.4 95.7	94.7 94.1	94.8 94.5	94.7 94.1	94.5 93.8
RF	criterion=entropy, n_estimators=10, random_state=1, others parameters with default value		ET	95.0	95.2	95.0	94.8	93.9	94.3	93.9	93.5
ET	max_depth=8, others parameters with default value	Ensemble	XGB	95.1	95.0	95.1	95.0	95.4	95.5	95.4	95.2
XGB	earning_rate =0.01, n_estimators=1000, max_depth=5		Proposed Voting ensemble (soft) Proposed	96.0	96.0	96.0	95.9	95.4	95.6	95.4	95.3
Proposed Voting ensemble(s	Estimator models: LR, RF, DT, MLP, SVC, XGB, GB, GNB, LDA,		Voting ensemble (hard)	95.9	95.9	95.9	95.8	95.2	95.5	95.2	95.0
oft) Proposed	voting=soft, weights:iNone, verbose=faise, transform=true		Proposed Stacked Ensembl e Mode	96.1 I	96.1	96.1	96.1	96.3	96.4	96.3	96.2
Voting ensemble(h ard)	Estimator models: LR, RF, DT, MLP, SVC, XGB, GB, GNB, LDA voting=hard, weights:None, verbose=false, transform=true	Table	LO:L1	the r	esults	sobta	ined	for th	e hvł	orid f	eature
Proposed Stacked	LO estimator models: LR, RF, DT, MLP, SVC, XGB, GB,	vector, w increase	here 2 c the pe	liffer	ent fe	eature e ev	e vect en f	ors a furthe	er.	ombir While	red to the
Ensemble Model	GNB, LDA L1 final estimator model: SVC	4%, the in	ncrease i	n the	AUC	lacy 1 Valu	e is a	bout	5%.	Thus	, with

Table 2. Hyper parameters of classifiers and details of ensemble models

LO:L1

Table 3. Classification results with DBOW and PV-DM feature vectors

ture d to the e of 4%, the increase in the AUC value is about 5%. Thus, with the DBOW+PVDM hybrid feature vector and the designed stacking ensemble classifier, a success rate of 98% and above is achieved.

Feature Vector Type	Туре	Classification Algorithm	Acc (%)	Pre (%)	Rec (%)	F- score (%)	ROC - AUC
	Regressio n	LR	98.00	97.99	98.00	97.98	96.10
	Instance-	KNN	93.87	94.29	93.87	93.49	85.96
	based	SVC	97.68	97.67	97.68	97.66	95.71
	Decision Tree	C4.5	95.32	95.27	95.32	95.28	92.30
	Bayesian	GNB	89.62	89.30	89.62	89.38	82.59
	Artificial Neural Network	MLP	97.48	97.47	97.48	97.46	95.32
	LDA	LDA	97.37	97.43	97.37	97.31	94.07
Propose d Hibrit FV		Adaboost	97.33	97.31	97.33	97.31	95.28
1 V		GB	97.68	97.69	97.68	97.65	95.31
		RF	97.44	97.49	97.44	97.39	94.38
		ET	96.93	97.05	96.93	96.85	92.94
	Ensemble	XGB	96.11	96.10	96.11	96.03	92.42
		Proposed Voting ensemble(soft)	98.23	98.25	98.23	98.21	96.12
		Proposed Voting ensemble(hard)	98.27	98.29	98.27	98.25	96.28
		Proposed Stacked Ensemble Model LO:L1	98.39	98.39	98.39	98.37	96.81

Table 4. Classification	n results with	proposed	hybrid tors
-------------------------	----------------	----------	-------------

In order to better evaluate these successful results, ROC curves including all classifiers are obtained for all three models and are shown in Figure 3. According to this, while all machine learning models in general achieve a high AUC value, the stacking ensemble model guarantees the highest value for all three feature vector structures. This is because, as can be seen in the graph, for DBOW the best result is obtained with the gradient boosting classifier, except for the ensemble models, while for PVDM the same machine learning model has a very low value and the best value is obtained with SVM and MLP. On the other hand, for the hybrid feature vector, the best result was obtained with LR. This causes instability in the results obtained and in the choice of classifier. With the stacking ensemble structure, this problem is solved and it is possible to guarantee the best classification success for the whole feature vector.



Figure 3. ROC with DBOW, PV-DM and HYBRID feature vectors

The cross-validation graphs of the obtained results are shown in Figure 4, where it is ensured that the results are not random and the results of the stacking ensemble model are repeatedly evaluated for different sample selections (k=10). The lowest standard deviation and the highest average performance are obtained with the proposed hybrid feature vector and the standard deviation is only 0.04.



Figure 4. Cross validation with 10 folds for all classifiers and proposed stacking model

The results presented so far in this section show average values for the binary classification problem. Due to the data imbalance between the classes (ham =6660; spam =1811), the results obtained should be evaluated separately on a class basis. For this purpose, the confusion matrices obtained with the stacking ensemble classifier for all three feature vectors are shown in Figure 5. According to this, for the hybrid feature vector, 41 false detections were made in a total of

2544 test samples and the false positives were mostly due to spam sms being detected as ham. It also shows that ham messages can be detected with a very low FP value. When comparing the three vectors, the lowest FP and FN values were obtained with the hybrid feature vector.



Figure 5. Confusion matrix for proposed stacking model

4.3 Speed evaluation results of the DBOW+DMM

The results presented so far in this section show average values for the binary classification problem. Due to the data imbalance between the classes (ham =6660; spam =1811), the results obtained should be evaluated separately on a class basis. For this purpose, the confusion matrices obtained with the stacking ensemble classifier for all three feature vectors are shown in Figure 5. According to this, for the hybrid feature vector, 41 false detections were made in a total of 2544 test samples. And the false positives were mostly due to spam messages being detected as ham. It also shows that ham messages can be detected with a very low FP value. When comparing the 3 vectors, the lowest FP and FN values were obtained with the hybrid feature vector.

It is clear that the result of this study will be a much larger vector, using feature vectors generated by more than one network. For this reason, it is necessary to avoid an additional load on the system in terms of process and memory, while achieving an increase in performance. Therefore, the values shown in Table 5 are crucial for the model proposed in this study. As a result, very low training and testing times per sample were required. Considering that these tests were carried out on a desktop computer, this is significant. It is assumed that these processes will be completed in a much shorter time, as it is expected that in reality filtering systems will be run on mail or web servers. As a result, although the ensemble model appears to use proportionally more processing time, in terms of time, it requires negligibly less SMS/classification time.



Figure 6. Training-testing time graph for all classifiers with proposed stacking model

Table	5.	Execution	time	for	hybrid	feature	vector	and
stackin	g e	nsemble mo	odel					

Dataset	Training Time per SMS (millisecond)	Testing time per SMS (millisecond)
BEC Dataset [47]	0.102	9.29
Corpus v.0.1. Big NUS dataset [46]	0.087	8.94
DIT NUS Concatenated Dataset [21]	0.093	8.73
SMS Spam Collection Dataset (UCI) [45]	0.129	10.64
Original Dataset (Collection)	0.087	7.85

5 Discussion

The ML outputs obtained from the experiments performed with 300 different combinations were compared with different metrics. The proposed method generated a more comprehensive vector by combining data from several feature-generating network structures (DBOW, PVDM, HYBRID) and using it for classification. The aim was to achieve a high success rate. As SMS is a text-based communication method that has been used on mobile devices for many years, many security studies have been conducted in this area. The SMS Spam Dataset (UCI) has been used in most of these studies. Table 6 shows some of the studies carried out with this dataset according to the model, type of classification and results using different metrics. Different algorithms were used in the model designs in each study. In the tests carried out on four different datasets, great results were obtained with an average success rate of 98% and above. In addition, the classification success rate increased to 99.22% in the tests performed with the UCI dataset only.

When the studies in the literature are examined, it is seen that deeper neural networks are used as classifiers instead of machine learning in order to achieve high performance in SMS classification. In addition, it is seen that statistically based natural language processing approaches are used in some studies to extract features from SMS texts, while deep learning structures that can directly obtain features are used in most of the remaining studies. While this situation allows high performance to be achieved in terms of accuracy in terms of classification performance, similar values cannot be obtained in terms of other metrics. This situation shows that the models converge to certain classes. Since it is more difficult to determine spam values in terms of SMS than to determine raw values, models tend to include SMSs in the raw class. This situation is seen in almost every study in the literature except our study. In this study, we used the stacking structure to overcome this problem and solved the problem of convergence that different classifiers would make to certain classes alone within the ensemble structure. In this way, we achieved equal and high performance in all metrics together with the accuracy value.

1 1	C			
Work	Accurac y (%)	Precision (%)	Recall (%)	F-score (%)
LSTM[31]	96.7	89.6	84.2	86.8
1CNN [31]	98.2	97.5	89.2	93.1
2CNN[31]	98.2	98.7	89.0	93.3
3CNN[17]	98.6	97.6	91.8	94.6
Bİ-GRU[16]	99.3	99.2	96.2	97.7
TF-IDF+NB[32]	97.0	97.0	97.0	-
TF-IDF+KNN[32]	91.1	92.0	89.0	-
TF-IDF+RF[32]	97.5	98.0	97.0	-
TF-IDF+DT[32]	96.5	96.0	97.0	-
Xia [30]	96.9	93.6	85.0	-
HMM [22]	95.9	89.2	81.6	-
LSTM[37]	99.0	98.7	99.3	99.2
BiLSTM[52]	98.6	96.9	91.7	94.2
TF-IDF+SMOTE+RF[4]	99.0	99.0	95.0	97.0
CNN[31]	97.9	98.8	85.8	92.2
LSTM[31]	95.3	84.9	77.7	81.1
SmishingDetector+NB[20]	91.6	93.0	92.0	92.0
SmishingDetector+RF[20]	82.3	88.0	82.0	83.0
SmishingDetector+DT[20]	88.2	91.0	88.0	89.0
SGNN[53]	98.01	-	-	-
NB[54]	93.9	89.0	84.0	-
Proposed Model with Original Dataset	98.39	98.39	98.39	98.37
Proposed Model with Sms spam dataset (similar to literature papers)	99.22	99.22	99.22	99.22 (0.004 std)

Although the proposed method has better accuracy, Fscore value and AUC value compared to the studies in the literature, it has inaccurate predictions, especially for the spam class. This is due to the removal of words from some messages due to some pre-processing (especially common word removal), which contributes to efficiency and performance. In this case, spam messages are classified as ham. For this reason, assessing the message context for spam messages is considered to contribute to performance, and context-based machine learning models will be used in the future. Another shortcoming of our model is that although a larger sample set was obtained by combining four different datasets, unlike similar studies, tests were still performed

Table 6. Comparison of classification results of papers in literature and proposed stacking ensemble model

with a limited dataset. In addition, a long preprocessing time is required due to the need for a number of preprocessing steps. In future work, we will focus on applying more practical and less computationally intensive data augmentation methods to solve the class imbalance instead of the SMOTE techniques used in similar work. We will also work on creating a new set of synthetic SMS for a more advanced testbed.

6 Conclusion

SMS is one of the essential communication tools for mobile devices. Therefore, SMS service providers need to design fast and reliable security systems to ensure the security of SMS sending services. In this study, different feature vectors for SMS messages were generated using different text embedding techniques. These vectors were concatenated and used for classification. By concatenating different feature vectors, the aim was to generate more features related to SMS messages and thus increase the classification success. The concatenated vector was tested separately with the UCI, Big NUS, DIT NUS, BEC datasets for different classifiers and the results were evaluated. Furthermore, the results were compared with other studies using the ML technique. In the tests performed with the proposed hybrid feature vector structure and stacking ensemble classifier, an accuracy value of 98.39% is obtained, while the precision, recall and f-score values have the same value. In the UCI dataset, this value increases to 99.22%. It was found that the proposed model has higher accuracy and f-score values than similar studies with very low analysis time per application. Therefore, it is suitable for use on either the client or server side. The model was successful in detecting samples belonging to both spam and benign classes. This work solves important consistency problems in SMS classification with high performance and low analysis speed. The details of the experiments and all the results obtained are presented in the results section. A comprehensive discussion section presents the advantages and disadvantages of the proposed model, along with suggestions for future work.

Future work will focus on faster execution of training and testing and improved classification performance. The speed penalty of working with large feature vectors due to the concatenation of more than one feature set will also be addressed. Experiments will be conducted to ensure the balance between accuracy and speed, and feature selection tests will be performed on feature sets. In addition, other artificial intelligence techniques will be considered along with ML algorithms as classifiers. Research will also be carried out on the pre-processing of interlanguage conversion in studies with languages whose basic structure is not similar to Western languages and whose sentence structure is different. In addition, an attempt will be made to obtain more attributes of SMS with context-based analysis, and classification will be performed with deep learning techniques.

Acknowledgement

This work has been supported by Kayseri University Scientific Research Projects Coordination Unit under grant number #FKB-2022-1092.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 12%

References

- M. Fallgren, T. Abbas, S. Allio, J. Alonso, G. Fodor, L. Gallo, A. Kousaridas, Y. Li, Z. Li, Z. Li, J. Luo, T. Mahmoodi, T. Svensson and G. Vivier, Multicast and broadcast enablers for high-performing cellular V2X systems. IEEE Transactions on Broadcasting, 65 (2), 454-463, 2019. https://doi.org/10.1109/tbc.2019.2912619.
- [2] M. A. Abid, M. F. Mushtaq, U. Akram, B. Mughal, M. Ahmad and M. Imran, Recommending domain specific keywords for Twitter. Advances in Intelligent Systems and Computing, 253-263, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36056-6_25.
- [3] G. M. Duc, L. Manh and D. H. Tuan, A novel method to improve the speed and the accuracy of location prediction algorithm of mobile users for Cellular Networks. Journal of Research and Development on Information and Communication Technology, 2 (36), 113, 2017. https://doi.org/10.32913/mic-ict-researchvn.v2.n36.357.
- [4] M. A. Abid, S. Ullah, M. A. Siddique, M. F. Mushtaq, W. Aljedaani and F. Rustam, Spam SMS filtering based on text features and supervised machine learning techniques. Multimedia Tools and Applications, 81(28), 39853–39871, 2022. https://doi.org/10.1007/s11042-022-12991-0.
- [5] Digital around the world, Global digital insights. https://datareportal.com/global-digital-overview, Accessed 6 May 2023.
- [6] R. S. Arslan, E. Ölmez and O. Er, AFWDroid: Deep Feature Extraction and Weighting for Android Malware Detection. Dicle University Journal of Engineering, 12 (2), 237-245, 2021. https://doi.org/10.24012/dumf.875036.
- [7] M. Tasyurek and R. S. Arslan, RT-Droid: A novel approach for real-time Android application analysis with Transfer Learning-based CNN Models. Journal of Real-Time Image Processing, 20(3), 2023. https://doi.org/10.1007/s11554-023-01311-w.
- [8] R. S. Arslan, FG-Droid: Grouping Based Feature Size Reduction for Android malware detection. PeerJ Computer Science, 8:e1043, 2022. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1043.
- [9] E. M. El-Alfy and A.A. AlHasan, Spam Filtering Framework for multimodal mobile communication based on dendritic cell algorithm. Future Generation Computer Systems, 64, 98-107, 2016. https://doi.org/10.1016/j.future.2016.02.018.
- [10] S. Ballı and O. Karasoy, Development of content-based SMS classification application by using word2vec-

based feature extraction. IET Software, 13(4), 295–304, 2019. https://doi.org/10.1049/iet-sen.2018.5046.

- [11] R. S. Arslan, AndroAnalyzer: Android Malicious Software Detection based on Deep Learning. PeerJ Computer Science, 7:e533, 2021. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.533.
- [12] G. Waja, G. Patil, C. Mehta and S. Patil, How AI can be used for governance of messaging services: A study on spam classification leveraging multi-channel convolutional Neural Network. International Journal of Information Management Data Insights, 3(1), 100147, 2023. https://doi.org/10.1016/j.jjimei.2022.100147.
- [13] Nikolina Cveticanin, What's on the other side of your inbox - 20 spam statistics for 2023. https://dataprot.net/statistics/spam-statistics, Accessed 6 May 2023.
- [14] O. Karasoy and S. Ballı, Spam SMS detection for Turkish language with deep text analysis and deep learning methods. Arabian Journal for Science and Engineering, 47(8), 9361–9377, 2021. https://doi.org/10.1007/s13369-021-06187-1.
- [15] S. Mannheimer, USA text message statistics updated for 2023, SMS Comparison. https://www.smscomparison.com/mass-textmessaging/2021-statistics/, Accessed 6 May 2023.
- [16] T. Xia and X. Chen, Category-learning attention mechanism for short text filtering. Neurocomputing, 510, 15–23, 2022. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.08.076.
- [17] S. Rao, A. K. Verma and T. Bhatia, Hybrid ensemble framework with self-attention mechanism for social spam detection on Imbalanced Data. Expert Systems with Applications, 217, 119594, 2023. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119594.
- [18] W. H. Park, I. F. Siddiqui, C. Chakraborty, N. M. Qureshi and D. R. Shin, Scarcity-aware spam detection technique for Big Data Ecosystem. Pattern Recognition Letters, 157, 67–75, 2022. https://doi.org/10.1016/j.patrec.2022.03.021.
- [19] R. Kiran, P. Kumar and B. Bhasker, OSLCFIT (organic simultaneous lstm and cnn fit): A novel deep learning based solution for sentiment polarity classification of reviews. Expert Systems with Applications, 157, 113488, 2020.

https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113488.

- [20] S. Mishra and D. Soni, SMISHING detector: A security model to detect smishing through SMS content analysis and URL behavior analysis. Future Generation Computer Systems, 108, 803–815, 2020. https://doi.org/10.1016/j.future.2020.03.021.
- [21] S. J. Delany, M. Buckley and D. Greene, SMS spam filtering: Methods and Data. Expert Systems with Applications, 39(10), 9899–9908, 2012. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.02.053.
- [22] T. Xia and X. Chen, A weighted feature enhanced Hidden Markov model for spam SMS filtering. Neurocomputing, 444, 48–58, 2021. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.02.075.

- [23] S. Abiramasundari, V. Ramaswamy and J. Sangeetha, Spam filtering using Semantic and Rule Based model via supervised learning. Annals of the Romanian Society for Cell Biology, 25(2), 3975-3992, 2021.
- [24] S. Bhatnagar and A. Kumar, A rule-based classification of Short Message Service Type. 2018 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC), pp. 1-4, Coimbatore, India, 2018. https://doi.org/10.1109/icisc.2018.8398982.
- [25] T. Xia, A constant time complexity spam detection algorithm for boosting throughput on rule-based filtering systems. IEEE Access, 8, 82653–82661, 2020. https://doi.org/10.1109/access.2020.2991328.
- [26] M. Novo-Lourés, D. Ruano-Ordás, R. Pavón, R. Laza, S. Gómez-Meire and J. R. Méndez, Enhancing representation in the context of multiple-channel spam filtering. Information Processing & Management, 59(2), 102812, 2022. https://doi.org/10.1016/j.ipm.2021.102812.
- [27] S. D. Gupta, S. Saha and S. K. Das, SMS SPAM detection using machine learning. Journal of Physics: Conference Series, 1797(1), 012017, 2021. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1797/1/012017.
- [28] V. Gupta, A. Mehta, A. Goel, U. Dixit and A. C. Pandey, Spam Detection Using Ensemble Learning. Harmony Search and Nature Inspired Optimization Algorithms, 661–668, 2018. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0761-4_63.
- [29] O. Abayomi-Alli, S. Misra, A. Abayomi-Alli and M. Odusami, A review of soft techniques for SMS SPAM classification: Methods, approaches and applications. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 86, 197–212, 2019. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.08.024.
- [30] T. Xia and X. Chen, A discrete hidden Markov model for SMS spam detection. Applied Sciences, 10(14), 5011, 2020. https://doi.org/10.3390/app10145011.
- [31] P. K. Roy, J. P. Singh and S. Banerjee, Deep learning to filter sms spam. Future Generation Computer Systems, 102, 524–533, 2020. https://doi.org/10.1016/j.future.2019.09.001.
- [32] N. N. A. Sjarif, N. F. M Azmi, S. Chuprat, H. Sarkan, Y. Yahya and S.M. Sam, SMS SPAM message detection using term frequency-inverse document frequency and random forest algorithm. Procedia Computer Science, 161, 509–515, 2019. https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.11.150.
- [33] X. Liu, H. Lu and A. Nayak, A Spam Transformer Model for SMS Spam Detection. IEEE Access, 9, 80253-80263, 2021. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3081479.
- [34] O. M. Ebadati and F. Ahmadzadeh, Classification spam email with elimination of unsuitable features with hybrid of ga-naive Bayes. Journal of Information and Knowledge Management, 18(01), 1950008, 2019. https://doi.org/10.1142/s0219649219500084.
- [35] C. Zhao, Y. Xin, X. Li, Y. Yang and Y. Chen, A heterogeneous ensemble learning framework for SPAM detection in social networks with Imbalanced

Data. Applied Sciences, 10(3), 936, 2020. https://doi.org/10.3390/app10030936.

- [36] Y. Hong, Q. Liu, S. Zhou and Y. Luo, A spam filtering method based on multi-modal fusion. Applied Sciences, 9(6), 1152, 2019. https://doi.org/10.3390/app9061152.
- [37] G. Jain, M. Sharma and B. Agarwal, Optimizing Semantic LSTM for spam detection. International Journal of Information Technology, 11(2), 239–250, 2018. https://doi.org/10.1007/s41870-018-0157-5.
- [38] U. Srinivasarao and A. Sharaff, Machine intelligence based hybrid classifier for spam detection and sentiment analysis of SMS messages. Multimedia Tools and Applications, 82, 31069-31099, 2023. https://doi.org/10.1007/s11042-023-14641-5.
- [39] G. Jain, M. Sharma and B. Agarwal, SPAM detection on social media using semantic convolutional neural network. International Journal of Knowledge Discovery in Bioinformatics, 8(1), 12–26, 2018. https://doi.org/10.4018/ijkdb.2018010102.
- [40] A. Sharaff, C. Kamal, S. Porwal, S. Bhatia, K. Kaur and M. M. Hassan, SPAM message detection using danger theory and krill herd optimization. Computer Networks, 199, 108453, 2021. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108453.
- [41] Gazal and K. Juneja, Two-phase fuzzy feature-filter based hybrid model for Spam Classification. Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, 34(10), 10339–10355, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2022.10.025.
- [42] SpamAssassin, Apache Software Foundation. https://spamassassin.apache.org/, Accessed 01 January 2025.
- [43] R. S. Arslan, Kötücül web sayfalarının tespitinde doc2vec modeli ve makine öğrenmesi yaklaşımı. European Journal of Science and Technology, 27, 792-801, 2021. https://doi.org/10.31590/ejosat.981450.
- [44] R. S. Arslan, Kötücül URL filtreleme için derin öğrenme modeli tasarımı. European Journal of Science and Technology, 29, 122-128, 2021. https://doi.org/10.31590/ejosat.1011961.
- [45] T. A. Almeida, J. M. G. Hidalgo and A. Yamakami, Contributions to the study of SMS Spam Filtering. Proceedings of the 11th ACM Symposium on Document Engineering, pp. 259-262, California, USA, 2011. https://doi.org/10.1145/2034691.2034742.

- [46] G. V. Cormack, J. M. G. Hidalgo and E. P. Sánz, Spam filtering for short messages. Proceedings of the Sixteenth ACM Conference on Conference on Information and Knowledge Management, pp. 313-320, New York, USA, 2007 . https://doi.org/10.1145/1321440.1321486.
- [47] M. T. Nuruzzaman, C. Lee and D. Choi, Independent and personal SMS spam filtering. 2011 IEEE 11th International Conference on Computer and Information Technology, pp. 1-7, Paphos, Cyprus, 2011. https://doi.org/10.1109/cit.2011.23.
- S. Rao, A. K. Verma and T. Bhatia, A review on Social Spam Detection: Challenges, open issues, and Future Directions. Expert Systems with Applications, 186, 115742, 2021. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115742.
- [49] O. N. Akande, O. Gbenle, O. C. Abikoye, R. G. Jimoh, H. B. Akande, A. O. Balogun and A. Fatokun, SMSPROTECT: An automatic smishing detection mobile application. ICT Express, 9(2), 168–176, 2023. https://doi.org/10.1016/j.icte.2022.05.009.
- [50] Q. Le and T. Mikolov, Distributed Representations of Sentences and documents, International conference on machine learning, pp. 32(2):1188-1196, Beijing, China, 2014.
- [51] M. V. C. Aragão, E. P. Frigieri, C. A. Ynoguti and A. P. Paiva, Factorial design analysis applied to the performance of SMS anti-spam filtering systems. Expert Systems with Applications, 64, 589–604, 2016. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.08.038.
- [52] O. Abayomi-Alli, S. Misra, A. Abayomi-Alli and M. Odusami, A deep learning method for automatic sms spam classification: Performance of Learning Algorithms on Indigenous Dataset. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 34(17), 1-15, 2022. https://doi.org/10.1002/cpe.6989.
- [53] W. Pan, J. Li, L. Gao, L. Yue, Y. Yang, L. Deng and C. Deng, Semantic Graph Neural Network: A conversion from spam email classification to Graph Classification. Scientific Programming, 2022:6737080, 1–8, 2022. https://doi.org/10.1155/2022/6737080.
- [54] H. H. Mansoor and A. P. Shaker, Using classification techniques to SMS spam filter. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 8(12), 1734–1739, 2019. https://doi.org/10.35940/ijitee.13206.1081219.



NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 701-711



Niğde Ömer Halisdemir Üni**ver**sitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araștırma makalesi / Research article

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



Kentsel büyümenin vektör hücresel otomat yaklaşımı ile yüksek çözünürlüklü modellenmesi

Modelling urban growth in high resolution employing vector cellular automata approach

Ahmet Emir Yakup^{1*} , İsmail Ercüment Ayazlı²

^{1.2} Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 58070, Sivas, Türkiye ¹ Hitit Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 19500, Çorum, Türkiye

Öz

Bu çalışma, coğrafi veri madenciliği (CVM) ile bütünleşik çalışan, vektör hücresel otomat (V-HO) tabanlı kentsel simülasyon modeli (KBSM) geliştirmeyi büyüme amaçlamaktadır. Coğrafi nesnelerin gerçek geometrilerini daha doğru şekilde temsil eden V-HO modelinin KBSM çalışmalarında kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Ancak raster tabanlı HO algoritmasına kıyasla, vektör veri yapısının karmaşıklığı ve düzensizliği, V-HO modellerinin uygulanmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle esnek komsuluk ve hücresel işlerliğin sağlanmasındaki kısıtlılıkları aşmak amacıyla büyüme vektörleri (BV) yöntemi önerilmiştir. Modelde, arazi örtüsü/kullanımı değişimlerini etkileyen mekânsal ve zamansal dinamikler Rastgele Orman (RO) algoritması ile analiz edilmiştir. Çalışma alanı olarak İstanbul'un Sancaktepe ilçesi seçilmiş, parsel seviyesinde arazi örtüsü/kullanımı değisimleri simüle edilerek %86 doğruluk oranı elde edilmistir. Bulgularımız. vektör veri vapisinin esnekliğinden yararlanılarak daha verimli, dinamik, doğru ve yüksek çözünürlükte simülasyonlar oluşturulabileceğini göstermektedir. 2040 yılına ait simülasyon sonuçları, mevcut kentleşme eğilimlerinin devam etmesi durumunda tarım alanlarında %25, orman alanlarında %3 ve açık arazilerde %21 oranında kayıplar yaşanabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Vektör Hücresel Otomat, Simülasyon, Arazi Örtüsü/Kullanımı Değişimi, Coğrafi Bilgi Sistemleri

1 Giriş

Hızlı ve kontrolsüz kentsel büyüme, doğal kaynakların tükenmesine, ekosistemlerin bozulmasına, yetersiz kentsel altyapıya ve yaşam kalitesinin düşmesine neden olmuştur. Bu bağlamda, arazi örtüsü/kullanım değişikliklerinin izlenmesi, kentsel büyümenin fiziksel, çevresel ve sosyoekonomik etkilerini azaltmaya yönelik stratejilerin araştırılması ve geliştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Kentsel büyümeyi simüle etmek için kullanılan HO modelleri, hem mekansal hem de hesaplama kabiliyeti açısından oldukça verimli oldukları için, kentsel sistemlerin kendi kendini organize etme, kendine benzerlik, mekansalzamansal dinamikler ve doğrusal olmayan davranışlar gibi

Abstract

This paper aims to create a vector cellular automata (V-CA)-based urban growth simulation model (UGSM) integrated with geographic data mining (GDM). V-CAbased models, which more accurately represent the actual geometries of geographic objects, are becoming prevalent in UGSM studies. However, compared to the raster-CA algorithm, the complexity and irregularity of the vector data structure make implementing V-CA models difficult. Therefore, the growth vectors (GV) method suggests overcoming the limitations of flexible neighborhood and cellular operability. The model examines the spatiotemporal dynamics driving land cover/land use changes with the Random Forest (RF) algorithm. Istanbul's Sancaktepe district was selected as the study area, achieving an 86% accuracy rate in simulating land cover/use changes at the parcel level. Our findings demonstrate that vector data structure's flexibility allows more efficient, dynamic, accurate, and high-resolution UGSMs. Simulation results for 2040 indicate that if current urbanization trends continue, agricultural areas could lose 25%, forest areas 3%, and open lands 21%.

Keywords: Vector Cellular Automata, Simulation, Land Cover/Use Change, Geographical Information Systems

karmaşık özelliklerini etkili bir şekilde analiz edebilmektedir [1–3].

Düzenli yapıya sahip raster tabanlı HO modelleri, kentsel alanlardaki düzensiz, parçalı ve tutarsız geometrik nesnelerin oluşturduğu karmaşık arazi örtüsü/kullanım değişimlerini doğru bir şekilde yakalamakta zorlanabilir [4]. V-HO'da hücreler kentsel gelişim, planlama ve arazi politikasının temel birimleridir ve kentsel büyüme bu hücrelere bağlı olarak arazi örtüsü/kullanımındaki değişimleri ifade eder [4]. Her hücre benzersiz olduğundan, dönüşüm kuralları belirlenirken komşuluk faktörleri ve etkileri daha esnek bir şekilde tanımlanabilir [5].

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: emiryakup@hitit.edu.tr (A. E. Yakup) Geliş / Received: 27.01.2025 Kabul / Accepted: 17.03.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngumuh.1627880

Uygun hücre boyutunun seçilmesi raster HO için bir diğer önemli konudur, çünkü daha büyük hücre boyutu mekansal doğruluğu ve veri hacmini azaltmaktadır [6]. Vektör verilerin kullanılması coğrafi nesnelerin daha gerçekçi bir şekilde temsil edilmesini sağlar [7]. V-HO algoritmasında, arazi örtüsü/kullanımı gibi her bir nesne, komsuluk iliskilerinden etkilenen cokgenlerle geometrik olarak temsil edilir. Nesnelerin zaman icindeki durum değişiklikleri bir dönüşüm fonksiyonu tarafından belirlenir [8]. Mekansal nesnelerin geometrisi ve öznitelikleri V-HO modelindeki hücrelere eklenebilir. Bu sayede modelin dönüşüm kuralları, arazi örtüsü/kullanımı değişiminin mekansal-zamansal dinamiklerini göz önünde bulundurarak türetilebilir. V-HO modelinde komşuluk, her bir coğrafi nesne üzerindeki etki bölgesi olarak tanımlanır ve komşular, etki bölgesi içinde yer alan coğrafi nesnelerdir [9].

Minimum alan birimi olarak düzenli hücrelerin kullanılması nesnelerin basitleşmesine ve model çıktılarının hücre boyutuna duyarlı hale getirebilir. Ülkemizde planlama uygulamalarında birim olarak mevcut kadastro parselleri baz alınmaktadır. Bu durum sadece bir ölçek sorunu değildir, modelde referans alınan birimin daha gerçekçi temsil edilmesidir. V-HO algoritmasının parsel bazında işlem yapabilme kabiliyeti sayesinde yüksek çözünürlüklü [10]. yıllarda modeller kurulabilmektedir Son gerçekleştirilen araştırmalar raster HO yerine V-HO'un kullanılması kentsel büyüme simülasyon doğruluğunun önemli ölcüde arttığını göstermiştir [11–13].

İlk V-HO temelli KBSM çalışmaları voronoi çokgenleri [14] ve delenuay üçgenlemesi [15] ile geliştirilmiştir. Fakat çokgenler otomatik oluşturulmakta ve gerçek coğrafi nesneler ile uyuşmamaktaydı. Parsel bazında V-HO algoritmasının ilk uygulaması, Kanada'nın Quebec bölgesinde VecGCA modeliyle gerçekleştirilmiş ve literatürde öncü bir örnek olarak gösterilmiştir [8]. Çin'deki bir dizi çalışma, V-HO'nun KBSM'inde pratik ve uygulanabilir bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur [12,16–18]. Madrid'de ise çizge teorisi, V-HO algoritmasına entegre edilerek hesaplama süresinin optimize edilmesi ve algoritmanın işlerliği incelenmiştir [7]. Günümüzde model kalibrasyon aşamasına yönelik V-HO ile CVM algoritmalarının birlikte kullanımı ön plana çıkmıştır [12,13,19].

Veri madenciliği, büyük veri kümelerinden anlamlı bilgi ve desenler elde etmek için istatistiksel analiz, yapay zeka ve makine öğrenimi tekniklerinin kullanıldığı bir süreçtir. CVM ise, mekansal-zamansal verilerdeki gizli desenleri ve iliskileri kesfetmek amacıyla bu teknikleri coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ile birlestirir [20-22]. V-HO algoritmasında dönüşüm kurallarının madenciliği kritik öneme sahiptir; ancak düzensiz yapı, bu kuralların belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Dönüşüm kuralları, arazi örtüsü/kullanımları ile mekansal-zamansal dinamikler arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri ifade etmektedir [13]. Raster HO'da kullanılan CVM yöntemleri, V-HO modellerinde de dönüşümleri belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, RO yöntemi hem raster HO hem de V-HO modellerinde dönüşüm kurallarının belirlenmesinde sıklıkla uygunlanmıştır [4,12]. Bu çalışma

kapsamında geliştirilen modelin kalibrasyon aşamasında hızlı ve yüksek doğrulukla çalışma özelliklerinden dolayı RO algoritması tercih edilmiştir.

Çalışmanın temel amacı, kentsel büyümenin neden olduğu arazi örtüsü/kullanımı değişimlerinin, vektör veri yapısı ile çalışan V-HO temelli KBSM ile belirlenmesidir. Bu doğrultuda parsel bazlı çalışabilen yeni bir V-HO temelli KBSM geliştirilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen modelin amacı, vektör veri yapısını kullanarak düzensiz, esnek ve dinamik hücresel işlerliği sağlamak ve bunu büyüme vektörü (BV) adı verilen yeni bir hesaplama katmanı aracılığıyla gerçekleştirmektir. Bu yaklaşımla, arazi ve hesaplama yüzeylerinin ayrıştırılması sayesinde hesaplama süresinin azaltılması ve aralarındaki dönüşümlerin mümkün kılınması hedeflenmiştir. Ayrıca, BV'ler ve CVM algoritması aracılığıyla yeni dinamik komşuluk ve dönüşüm kuralları yapılandırılmıştır.

Çalışma alanı olarak 2008 yılında üç beldenin birleştirilmesi ile oluşan ve yaşanan hızlı nüfus artışı neticesinde kentleşme faaliyetlerinin yoğun olduğu İstanbul'un Sancaktepe ilçesi seçilmiştir. Modelin girdi verileri arazi örtüsü, erişebilirlik, uygunluk ve planlama başlıklarında toplanmaktadır. Arazi örtüsü/kullanımı verisi parsel bazlı olarak 2001, 2014 ve 2024 dönemleri için Tapu ve Kadastro Müdürlüğünden alınan kadastro haritalarından ve bu dönemlere ait tescile konu olmayan alanlar uydu görüntüleri ile giderilmiştir. Erişebilirlik verileri 2001, 2013 ve 2024 dönemleri için Open Street Map (OSM) açık kaynak web servisinden ve İstanbul Büvüksehir Beledivesi (İBB)'den temin edilmiştir. Topografik uygunluk için ihtiyaç duyulan sayısal yükseklik modeli (SYM) Harita Genel Müdürlüğünden (HGM) alınan raster yapıda SYM-12 ürününden karşılanmıştır. Planlama verileri bölgenin 1000 ölçekli onaylı uygulama imar planı ile oluşturulmuştur. Model tamamen günümüzde CBS için yaygın kullanılan açık kaynak nesne yönelimli programlama dili olan Python ortamında geliştirilmiştir. V-HO modelinin kalibrasyon aşamasında, bölgedeki geçmiş kentleşme eğilimleri ve mekansal-zamansal dinamiklerinin etkileri RO algoritması ile belirlenmektedir.

Çalışma, vektör veri yapısıyla çalışabilen bir V-HO temelli KBSM geliştirmeyi, BV yaklaşımının hücresel işlerlik sağlamadaki hesaplamalı ve operasyonel uygulanabilirliğini doğrulamayı, bütünleşik RO-VHO algoritması ile bir kalibrasyon prosedürü oluşturmayı, modeli Sancaktepe İlçesi üzerinde test ederek 2040 yılı için bir KBSM geliştirmeyi ve bölgedeki arazi örtüsü/kullanım değişimlerini belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda 2001'den 2014'e kadar üretilen BV'ler RO-VHO algoritması ile eğitilmiş ve F1 skor metriği ile değerlendirilmistir. Doğrulama asamasında 2014'den 2024 yılına kadar KBSM'ler oluşturulmuş ve alıcı işletim karakteristliği (ROC) eğrisi üretilmiş ve eğrinin altında kalan alan (AUC) değeri hesaplanmıştır. Simülasyon aşamasında 2040 yılına kadar bölgedeki mevcut kentleşme eğilimlerinin devam edeceği senaryosu ile KBSM üretilerek arazi örtüsü/kullanımı değişimlerini belirlenmiştir.

Makale dört bölümde düzenlenmiştir: giriş bölümünde çalışmanın kavramsal çerçevesi, amacı, literatür ve özgün değeri sunulmaktadır. İkinci bölümde çalışmanın metaryal ve yöntemleri açıklanmıştır. Bu bölümde, geliştirilen V-HO temelli modelin iş akışı, modelin kalibrasyon süreci ve doğrulama aşamaları ile çalışma alanı ve veri işleme adımları ele alınmaktadır. Üçüncü bölümde modelin çalışma alanında uygulanması ile elde edilen bulgular özetlenmektedir. Makale sonuçlar ve tartışma bölümü ile tamamlanmıştır.

2 Materyal ve Metot

2.1 V-HO temelli KBSM

V-HO temelli KBSM, kentsel büyümenin neden olduğu arazi örtüsü/kullanımı değişimlerini simüle etmektedir. Model nesne yönelimli programlama dili olan Python ile geliştirilmiştir. Python ortamında açık kaynak mekansal analiz (OGR, Geopandas, Rasterio, Scikit-learn) ve yerleşik kütüphanelerin (Build-In) kullanımı sayesinde yazılım kısıtlamalarından kaçınmak ve esnekliğin sağlanması amaçlanmıştır. Model başlangıcı için ihtiyaç duyulan değişkenler oluşturulan senaryo dosyasında yapılan belirtmeler ile tanımlanabilmektedir.

V-HO temelli KBSM; kalibrasyon ve simülasyon olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Model başlangıçta datum, projeksiyon, senaryo dosyasındaki değişkenler ve girdi verilerinin uygunluğu denetlemektedir. Böylece model, çalışmaya başlamak için ihtiyaç duyduğu veri ve kontrol değişkenleri etmektedir. Gecmis büyüme karakteristliğinin belirlenmesi için kalibrasyon aşamasına geçilmektedir. Son olarak simülasyon kısmında KBSM oluşturulmaktadır. Model, arazi parçalarını vektör veri yapısına sahip çokgenler olarak temsil etmektedir. Her bir çokgen, hücre olarak temsil edilmekte ve düğüm-kenar yapısına indirgenmektedir. Bu yapı modelin temel büyüme döngüsündeki hesaplama katmanını oluşturmakta ve bir sonraki döngüde kentleşecek hücreleri belirlemektedir.

Model KEUB yapısına dayanan dört faktörü içeren bir eşitliği kullanır [23].

$$PE_i^t = \left(\sum_{j=1}^n K_{i,j}\right) E_i U_i B_i \tag{1}$$

Denklem (1)'de K komşuluk, E erişebilirlik, U uygunluk ve planlama B harfleri ile belirtilmiştir. Dört etken faktörden her biri parsel düzeyinde bir tekil değer almaktadır.

Komşuluk, mekanın etkileşimini tanımlamaktadır. Sadece hangi parsellerin komşular olduğunu tanımlamaz, aynı zamanda komşu arazi örtüsü sınıfının etkisini ölçer. Etken parametrelerden bir diğeri erişebilirliktir. Farklı bir ifade ile yol ağına olan yakınlıktır. Kentsel alanlar yüksek kapasiteli bir ulaşım ağına ihtiyaç duymaktadır. Uygunluk, bir parselin bir arazi kullanımına sahip olabilmesi için doğal veya yapısal kapasitesidir. Bu parametrede sıklıkla, yükseklik, eğim, bakı veya jeolojik yapı gibi çeşitli değişkenler dahil edilir. Komşuluk, erişebilirlik ve uygunluk, parsellerin coğrafi ve fiziksel özelliklerine bağlıdır. Planlama parametresi ise yasal özellikleriyle ilişkilidir. Planlama durumu, parsellerin taşınmaz hukuku, üst ve alt ölçekli planlar kapsamında yasal durumlarını belirtmektedir. Parselin plan ve yasal düzenlemelerden gelen hak ve kısıtlılıklarının modele dahil edilmesini sağlamaktadır.

Wolfram [24], HO'nun beş temel bileşenini tanımlamıştır: kafes alanı (grid network), komşuluk, dönüşüm kuralları, zaman ve durum. Modelde, HO teorisini vektör veri yapısıyla uyumlu ve birlikte çalışabilir hale getirmek icin kafes alanı ve komsuluk bilesenlerinde düzenlemeler vapılmıştır. Kafes alanını oluşturan düzenli birimler hücre olarak temsil edilir. Bu yapı, raster veri vapısıyla doğrudan uyumlu olmasına rağmen, kentsel yapı düzenli eşit hücrelerden değil, bir dizi düzensiz geometriden oluşmaktadır [5,25]. Bu nedenle V-HO KBSM, minimum alan birimi (hücre) olarak parsel geometrilerini baz almaktadır. Her bir hücre farklı arazi örtüsü/kullanımı tipini, komşuluk ilişkisini ve dönüşüm kuralını taşımaktadır.

Komşuluk bileşeni, hücre durumlarının bir sonraki nesilde dönüşümlerini belirlemektedir. Von Neuman (4 hücre) ve Moore (8 hücre) komşulukları, komşuluk ilişkilerini tanımlamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak yalnızca düzenli yapıda bitişik hücrelerin benzer ağırlıkta olan etkisi değerlendirilmektedir. Bir hücrenin durumunu mesafe ve mevcut durumunun fonksiyonu olarak değiştiren bir komşuluk ilişkisi, kentsel büyüme süreçlerini simüle ederken daha gerçekçi olmaktadır [26,27]. Moore veya Von Neumann gibi düzenli komşuluk ilişkilerinin bu modelde uygulanması mümkün değildir. V-HO modelinde her bir hücre belli bir etki alanına sahiptir ve etki alanına denk gelen coğrafi nesneler komsu hücre olarak tanımlanır. Oluşturduğumuz komşuluk belirleme fonksiyonu, hücrelerin (cokgen) kenarlarına tampon (buffer) analizi uvgulamakta ve olusan tampon alan ile kesisim (intersection) analizi gerçekleştirmektedir. Modelde BV ismini verdiğimiz hesaplama katmanı oluşturularak komşuluk yapılanması sağlamıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Büyüme Vektörleri

Parsellere ait çokgenler ve öznitelikleri nokta-düğüm yapısına soyutlanarak BV'ler elde edilir. Her bir düğüm kendisine ilişkin öznitelik bilgilerini (arazi örtüsü, uygunluk, planlama, komşuluk ve çokgene dair tanımlayıcı bilgiler) depolamaktadır. Komşu düğümler arasında oluşan kenarlar, iki düğüm arasındaki mekansal etkileşimi tanımlamaktadır. Bir BV iki düğüm bir kenardan oluşmaktadır. BV'leri oluşturan düğümlerin arazi örtüsü tipine bağlı olarak yönleri vardır. Eğer bir BV'nin başlangıç düğümü kent (U) tipinde ve kırsal (N) nitelikte bir düğüme bağlanıyorsa yönü UN olarak etiketlenir. Kentsel ve kırsal olarak ikili bir kombinasyona göre modelde; NU, UN, NN, UU dört farklı etiket kullanılır.

BV kenar uzunluk verilerinin, kentlesmeye etken olası azami tekil mesafe değerini tespit etmek amacıvla gamma dağılımı kullanılmıştır. Gamma dağılımı iki parametre ile tanımlanır bunlar; şekil (α) ve ölçektir (β) [28]. Mesafe verilerinin gamma dağılımına uygunluğunu değerlendirmek amacıyla Kolmorov-Smirnov (KS) testi uygulanmıştır. Gözlemlenen (ölçülen-hesaplanan) uzunlukların kümülatif dağılımı $(\widehat{F}_n(x))$ ile teorik kümülatif dağılım $(F_{gamma}(x; \alpha, \beta))$ arasındaki en büyük mutlak farkı ölçer; bu fark, KS istatistiği olarak adlandırılır. Burada D_n , KS test istatistiğidir ve Denklem (2)'deki gibi ifade edilir [29]:

$$D_n = \frac{\max}{1 \le i \le n} \left| \hat{F}_n(x_i) - F_{gamma}(x_i; \alpha, \beta) \right|$$
(2)

Eğer test sonucunda elde edilen KS istatistiğinin anlamlılık düzeyi 0,05 değerinden büyük ise, veri setinin gamma dağılımına uygun olduğu kabul edilir [30]. En olası azami mesafe değeri (d_{max}) , dağılımın Denklem (3)'te belirlenen noktasına denk gelen mesafe değeri olarak belirlenir.

$$d_{max} = loc + \alpha \times \beta \tag{3}$$

Düzensiz yapı nedeniyle her bir hücrenin komşuları, hücre büyüklüğü ve arazi örtüsü sınıfına göre birbirinden farklı sayıda ve etkide olmaktadır. Komşu hücrelerin etkisini hesaplamak için, arazi örtüsü sınıfına, d_{max} değerine ve komşu hücre arasındaki mesafeye göre bir çekme veya itme değeri (E_{ij}) sağlayan üçüncü dereceden polinomal (küreselgaussian) fonksiyon kullanılmıştır. Bu fonksiyon tüm kenarlara uygulanır.

Denklem (4)'te P_i^t seçilen hücrenin t zamanında kentleşme potansiyelini, PE_i^t etken parametrelere dayalı olarak hücrenin dönüşüm olasılığı, K_i^t seçilen i hücresinin komşuluk etkileşimlerine dayalı dönüşüm olasılığıdır. Rassal değişken (RD) hesaba katılamayan sonsuz sayıdaki etken faktörü (stokastik faktör) temsil eden parametredir.

$$P_i^t = PE_i^t \times K_i^t \times RD \tag{4}$$

Denklem (5)'te kenarı oluşturan düğümlerin (Pi, Pj) ve kenarın (Eij) skorları çarpılarak sonuç kentleşme skoru (Pij) elde edilmektedir.

$$P_{ij} = P_i \times P_j \times E_{ij} \tag{5}$$

Tüm aşamalarda modelin en temel işlem birimi olan büyüme döngüsü çalışmaktadır. Bir büyüme döngüsü bir tekil yıla denktir. Her bir iterasyonda dört aşama vardır ve bu aşamalar sırasıyla birbirini izlemektedir (Şekil 2). Hem kalibrasyon hem de simülasyon aşamalarında çalışan fonksiyondur.



Şekil 2. Büyüme Döngüsü

Büyüme döngüsündeki kentleşme tahmini aşaması Şekil 3 ile sunulmuştur. Karar aşaması bir sonraki yılda kentleşecek parsel geometrilerinin belirlendiği aşamadır. Hesaplanan dönüşüm skorları değerlendirilir ve kalibrasyon aşamasında elde edilen Rastgele Orman modeli ile tahminler gerçekleştirilir.



2.2 Rastgele Orman algoritması ile model kalibrasyonu

RO denetimli öğrenme algoritmaları arasında yer alan güçlü bir topluluk yöntemidir [31]. RO, karar ağaçlarının (decision trees) bir koleksiyonudur ve ağaçların her biri bağımsız olarak eğitilir. Sonuç olarak, her bir ağaç sınıflandırma problemi için tahminlerde bulunur ve nihai sonuç, ağaçların oy çoğunluğuna göre belirlenir. Karmaşık veri setleriyle çalışabilme ve parametreler arasındaki ilişkileri keşfetme yeteneği sayesinde kentsel büyüme ve arazi örtüsü/kullanımı değişikliklerini modellemek için sıklıkla tercih edilmektedir [32–36].

Bir veri seti $D = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^n$ olmak üzere, burada x_i girdi öznitelik vektörü ve y_i çıktı etiketidir. Ormanın B sayıda karar ağacından oluştuğunu varsayılırsa, her ağaç veri

setinin rastgele bir örneklemesini $(D_b \subseteq D)$ kullanır. Her düğümde, rastgele olarak seçilen öznitelikler $(M_b \subseteq M)$ arasından en iyi bölmeyi bulan karar ağacı oluşturulur. Her bir ağaç b, bir girdi vektörü (x) için bir tahmin $h_b(x)$ üretir. Denklem (6)'da belirtildiği üzere her bir ağacın tahmin ettiği sınıf etiketi bir oy olarak düşünülür ve en fazla oyu olan sınıf nihai tahmin olarak seçilir.

$$\hat{y} = mod(\{h_1(x), h_2(x), \dots, h_b(x)\})$$
(6)

RO tahminlerin olasılık değerlerini de hesaplayabilmektedir. Denklem (7)'de sunulan sınıf olasılıklarının hesaplanması eşitliğinde c, olası sınıflardan herhangi birisini temsil eder. Farklı bir ifade ile tahminlenen kategorik çıktı değerlerinden biridir. Olasılık değeri modelin karar prosedüründe arazi örtüsü/kullanımı dönüşüm potansiyeli olarak kullanılır.

$$\hat{p}(y=c \mid x) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^{B} I(h_b(x) = c)$$
(7)

Kalibrasyon aşamasında iki adımlı bir doğrulama uygulanmıştır. İlk adımda Denklem (12) ile hesaplanan F1 skoru ile RO algoritmasının uygunluğu değerlendirilmiştir. İkinci aşamada eğitim modeli ile 2024 yılı için V-HO temelli KBSM ile simüle edilen arazi örtüsü verileri ile bilinen arazi örtüsü verileri karşılaştırılarak ROC eğrisi çizdirilmiş ve AUC değeri hesaplanmıştır.

Bu aşamada Gerçek Pozitif Oran (True Positive Rate, GPO) ve Yanlış Pozitif Oran (False Positive Rate, YPO) metriklerinin Denklem (8) ve Denklem (10) ile hesaplanması gerekmektedir. Hesaplamaların yapılabilmesi için modelde bir karşıtlık (confusion) matrisi oluşturulması zorunludur. Bu matris, tahmin edilen ve gerçek durumları içeren dört temel ölçütü içerir: GP (Gerçek Pozitif), GN (Gerçek Negatif), YP (Yanlış Pozitif) ve YN (Yanlış Negatif). GP, modelin kent olarak doğru tahmin ettiği alanların sayısını, YN ise kent dısı olarak doğru tahmin edilen alanları ifade eder. YP, kent dışı olarak tahmin edilen fakat gerçekte kent olan alanları, YN ise kent olarak tahmin edilen fakat gerçekte kent dışı olan alanları gösterir. GPO değeri, kent olarak kestirilen detayların ne kadar doğru olduğunu ifade ederken; YPO, kent olmayan ancak kent olarak yanlış kestirilen alanların bir ölçütüdür. Çalışmada kullanılan kesinlik, Denklem (9) ve doğruluk ise Denklem (11) ile hesaplanmaktadır.

$$GPO = Duyarlılık = GP/(GP + YN)$$
(8)

$$Kesinlik = GP/(GP + YP)$$
(9)

$$YPO = YP/(YP + YN) \tag{10}$$

$$Doğruluk = (GP + GN)/(GP + YP + GN + YN)$$
(11)

$$F1 Skor = 2 \times \frac{Kesinlik \times Duyarlılık}{Kesinlik + Duyarlılık}$$
(12)

ROC eğrisi, dikey eksende GPO'yu, yatay eksende YPO'yu temsil eder. Belirli bir eşik değeri altında GPO'ya karşılık gelen YPO noktaları birleştirilir ve eğrinin altında kalan alan (AUC) hesaplanır. AUC değeri, modelin tahmin doğruluğunu ölçmek için kullanılır; AUC değeri 0,5'e yaklaştığında modelin simülasyon doğruluğu düşmekte, 1'e yaklaştıkça ise tahmin doğruluğu artmaktadır

2.3 Veri ve çalışma alanı

Çalışma alanı İstanbul Sancaktepe İlçesi, 2008 yılında idari düzenlemeyle Yenidoğan, Sarıgazi, Samandıra beldelerinin birleştirilmesi ile ilçe statüsü kazanmıştır. İlçe, 1950'lerden günümüze kırdan kente göç, hızlı nüfus artışı, ulaşım ve altyapı yatırımlarının etkisi ile hızlı bir kentleşme yaşamıştır [37].

2008 yılında 229.093 nüfusla kurulan Sancaktepe İlçesi, 15 yılda 492.804 nüfusa ulaşarak yaklaşık %115 oranda artış yaşamıştır [38]. Son yıllarda yoğun imar faaliyetleri sonucunda kentleşme baskısının ilçenin Paşaköy, Kuzudere Devlet Ormanı ve eski askeri alanlarında süregelmesi tahmin edilmektedir [39]. Sancaktepe dinamik bir kentleşme sürecine sahip olması ve kent çeperindeki yoğun imar faaliyetleri nedeniyle VHO temelli KBSM için ideal bir çalışma sahası olarak seçilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Çalışma alanı

V-HO temelli KBSM oluşturulabilmesi için en az iki dönem arazi örtüsü/kullanımı, en az iki dönem erişebilirlik, bir dönem eğim, bir dönem planlama verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Dönem sayıları projenin amacına göre çoğaltılabilmektedir. Bu makalede İstanbul'un Sancaktepe İlçesine ait kadastro haritalarından üç dönem arazi örtüsü/kullanımı, iki dönem erişebilirlik, bir dönem eğim, bir dönem planlama ve idari sınır verisi üretilerek coğrafi veritabanına aktarılmıştır (Tablo 1).

Çalışmada kullanılan arazi örtüsü/kullanımı verileri parsel bazında üretilmiştir. 2001 ve 2014 dönemleri 112K469 numaralı TÜBİTAK projesinde üretilen verilerden, güncel parsel geometrileri ve öznitelikleri ise TKGM Mekansal Gayrimenkul Sistemi (MEGSİS) uygulamasından elde edilmiştir. Kentsel alan, tarım, orman ve ham toprak olmak üzere dört farklı sınıf belirlenmiştir. Tescile konu olmayan alanlar uydu görüntüleri vasıtası ile giderilmiştir. Dönemler kadastro paftası üretim tarihleri ve imar uygulamalarının yoğunluğu değerlendirilerek belirlenmiştir.

Tablo 1. Çalışmada Kullanılan Veriler

Veri	Kaynak Veri Türü	Dönem	Kaynak	Veri Yapısı
Arazi	Kadastral	2001		
Örtüsü/	Veriler, Uydu	2014	TKGM	Vektör
Kullanımı	Görüntüleri	2024		
	İBB, Acık	2001	TKGM,	
Ulaşım	Kaynak	2013	OSM,	Vektör
	Veriler	2024	İBB	
İdari Sınır	İdari Sınır	-	İBB	Vektör
Eğim	SYM-12	-	HGM	Raster
Planlama	Uygulama İmar Planı	-	Belediye	Vektör

Erişebilirlik parametresine ait veriler; 2001 dönemi kadastral paftalardan sayısallaştırma ile, 2013 dönemi İBB'den yol orta çizgisi şeklinde ve 2024 dönemi açık kaynak mekansal veri servisi olan OSM'den elde edilmiştir. OSM verileri, 2001 ve 2013 dönemine ait veriler ve referans altlık haritalarla (basemap) karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Modelde, yol ağına olan en kısa mesafe tampon analizi ile hesaplanmakta ve üç kademeli erişebilirlik değerleri üretilmektedir: 500 metre mesafe yakınındaki alanlar tam uygun, 500-1000 metre arasında olanlar yarı-uygun, ve 1000 metreden uzak olanlar düşük uygunluk olarak değerlendirilmektedir [40,41].

Modelde sadece eğim değişkeni uygunluk parametresi olarak kullanılmakta ve 12 metre mekansal çözünürlüklü SYM verisinden üretilen yüzdesel eğim verisi kullanılmıştır. SYM verisinin raster yapısı nedeniyle vektör yapıdaki parsel verisi arasında iki katmanı ilişkilendirecek bir mekansal analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analiz ile her bir parşele denk düşen eğim değerlerinin ortalaması alınarak tekil bir eğim değeri hesaplanmıştır. Bölgede yapılan analiz sonucunda %46'a kadar bir eğimde kentleşme faaliyetlerinin olduğu belirlenmiştir. Böylece modelde çalışma alanının kritik eğim değeri %46 olarak belirlenmiş ve bu değerin altındaki parseller için uygunluk derecesi, eğim değeri sıfıra yaklaştıkça artan bir doğrusal derecelendirme ile hesaplanmıştır.

Planlama parametresi için ilçenin 1/1000 ölçeğindeki uygulama imar planından genel ve kamusal hizmet alanları belirlenmiştir. Model bu parametrede, 0-1 değerleri arasında doğrusal bir önceliklendirme uygulamaktadır. Değer 0'a yaklaştıkça kentleşme olasığı düşmekte 1 değerine yaklaştıkça kentleşmeyi teşvik etmektedir. Bu doğrultuda konut veya belediye/kamusal hizmet yapıları olarak fonksiyonlandırılmış alanlarda değer 1; park, yeşil alan, bölge parkı ve mezarlık olarak ayrılan alanlarda ise bu değer 0 olarak belirlenmistir. Calısma alanında tarihsel dönemler arasında orman alanlarının dönüşüm yüzdesi %13 olarak belirlenmistir [39]. Bu değerin tümleyeni alınarak orman alanları %87 oranında (0.13) kısıtlanarak planlama verisine dahil edilmiştir. Böylece orman alanlarında mevcut eğilimin gelecekteki büyüme oranıyla sürdürülebilir kılınması hedeflenmiştir.

3 Bulgular

Makalenin bu bölümünde, çalışmada geliştirilen V-HO temelli KBSM'nin Sancaktepe İlçesinde test edilmesi, performansı ve uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi ele alınmıştır. İstanbul Sancaktepe İlçesindeki arazi örtüsü/kullanımı değişimleri, vektör veri yapısına sahip yüksek cözünürlüklü kadastral veriler kullanılarak mevcut kentleşme eğilimlerinin süregeleceği senaryosu altında araştırılmış ve elde edilen bulgular sunulmuştur. Hızlı nüfus artışı çalışma alanı içinde bulunan doğal alanlar üzerinde kentleşme baskısı oluşturmuştur. İlçede 2001-2024 yılları arasında gerçekleşen kentsel büyüme neticesinde; tarım, orman ve açık arazileri sırasıyla %22.1 (337,11 ha), %4.13 (93,75 ha), %35.2 (75,95 ha) oranlarında azalmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. 2001-2024 arasında arazi örtüsü değişimleri

				Değ	işim
Arazi Örtüsü	2001 (ha)	2014 (ha)	2024 (ha)	2001-2014	
				(+)	(-)
Kent	1541,95	1925,88	1932,33	%25,3	
Tarım	1526,66	1190,07	1189,55		%22.1
Orman	2270,17	2196,81	2176,42		%4.13
Açık A.	215,74	161,33	139,79		%35.2

dönemlerdeki kentleşme eğilimlerinin Geçmiş belirlenmesi amacıyla 2001-2014 2014-2024 ve aralıklarında BV'ler oluşturulmuştur. Geçmişte kentleşme yaratan BV öklid uzunluk değerlerinin (gözlemlenen) sürekli dağılımı ile referans gamma dağılımı arasındaki uyum incelenmiştir (Şekil 5). Dağılımın uygunluğu istatistiksel denetimi için KS testi uygulanmış ve elde edilen KS test istatistiği (0,012535) ile anlamlılık düzeyi (0,05) karşılaştırılmıştır. Elde edilen dağılım vasıtasıyla BV kenar uzunluğu azami etki değeri (d_{max}) çalışma alanına özgü olarak 189 metre olarak belirlenmiştir.



Şekil 5. Mesafe ve Gamma Dağılımlarının Karşılaştırmalı Grafiği

V-HO temelli KBSM'nin kalibrasyon aşamasında 2001-2014 yılları arası döneme ait BV'ler RO Algoritması ile eğitilmiştir. Sancaktepe için üretilen RO-VHO sınıflandırma modeli test seti ile karşılaştırılmış ve performans metrikleri elde edilmiştir. Buna göre RO-VHO algoritması kullanılarak %83 F1 skor değeri ile eğitim aşaması tamamlanmıştır.

Elde edilen RO modeli ile V-HO temelli KBSM'nin doğrulaması (validation) için 2014 tarihli dönemden 2024 yılı için KBSM oluşturulmuştur. 2024 yılında simüle edilen harita ile mevcut (bilinen) harita arasında ROC eğrisi analizi yapılarak AUC istatistiği hesaplamıştır. Analiz sonucuna göre AUC değeri 0.86 olarak belirlenmiştir, bu değer RO-VHO modelinin kentleşme/kentleşmeme ayırt etme performansının oldukça iyi olduğunu göstermektedir (Şekil 6). Kesinlik-Duyarlılık eğrisi de çizdirilmiştir, grafiğe göre kesinlik ve duyarlılık arasında denge gözlemlenmiştir.



Şekil 6. ROC (solda) ve Kesinlik-Duyarlılık (sağda) Eğrileri



Şekil 7. 2040 yılı simüle edilen potansiyel arazi örtüsü değişimleri

Bağımsız değişkenlerin model üzerindeki etkileri RO-VHO model ile belirlenebilmektedir. Çalışmada kullanılan dört bağımsız değişkenin sıralaması ve etki oranları Tablo 3 ile sunulmuştur. Sonuçlara göre bölgenin topografyası ile ilişkili olan uygunluk en yüksek etkiye sahipken, planlama ise modelde en düşük etkiye sahip parametre olarak belirlenmiştir.

Tablo 3. Bağımsız Değişkenlerin Etkileri

Etki Sırası	Bağımsız Değişken	Etki Oram (%)
1	Uygunluk	41,5
2	Komşuluk	35,95
3	Erişebilirlik	22,43
4	Planlama	0,12

Kalibrasyon aşamasında elde edilen RO modeli, hesaplanan bağımsız değişken etki oranları ve BV etki mesafe değerleri ile simülasyon aşamasında 2040 yılı için KBSM oluşturulmuştur (Şekil 7). Simülasyon modeli sonuçlarına göre çalışma alanında 2024-2040 yılları arasında %21 oranında kentsel büyüme meydana gelebileceği ve tarım alanları %25 (306 ha), orman alanları %3 (63 ha) ve açık arazilerin %21 (35 ha) oranında kentleşme baskısı altında olabileceği kestirilmiştir.

4 Sonuçlar ve tartışma

Mevcut kentsel eğilimlerin devam edeceği varsayımı altında, kentsel büyümenin neden olduğu arazi örtüsü/kullanımı değişimlerini simüle etmek ve V-HO algoritmasındaki uygulama zorluklarını ele almak amacıyla, coğrafi nesneleri temsilen parsel düzeyinde çalışabilecek bir V-HO tabanlı KBSM önerilmiştir. Bu model, yalnızca arazi örtüsü/kullanımı değişimlerini simüle etmekle kalmayıp, aynı zamanda karmaşık mekansal ve zamansal dinamikleri keşfetmek ve bu dinamiklerin etkilerini belirlemek için CVM (RO) algoritmasını kullanmaktadır.

Literatürde, V-HO tabanlı KBSM çalışmalarında parsel verileri üzerinde esnek komşuluk ve dönüşüm yapılandırması sağlayan BV veya benzer bir yöntemle gerçekleştirilmiş bir çalışma bulunmamaktadır. Bu bağlamda önerilen model, literatürdeki bu boşluğu doldurmayı hedeflemektedir.

V-HO algoritmasının dezavantajlarından biri olan uzun hesaplama sürelerini çözmek için, vektörel çokgenler noktadüğüm yapısına indirgenmiştir. Böylece hesaplama süreci basitleştirilmiş ve modelin performansı artırılmıştır. Büyüme döngüsünde her bir parsel, tüm öznitelikleriyle bir düğüm olarak tanımlanmakta, komşuluklar ise kenarlar aracılığıyla anlık ve net bir şekilde belirlenmektedir. Bu sayede, model daha verimli ve kullanıcı dostu hale gelmiştir. Gerçekleştirilen çalışmanın sonuçları, V-HO tabanlı kentsel büyüme modellemesinde hücrelerin vektör veri yapısı ile kullanılmasının uygulanabilirliğini ortaya koymuştur. Bu çalışmada, vektör veri yapısında hücresel işlerlik sağlanmış ve büyüme vektörleri yardımıyla dinamik komşuluklar oluşturma kapasitesi test edilmiştir.

Kadastral parsellerin modelde gerçek planlama birimlerini yansıtan hücreler olarak temsil edilmesi ve noktadüğüm yapısına indirgenmesi, temsil ve hücresel işlerlik sorunlarını büyük ölçüde çözmüştür. Arazi geliştirme sürecinde kullanılan parseller, planlamacıların kullandığı en küçük birimlerdir. Bu bağlamda, V-HO modelinin oluşturulmasındaki bir diğer amaç, kentsel planlama süreçlerini daha gerçekçi yansıtan modeller elde etmek ve planlayıcılara farklı büyüme alternatifleri sunarak karar verme sürecine destek olmaktır.

Çalışma, modelin hesaplama ve operasyonel işlerliğinin yanı sıra, gerçek ve simüle edilen kentsel büyüme arasındaki farkları ortaya koyan kalibrasyon ve doğrulama aşamalarını da kapsamaktadır. Bu aşamada, öncelikle BV'lere ait baz uzunluklarının kentleşmeye olan etkileri analiz edilmiştir. Buna göre, kentleşmeye etken azami mesafe değeri ampirik bir yaklaşımla değil, çalışma alanına özgü olarak belirlenmiştir. Kalibrasyon aşaması, arazi örtüsü/kullanımı değişim dinamiklerinin belirlenmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu aşamada son yıllarda V-HO ve CVM algoritmaları birlikte kullanımı sıklıkla tercih edilmektedir [4,12]. Bu çalışmada 2001-2014 yılları arasında eğitilen RO modeli %83 F1 Skor değeri ile yüksek doğruluk sağlamıştır. Doğrulama asamasında 2024 yılında bilinen ile simüle edilen haritalar karsılastırılarak ROC eğrisi analizi gerçekleştirilmiş ve AUC değeri %86 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar modelin, arazi örtüsü/kullanımı değişimlerini etkileyen zaman-mekan dinamiklerini yüksek doğruluk ve duyarlılıkla tespit edebildiğini kanıtlamaktadır. Ayrıca kullanılan dört parametreli eşitlikten; planlama parametresi (%0,12) Sancaktepe İlçesinde en az etkiye sahip olarak belirlenmiştir. Bu durum bölgede planlı büyümenin aksine organik bir büyüme şeklinin olduğunu ifade etmektedir.

Çalışmada Sancaktepe İlçesi için 2040 yılına ait KBSM oluşturulmuştur. 2024-2040 yılları arasında gerçekleştirilen zamansal değişim analizi sonuçlarına göre, tarım arazilerinin %25'inin, orman arazilerinin %3'ünün ve açık arazilerin %21'inin kaybı öngörülürken, kentsel alanların %21 oranında artması beklenmektedir. Bu oranlar, bölgedeki kentleşme hızının mevcut hızla benzer şekilde devam edeceğine işaret etmektedir. Askeri alan, Kuzudere orman alanı ve Paşaköy mevkisindeki tarımsal ve orman alanları, potansiyel kentsel büyüme alanları olarak belirlenmiştir. Yakup ve Ayazlı [39] tarafından gerceklestirilen bölgeye ait raster HO simülasyon modeliyle de benzer sonuclar elde edilmiştir. V-HO modelinin sonuçlarına göre orman arazileri üzerinde şu an için belirgin bir kentleşme baskısı bulunmamakla birlikte, gerekli önlemler alınmadığı takdirde ilerleyen dönemlerde bu baskının artacağı öngörülmektedir.

Araştırma, sürdürülebilir kalkınma politikalarının bir sonucu olarak kadastronun temel altlık görevi üstlenmesine vurgu yapmaktadır. V-HO temelli KBSM çalışmalarında kadastral veriler birincil veri kaynağı olarak kullanılmaktadır. Ancak, kadastral verilerin zamansal boyutu dünya genelinde düzenli şekilde bir

kaydedilmediğinden, bu verilerin yapısı karmaşıktır [42]. Bir diğer zorluk ise, bu verilerin ediniminin kolay olmamasıdır. Bununla birlikte, Kadastro 2034 vizyonunda belirtildiği gibi, kadastral verilerin paylaşılabilir standart bir formatta üretilmesi ve kanun yapıcıların bu doğrultuda yasal altyapıyı hazırlaması gerekmektedir [43,44].

Sunulan V-HO temelli KBSM'nin cesitli sınırlılıkları mevcuttur. Öncelikle HO temelli modellerdeki zaman temsilidir. HO modellerinde her zaman adımı veya yinelemesi aynı zaman aralıklarında ve genellikle bir yıla esdeğer olmaktadır. Sunulan modelde de büvüme döngüsünün bir kez çalışması bir yıla eşdeğerdir. Ancak arazi örtüsü/kullanımı değişimleri aynı zaman diliminde gerçekleşmeyebilir, değişim bir süreci içerir [45]. İlerideki çalışmalarda her hücreye bir kentsel büyüme yüzdesi eklenebilir. İkinci olarak modelde büyüme hızına denge getiren bir algoritmanın eksikliğidir, buna literatürde kendi kendini düzenleme (self-modification) adı verilmektedir [46]. Modelde tarihsel yıllık büyüme oranları tespit edilerek büyüme hızına denge sağlanabilir. Üçüncüsü hücre geometrisindeki zamana bağlı değişimlerdir. Zamanla araziler imar uygulamaları vb. nedenlerle birleştirilip ayrılabilirler [17]. Model, geometrik bölünme süreçlerine ait bir algoritma ile bütünleştirilmemiştir.

Önerilen model ile İstanbul Sancaktepe İlçesi'nde tarım, orman ve açık arazilerin kentleşme baskısı altında kalmaya devam edebileceği tespit edilmiştir. Model, kent plancıları ve araştırmacılar için etkili bir öngörü aracı olarak kullanılabilir. Planlama birimi olan parsel seviyesinde üretilen KBSM'ler sayesinde daha doğru ve hassas tahminler yapılabilir. Gelecekteki çalışmalarda, kalibrasyon ve zaman bileşeninde yapılacak iyileştirmelerin yanı sıra, arazi örtüsü/kullanımı değişimlerini etkileyen sosyo-ekonomik parametrelerin de modele dahil edilmesi ile V-HO temelli KBSM'lerin performansı daha da artırabilir.

Teşekkür

Bu çalışma, ilk yazarın Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Geomatik Mühendisliği Ana Bilim Dalında hazırlanan doktora tezinin bir kısmını içermektedir. Araştırma TÜBİTAK 124Y025 ve Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından M-2024-862 No'lu projeler kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %4

Kaynaklar

- [1] I.E. Ayazli, Monitoring of urban growth with improved model accuracy by statistical methods, Sustainability 11 (2019) 5579. https://doi.org/10.3390/su11205579.
- [2] M. Batty, Cities and complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals, The MIT press, 2007. https://doi.org/10.5555/1543541.
- [3] R. White, G. Engelen, Cellular Automata and Fractal Urban Form: A Cellular Modelling Approach to the Evolution of Urban Land-Use Patterns, Environment

and Planning A: Economy and Space 25 (1993) 1175–1199. https://doi.org/10.1068/a251175.

- [4] Y. Yao, L. Li, Z. Liang, T. Cheng, Z. Sun, P. Luo, Q. Guan, Y. Zhai, S. Kou, Y. Cai, L. Li, X. Ye, UrbanVCA: a vector-based cellular automata framework to simulate the urban land-use change at the land-parcel level, (2021). https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.08538.
- [5] N. Moreno, F. Wang, D.J. Marceau, Implementation of a dynamic neighborhood in a land-use vector-based cellular automata model, Computers, Environment and Urban Systems 33 (2009) 44–54. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2008.09.008.
- [6] A.G.-O. Yeh, X. Li, Errors and uncertainties in urban cellular automata, Computers, Environment and Urban Systems 30 (2006) 10–28. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2004.05.007.
- [7] P. Barreira-González, M. Gómez-Delgado, F. Aguilera-Benavente, From raster to vector cellular automata models: A new approach to simulate urban growth with the help of graph theory, Computers, Environment and Urban Systems 54 (2015) 119–131. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.07.004.
- [8] N. Moreno, A. Ménard, D.J. Marceau, VecGCA: A Vector-Based Geographic Cellular Automata Model Allowing Geometric Transformations of Objects, Environ Plann B Plann Des 35 (2008) 647–665. https://doi.org/10.1068/b33093.
- [9] Y. Lu, M. Cao, L. Zhang, A vector-based Cellular Automata model for simulating urban land use change, Chin. Geogr. Sci. 25 (2015) 74–84. https://doi.org/10.1007/s11769-014-0719-9.
- [10] S. Abolhasani, M. Taleai, M. Karimi, A. Rezaee Node, Simulating urban growth under planning policies through parcel-based cellular automata (ParCA) model, International Journal of Geographical Information Science 30 (2016) 2276–2301. https://doi.org/10.1080/13658816.2016.1184271.
- [11] Y. Lu, S. Laffan, C. Pettit, M. Cao, Land use change simulation and analysis using a vector cellular automata (CA) model: A case study of Ipswich City, Queensland, Australia, Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science 47 (2020) 1605– 1621. https://doi.org/10.1177/2399808319830971.
- [12] Y. Yao, K. Zhou, C. Liu, Z. Sun, D. Chen, L. Li, T. Cheng, Q. Guan, Temporal-VCA: Simulating urban land use change using coupled temporal data and vector cellular automata, Cities 149 (2024) 104975. https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.104975.
- [13] H. Zhuang, X. Liu, Y. Yan, D. Zhang, J. He, J. He, X. Zhang, H. Zhang, M. Li, Integrating a deep forest algorithm with vector-based cellular automata for urban land change simulation, Transactions in GIS 26 (2022) 2056–2080. https://doi.org/10.1111/tgis.12935.
- [14] W. Shi, M.Y.C. Pang, Development of Voronoi-based cellular automata -an integrated dynamic model for Geographical Information Systems, International Journal of Geographical Information Science 14 (2000)

455–474.

https://doi.org/10.1080/13658810050057597.

- [15] F. Semboloni, The Growth of an Urban Cluster into a Dynamic Self-Modifying Spatial Pattern, Environ Plann B Plann Des 27 (2000) 549–564. https://doi.org/10.1068/b2673.
- [16] Q. Guan, J. Li, Y. Zhai, X. Liang, Y. Yao, HashGAT-VCA: A vector cellular automata model with hash function and graph attention network for urban landuse change simulation, Landscape and Urban Planning 250 (2024) 105145. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2024.105145.
- [17] Y. Long, Z. Shen, V-BUDEM: A Vector-Based Beijing Urban Development Model for Simulating Urban Growth, in: Y. Long, Z. Shen (Eds.), Geospatial Analysis to Support Urban Planning in Beijing, Springer International Publishing, Cham, 2015: pp. 91– 112. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19342-7_5.
- [18] J. Yang, X. Zhu, W. Chen, Y. Sun, J. Zhu, Modeling land-use change using partitioned vector cellular automata while considering urban spatial structure, Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science (2023) 239980832311528. https://doi.org/10.1177/23998083231152887.
- [19] Y. Chen, X. Liu, X. Li, Calibrating a Land Parcel Cellular Automaton (LP-CA) for urban growth simulation based on ensemble learning, International Journal of Geographical Information Science 31 (2017) 2480–2504.

https://doi.org/10.1080/13658816.2017.1367004.

[20] I.E. Ayazli, Investigating the interactions between spatiotemporal land use/land cover dynamics and private land ownership, Land Use Policy 141 (2024) 107165.

https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2024.107165.

- [21] D. Ozturk, N. Uzel-Gunini, Investigation of the effects of hybrid modeling approaches, factor standardization, and categorical mapping on the performance of landslide susceptibility mapping in Van, Turkey, Natural Hazards 114 (2022) 2571–2604. https://doi.org/10.1007/s11069-022-05480-y.
- [22] A. Tayyebi, B.C. Pijanowski, M. Linderman, C. Gratton, Comparing three global parametric and local non-parametric models to simulate land use change in diverse areas of the world, Environmental Modelling & Software 59 (2014) 202–221. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.05.022.
- [23] R. White, G. Engelen, Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling, Environ. Plann.
 B 24 (1997) 235–246. https://doi.org/10.1068/b240235.
- [24] S. Wolfram, Cellular automata as models of complexity, Nature 311 (1984) 419–424. https://doi.org/10.1038/311419a0.
- [25] N.N. Pinto, A.P. Antunes, A Cellular Automata Model Based on Irregular Cells: Application to Small Urban Areas, Environ Plann B Plann Des 37 (2010) 1095– 1114. https://doi.org/10.1068/b36033.

- [26] J.I. Barredo, L. Demicheli, C. Lavalle, M. Kasanko, N. McCormick, Modelling Future Urban Scenarios in Developing Countries: An Application Case Study in Lagos, Nigeria, Environ Plann B Plann Des 31 (2004) 65–84. https://doi.org/10.1068/b29103.
- [27] M. Batty, Y. Xie, Z. Sun, Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata, Computers, Environment and Urban Systems 23 (1999) 205–233. https://doi.org/10.1016/S0198-9715(99)00015-0.
- [28] K. Krishnamoorthy, Handbook of statistical distributions with applications, Chapman and Hall/CRC, 2006. https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9 781420011371/handbook-statistical-distributionsapplications-krishnamoorthy, Accessed August 31, 2024.
- [29] F.J. Massey, The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit, Journal of the American Statistical Association 46 (1951) 68–78. https://doi.org/10.1080/01621459.1951.10500769.
- [30] J.D. Gibbons, S. Chakraborti, Nonparametric statistical inference: revised and expanded, CRC press, 2014. https://doi.org/10.4324/9780203911563, Accessed August 31, 2024.
- [31] L. Breiman, Random Forests, Machine Learning 45 (2001) 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324.
- [32] S. Amini, M. Saber, H. Rabiei-Dastjerdi, S. Homayouni, Urban land use and land cover change analysis using random forest classification of landsat time series, Remote Sensing 14 (2022) 2654. https://doi.org/10.3390/rs14112654.
- [33] L.A. Guzman, R. Camacho, A.R. Herrera, C. Beltrán, Modeling population density guided by land use-cover change model: a case study of Bogotá, Popul Environ 43 (2022) 553–575. https://doi.org/10.1007/s11111-022-00400-5.
- [34] C. Kamusoko, J. Gamba, Simulating urban growth using a random forest-cellular automata (RF-CA) model, ISPRS International Journal of Geo-Information 4 (2015) 447–470. https://doi.org/10.3390/ijgi4020447.
- [35] J. Lv, Y. Wang, X. Liang, Y. Yao, T. Ma, Q. Guan, Simulating urban expansion by incorporating an integrated gravitational field model into a demanddriven random forest-cellular automata model, Cities 109 (2021) 103044. https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.103044.
- [36] A. Rienow, A. Mustafa, L. Krelaus, C. Lindner, Modeling urban regions: Comparing random forest and support vector machines for cellular automata, Transactions in GIS 25 (2021) 1625–1645. https://doi.org/10.1111/tgis.12756.
- [37] İ.E. Ayazlı, F. Gul, A.E. Yakup, D. Kotay, Extracting an Urban Growth Model's Land Cover Layer from Spatio-Temporal Cadastral Database and Simulation Application, Polish Journal of Environmental Studies 28 (2019). https://doi.org/10.15244/pjoes/89506.

- [38] TÜİK, Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları, Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları (2025). https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Adrese-Dayali-Nufus-Kayit-Sistemi-Sonuclari-2022-49685, Accessed January 26, 2025.
- [39] A.E. Yakup, İ.E. Ayazlı, Investigating changes in land cover in high-density settlement areas by protected scenario, International Journal of Engineering and Geosciences 7 (2022) 1–8. https://doi.org/10.26833/ijeg.850247.
- [40] A.S. Kubat, H.S. Kaya, F. Sarı, G. Güler, Ö. Özer, The Effects of Proposed Bridges on Urban Macroform of Istanbul, in: 6th International Space Syntax Symposium. Istanbul: Istanbul Technical University, 2007.

https://www.academia.edu/download/90993985/paper s_5Clongpapers_5C003_20-_20Kubat_20Kaya_20G_C3_BCler_20Sari_20Ozer.p df, Accessed August 17, 2024.

[41] Y. Ye, C. Jia, S. Winter, Measuring Perceived Walkability at the City Scale Using Open Data, Land 13 (2024) 261. https://doi.org/10.3390/land13020261.

- [42] Kaufman, J, Steudler, D, Kadastro 2014: Gelecekteki Kadastral Sistem İçin Bir Vizyon, International Federation of Surveyors, Brighton, 1998.
- [43] I. Horňanský, E. Ondrejička, M. Fojtl, From Cadastre 2014 to Cadastre 2034, in: Permanent Committee on Cadastre in the EU, Plenary Meeting & Conference, Greece, 2014: pp. 45–51.
- [44] M. Lemmens, Towards cadastre 2034 (Part II), GIM International: The Worldwide Magazine for Geomatics 24 (2010) 37–45.
- [45] X. Liu, C. Andersson, Assessing the impact of temporal dynamics on land-use change modeling, Computers, Environment and Urban Systems 28 (2004) 107–124.
- [46] K.C. Clarke, S. Hoppen, L. Gaydos, Methods and techniques for rigorous calibration of a cellular automaton model of urban growth, in: Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, Citeseer, 1996: pp. 21– 25.

https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&ty pe=pdf&doi=5d755c433ff52d36e08a235689c69c7db1 27bd59, Accessed March 22, 2024.


NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 712-721 Niğde Ömer Halisdemir Üni**ver**sitesi 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



Metalik malzemeler üzerine kendi kendini iyileştiren kaplamaların geliştirilmesi ve karakterizasyonu

Development and characterization of self-healing coatings on metallic materials

Emre Pehlivan^{1,*}^(D), Taha Yasin Eken²^(D), Ebru Devrim Şam Parmak³^(D)

^{1,2,3} Bursa Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 16310, Bursa, Türkiye

Öz

Malzeme yüzeylerine uygulanan koruyucu kaplamalarda, mekanik gerilim, termal dalgalanma ve kimyasal bozunma nedeniyle hasar ve çatlak oluşumu kaçınılmazdır. Çoğu zaman tespit edilmesi zor ve onarımı neredeyse imkânsız olan mikro ve iç çatlaklar malzemenin yapısal bütünlüğünü zayıflatmaktadır. Geleneksel onarım teknikleri bu tür kusurları gidermede yetersiz kalmakta, bu durum kendini onaran malzemeler gibi onarım mekanizmalarına sahip çözümlerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu ileri düzey malzemeler, mikro çatlakları erken aşamada doldurarak çatlak yayılımını otomatik olarak engellemekte ve böylece kaplanmış yapıların hizmet ömrünü uzatırken bakım ve korozyon maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu çalışmada, Pickering emülsiyon yöntemiyle üretilen grafen oksit (GO) içeren keten tohumu yağlı (LO) mikrokapsüllerin çelik malzeme yüzeyine kaplanması esas alınmıştır. İyileştirici kimyasalın kapsüllendiği termal gravimetrik analiz/diferansiyel termal analiz (TGA/DTA) ile, manuel olarak olusturulan ciziklerin kendi kendini iyileştirme süreci taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskop ile incelenmiştir. Kaplanmış numunelerin korozyon direnci elektrokimyasal korozyon testi (EIS) ile tespit edilmiştir. Başarılı bir şekilde üretilen mikrokapsüller ile yapılan kaplamaların kendi kendini iyileştirdiği gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Mikrokapsül, Kendi kendini iyileştiren kaplama, Grafen oksit mikrokapsül, Keten tohumu yağı, Epoksi kaplama

1 Giriş

Metal yüzeylerine uygulanan kaplamalar termal döngü, mekanik cizik ve korozyon ürünlerinin birikimi ile catlaklara karşı savunmasız hale gelebilmektedir. En sık karşılaşılan sorunlardan biri de metal yüzeyinde herhangi bir hasar belirtisi göstermeyen mikroçatlakların tespit edilmesidir. Zira bu mikroçatlaklar birleşip büyüyebilmekte, malzemeyi tahrip ederek mekanik özellikleri ciddi şekilde bozabilmektedir [1-3]. Bu nedenle uzun ömürlü ve geliştirilmesi, onarılabilen malzemelerin yüksek performansa sahip akıllı malzemelerin üretilmesi, bu malzemelerin geri dönüstürülebilirliği veya tekrarlı kullanımı önem arz etmektedir [1,4]. Bu kapsamda geliştirilen kendi kendini iyileştiren malzemeler, meydana

Abstract

In protective coatings applied to material surfaces, damage and crack formation are inevitable due to mechanical stress, thermal fluctuation and chemical degradation. Often difficult to detect and almost impossible to repair, micro and internal cracks weaken the structural integrity of the material. Traditional repair techniques are inadequate to eliminate such defects, which has necessitated the development of solutions with repair mechanisms such as These advanced self-healing materials. materials automatically prevent crack propagation by filling micro cracks at an early stage, thus extending the service life of coated structures and significantly reducing maintenance and corrosion costs. In this study, the coating of linseed oil (LO) microcapsules containing graphene oxide (GO) produced by the Pickering emulsion method is based on the steel material surface. The self-healing process of manually created scratches was examined with scanning electron microscope (SEM) and optical microscope by thermal analysis/ differential thermal gravimetric analysis (TGA/DTA) where the healing chemical was encapsulated. The corrosion resistance of the coated samples was determined by electrochemical corrosion test (EIS). It was observed that the coatings made with successfully produced microcapsules were self-healing.

Keywords: Microcapsule, Self-healing coating, Graphene oxide microcapsule, Linseed oil, Epoxy coating

gelen hasarı tespite gerek kalmadan iyileştirebilen veya dışarıdan bir müdahale ile onaran yeni bir akıllı malzeme sınıfıdır [5]. Kendi kendini iyilestiren bu malzemeler icsel ve dışsal olarak iki gruba ayrılmaktadır [4,6,7-9]. İçsel kendi kendini iyileştirme, polimerlerin kimyasal doğasında vardır ve damar, mikrokapsül gibi harici bir malzeme kullanımı gerektirmez. Fakat sistemin, kendi kendini iyileştirmesini aktive edecek harici bir uyaran (1sı, 1şık vb.) gerekmektedir [7]. Dışsal kendi kendini iyileştirme ise kapsüllere, içi boş fiber veya damarlara önceden yerleştirilmiş iyileştirici kimyasalın salınımına dayanmaktadır. Bir çatlak oluştuğunda, kapsülün yırtılması sonucu iyileştirici kimyasal serbest kalmakta ve hasarlı alanı doldurmaktadır [10]. Böylece malzeme herhangi bir müdahale olmadan kendi kendini iyileştirmektedir. Bu malzemeler arasında kapsül

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: epehlivanemre@gmail.com (E. Pehlivan) Geliş / Received: 05.12.2024 Kabul / Accepted: 19.03.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngmuh.1594724

uygulaması, üzerinde en çok çalışılan sistemdir [7]. Kendi kendini iyileştiren malzemelere ilk yaklaşım da mikrokapsüllerin hasara bağlı yırtılması üzerine disiklopentadien (DCPD) monomerinin, hasarı doldurması şeklindedir [6].

Hasarlı bölgede kendi kendine iyileştirme yapmasına rağmen bu malzemeler, uygulamalarını sınırlayan zayıf mekanik özelliklere sahiptir. Mekanik özelliklerini geliştirmek için çeşitli katkı maddeleri kullanılmaktadır [8]. Bunlardan GO, grafenin en önemli türevidir ve mükemmel sızdırmazlığı ile üstün bariyer özelliğine sahiptir. Su veya herhangi bir çözücü içerisinde kolayca dağılabilmektedir [11]. GO kabuklu mikrokapsüller, polimer kabuklu mikrokapsüllere göre sızıntıyı önlemede daha etkilidir ve iyileştirici kimyasal olan çekirdek malzemesinin muhafaza edilebilmesi için yeterli derecede koruma sağlamaktadır [12]. GO ile yapılan çalışmalarda Sarkar vd. [13] yerinde polimerizasyon yöntemiyle GO kapsüllemesinin başarılı bir şekilde yapıldığını, mikrokapsüllerin termal olarak daha kararlı olduğunu, artan termal stabilitenin yüksek sıcaklıkta kullanılacak olan malzemeler için faydalı olabileceğini bildirmiştir. Ayrıca mikrokapsüllerin depolama kapasitelerinin tatmin edici olduğu çekirdek ve sıcaklığının malzemelerini oda altında diğer mikrokapsüllerden daha uzun süre tutabileceği belirtmiştir. Li vd. [14] ise kendi kendini iyileştiren kompozit kaplamaların hazırlanması için GO kabuklu keten tohumu vağının, Pickering emülsiyonlarında, iyilestirici kimyasal olarak kapsüllendiğinde kendi kendini iyileştirme etkisi belirlemiştir. gösterdiğini Fakat kullanılacak mikrokapsüllerin kaplama içerisinde homojen dağılımı ve çoklu özellikleri bir sistemde sağlamak halihazırda zorlu bir süreçtir [7,15]. Akıllı malzemeler ve özellikle grafen içeren kompozitler için kendi kendini iyileştirme daha başlangıç aşamasındadır. Sistemin daha da geliştirilmesine rehberlik edecek büyük bir araştırma alanı vardır [8].

Kendi kendini iyileştiren malzemelere yönelik geliştirilen sistemler, kaplama teknolojilerine de Epoksi, uvgulanabilmektedir [16]. poliüretan, politetrafloroetilen, akrilikler, selüloz, biyopolimerler, fenolikler vb. bir dizi polimer, kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır. Seçilen polimerin türü, kaplama yöntemi ve süreç parametreleri polimer kaplamaların performansında önemli rol oynamaktadır. İyi yapışma, ıslanabilirlik, biyouyumluluk, mekanik dayanım, aşınma direnci, kimyasal direnç ve iyi bariyer özellikleri, kaplamanın üretim tekniğine bağlıdır. Bu tekniklerden döndürerek kaplama, daldırarak kaplama, ekstrüzyon/dispersiyon kaplama, sprey kaplama, gravür kaplama, baskı teknikleri gibi çeşitli kaplama işlemleri başarıyla uygulanabilmektedir. Sol-jel ile kaplama islemi yapılan kaplamalar ise cevre dostudur ve metallerin korozyon direncini artırmak için kullanılan toksik kromat kaplamaların yerini alma potansiyeline sahiptir. Bu yöntemle üretilen koruyucu kaplamalar kimyasal kararlılık, oksidasyon kontrolü ve korozyon direnci gibi özelliklere sahiptir [19].

Uygulanan polimer kaplama sistemleri, metal yüzey üzerine yoğun bir bariyer sağlamak için kullanılmaktadır [17]. Böylelikle metalik malzeme korozyona karşı da korunabilmektedir. Metallerin korozyona uğraması ise geçmişten günümüze önemli bir sorun olmuştur ve etkisini sınırlandırmak için yoğun çaba harcanmaktadır [18]. Koruyucu kaplamaların (boya, yüzey hazırlığı vb.) değiştirilmesi, muayene ve tamir edilmesi, korozyona uğramış yapıların ve tehlikeli maddelerin yok edilmesi gibi sebeplerden dolayı korozyonun yıllık hasar maliyeti cok vüksektir [19]. Bir tahmine göre, metalik korozvonun neden olduğu mali kayıp dünyada her yıl yaklaşık 2,2 trilyon dolardır [20]. Yapılan tüm araştırma ve geliştirmelere rağmen metallerin korozyondan korunması için uygulanan kaplamalar her zaman tatmin edici olmamaktadır. Ayrıca çevre koşullarındaki çeşitlilik nedeniyle kaplamaların servis ömrünü uzatmak ve korumak büyük bir zorluktur [21]. Genel itibariyle galvanizleme yoluyla hazırlanan çinko kaplamalar, korozyon direncini artırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak çinko kaplamalar her zaman çelik üzerinde yeterli koruma sağlamamaktadır. Çinko kaplı çeliği korozyona karşı daha fazla korumak için genellikle yüzey modifikasyonu benimsenmektedir [22]. Burada kromat, mükemmel korozyon koruması sağlamaktadır. Ancak, raporlar kromun (VI) bir kanserojen olduğunu, [22-24] ve böbrek, karaciğer hasarına hatta ölüme neden olabileceğini bildirmektedir. Bu nedenle son yıllardaki araştırmalar, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen çevre dostu malzemelerin kullanımına odaklanmaktadır [23]. Daha gelişmiş çözümler arayışında, kendini iyileştirme yeteneği en önemli özelliklerden biri olarak kabul edilmektedir [25]. Bu yeteneğe sahip kaplamalar, çevreye doğrudan maruz kalmayı engelleyerek korozyonu önleyen ince bir bariyer tabakası oluşturmaktadır [26]. Otomotiv, havacılık ve elektronik gibi birçok alanda ilgi görmektedir. Çevresel atıklardan kaynaklanan kirlilik sorunlarının giderilmesinde kritik bir rol oynamaktadır [9]. Fakat zayıf mekanik özellikler, düşük iyileştirme verimliliği, uzun kendi kendini iyileştirme süresi, kendi kendini iyileştirmede tekrar durumu, dış uyaranlara yetersiz derecede yanıt verme gibi nedenlerden dolayı ihtiyaçları tam anlamıyla karşılamak halen zordur [27].

Yapılan çalışmalarda tung yağı, keten tohumu yağı, neem yağı ve ayçiçek yağı gibi farklı yağ türleri daha yeşil korozyon önleyiciler olarak kullanmıştır. Bu doğal yağlar arasında tung yağı ve keten tohumu yağı daha iyi kuruma performansı, emülsifikasyon ve çapraz bağlama yeteneklerinden dolayı daha çok uygulanmıştır [28]. GO mikrokapsüllerin çekirdek malzemesi olan keten tohumu yağı (LO), korozyonun engellenmesi için en popüler tohum ekstraktıdır ve aynı zamanda hidrofobik bir madde olarak rapor edilmistir. Atmosfere maruz kaldığında oksidatif polimerizasyona uğrayıp kuruyan bir yağ türüdür. Bu yağ, kendi kendini iyileştiren kaplama uygulaması için poli(üre) formaldehit (PUF), etilselüloz ve PMMA (poli(metil metakrilat) dahil olmak üzere çeşitli malzemeler içinde kapsüllenmiştir [10]. PMMA-LO mikrokapsülleri epoksi bazlı kaplamalara uygulanarak kendi kendini onarma yeteneği dolayısıyla korozyon önleyici özellik göstermiştir [29]. Mikrokapsüllerin kabuk dayanımı ise mekanik özelliklerine karar veren bir faktördür. Mikrokapsüllerin hem kimyasal hem de mekanik olarak oldukça kararlı olması

beklenmektedir. Bu açıdan bir mikrokapsülün daha kısa kullanım ömrü, etkinliğini azaltacağından raf ömrü de bir o kadar önemlidir. Çekirdek ve kabuğun kimyasal yapısı, çekirdek-kabuk oranı, pH, sıcaklık, kapsüllerin üretildiği yer ve çekirdek materyalin viskozitesi mikrokapsüllerin raf ömrünü belirlemektedir [30].

Bu çalışmada, Şekil 1'de belirtildiği şekilde kendi kendini iyileştirme özelliği kazandırılan malzemelerin hazırlanması ve iyileştirme süreçleri araştırılmıştır. Hasar alan kısmın geri kazanımı ile kendi kendini iyileştirmenin yanı sıra korozyon özelliklerinin de geliştirildiği bir kaplama elde edilmiştir.



Şekil 1. Çalışma yöntemin genel akış şeması

2 Materyal ve metot

2.1 Malzemeler

Grafen oksit (GO, Saflık: %99,5, 2-8 nm, Grafenbiotech nanoteknoloji mühendislik), keten tohumu yağı (LO), resorsinol, üre, formaldehit, amonyum klorür, ksilen, hidroklorik asit (HCl), sodyum hidroksit (NaOH), bisfenol A reçine, epoksi için hızlandırıcı (%6'lık Kobalt) ve sertleştirici (MEK-P50), S355J2 kalite çelik, tetraetilortosilikat (TEOS) [Si(OC2Hs)4], etanol (C2HsOH), GPTMS (3-Glisidiloksipropil trimetoksisilan).

2.2 Numune hazırlama

Kaplama işlemi için altlık olarak kullanılacak çelikler yağ, kir ve oksidasyonu gidermek için zımparalama ve parlatma işlemlerinden geçirilmiştir.

2.3 Mikrokapsüllerin üretimi

Kendi kendini iyileştirmeyi sağlayacak olan mikrokapsülleri sentezlemek için arayüzey polimerizasyonu, verinde polimerizasyon ve sol-jel gibi çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Fakat bu yöntemler arasında yerinde polimerizasyon, kapsülleme için en kolay yöntemdir [4]. Bu yöntem kontrol edilebilir mikrokapsül boyutu ve kabuk kalınlığı, basit prosedür, düşük maliyet ve sanayileşme kolaylığı gibi birçok avantaj sunmaktadır. Ancak, diğer kapsülleme yöntemleriyle karşılaştırıldığında, yerinde polimerizasyon daha uzun reaksiyon süreleri gerektirir. Katı partikül kullanılan Pickering emülsiyonları da mikrokapsül hazırlamak için etkili bir yöntemdir ve klasik emülsiyonlar ile aralarında yüzey aktif madde olmaması, üstün stabilite ve düşük toksisite gibi farklar bulunmaktadır [11,31,32].

Proses parametreleri mikrokapsül özelliklerini etkilemektedir. Genellikle kendi kendini iyileştirme uygulamasında mikrokapsül sentezi için 55-70 °C arasındaki sıcaklık kullanılmaktadır. Daha yüksek sıcaklıklarda, reaksiyon süresi azalmaktadır. Bunun için gerekli olan en düşük olası sıcaklıklarda kapsüller oluşturulabilmektedir. Ancak çok daha düşük sıcaklıklarda emülsiyonlar stabil olmadığından verimin düşmesine neden olabilmektedir. Karıştırma hızı, mikrokapsül sentezi üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Daha yüksek karıştırma hızlarında artan kesme gerilmeleri nedeniyle keten tohumu yağı damlacıkları daha kücük damlacıklara bölünmekte ve daha kücük kapsüller oluşmaktadır. Daha düşük karıştırma hızları ise daha büyük kapsüllerin oluşumunu sağlamaktadır. Bu mikrokapsüllerin boyutu, ilgili uygulama alanının yanı sıra kapsülün çatlaması ve yırtılması durumunda verilebilecek iyileştirici madde miktarını belirlemektedir [33,34]. Kalın kabuk duvarlarına sahip mikrokapsüllerin kırılması zor olacaktır ve iyileşme süreci verimli olmayacaktır. Benzer şekilde, düşük kalınlıkta kabuk duvarı veya gözenekli kabuk duvarları sentez veya işleme sırasında mikrokapsüllerin yırtılmasına neden olacaktır [33]. pH değeri 3'ün üzerinde sentezlenen kapsüller, pürüzsüz dış yüzeylere sahip olmaktadır. Ancak daha düşük pH değerlerinde üre ve formaldehit daha hızlı reaksiyona girmekte ve üretimde yan ürün olan PUF nanopartikülleri kapsül yüzeylerinde yüzeyinin birikmektedir. Bu durum kapsüllerin pürüzlenmesine yol açmaktadır [35]. Nanopartiküllerin üretimi, uygun kapsül kabuğu oluşumunu engelledikleri için istenmemektedir. Ayrıca kapsüllerin süspansiyondan ayrılmasında zorluk çıkarmaktadır [33].

Mikrokapsüllerin üretiminde, kabuk olusumu için üre ve formaldehit, iyileştirici çekirdek malzeme olarak keten tohumu yağı, capraz bağlama maddesi olarak resorsinol ve mikrokpsüllerin kabuk oluşumunu geliştirmek icin amonyum klorür kullanılmıştır. Şekil 2'de görselleştirilen Pickering emülsiyon yöntemiyle üre, amonyum klorür ve resorsinol, manyetik karıştırıcı kullanılarak 100 ml deiyonize su içerisinde çözülmüştür. Daha sonra 10 ml saf su içerisine kapsül malzemelerinin %1'i kadar GO eklenmiştir. GO süspansiyonu ultrasonik homojenizatör ile 5 dakika karıştırılarak homojen hale getirilmiştir. GO-süspansiyonu mikrokapsül solüsyonu içine eklenerek karıstırma islemine devam edilmiştir. Hidroklorik asit (HCl) ve sodyum hidroksit (NaOH) kullanarak pH 3.5-4 olarak ayarlanmıştır. Daha sonra keten tohumu yağı solüsyona damla damla eklenmiştir. Emülsiyon 800 rpm'de 15 dakika stabilize edilerek formaldehit, solüsyon karışımına eklenmiştir. Reaksiyon çözeltisinin sıcaklığı yavaş yavaş 60 °C'ye çıkartılarak (1 °C/minimum oran) üç kanatlı mekanik karıştırıcıda 800 rpm'de 4 saat karıştırılmıştır. Reaksiyon sonunda elde edilen çözelti, ortam sıcaklığına soğutulmustur. Santrifüj cihazı ile mikrokapsüller karışımdan ayrıştırılmıştır. Elde edilen mikrokapsüller ksilen ve saf su ile tekrarlı şekilde yıkanıp saflaştırılarak oda sıcaklığında kurutulmuştur [15,36].

Yukarıda bahsedilen poli(üre-formaldehit) polimeri (PUF) içinde keten tohumu yağının kapsüllenmesi işleminde, üre ve formaldehit reaksiyona girmektedir. Bu işlemin sürdürülmesiyle keten tohumu yağı damlacıkları üzerinde Şekil 3'te gösterildiği gibi ince bir PUF polimerik kabuk oluşmaktadır. Reaksiyon bitiminde solüsyon içerisinden alınan çözelti kurutularak elde edilen mikrokapsüller optik mikroskop ile görüntülenmiştir. Şekil 4'te görüldüğü üzere üretilen bu mikrokapsüller genel olarak küresel formdadır. Kapsüllerin küresel forma sahip olması kaplamada kolay dağılmasını sağlamaktadır. Ayrıca bu mikrokapsüller küresel yapılarını kaplamanın içinde de korumakta ve kaplama işlemleri esnasında hasar almamaktadır.



Şekil 2. Kapsülleme işlemi (a) emülsiyonun hazırlanması (b) keten tohumu yağının küçük damlacıklar halinde parçalanması, (c) GO'nun keten tohumu yağı damlacıklarının etrafına toplanması, (d) stabilize Pickering emülsiyonu [11]



Şekil 3. Mikrokapsülde çekirdek (keten tohumu yağı) ve kabuk (PUF) yapısı [5]

Tablo	1. Sol-i	iel cöze	ti karısımı
	1.001	VI VOLU	ter neur içinin

Sol A	Sol B
TEOS	TEOS
EtOH	EtOH
H2O	H2O
HCI	HCI
	GPTMS



Şekil 4. GO-LO mikrokapsül solüsyonunun cam slayt üzerinde kurutulduktan sonra optik mikroskop görüntüsü

2.4 Kaplama işlemleri

Kaplama işlemleri, sol-jel ile daldırma yöntemi ve epoksi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Epoksi kaplama için Bisfenol A reçinesine binde iki oranında hızlandırıcı ilave edilip manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. %5 oranında mikrokapsül, reçineye dahil edilmiştir. Daha sonra sertleştrici eklenip homojen duruma gelene kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir. Hazırlanan reçine 29 mm çapına sahip S355J2 kalite çelik numune yüzeyine manuel olarak kaplanmıştır. Numuneler oda sıcaklığında 5 saat bekletildikten sonra 80 °C' de 1 saat kürlenmiştir.



Şekil 5. Daldırma kaplama cihazı

Tablo 1'de verilen sol-jel karışımı ile yapılan kaplama işlemi için SiO2 esaslı çözeltide hammadde olarak tetraetilortosilikat (TEOS) [Si(OC2H5)4], çözücü olarak etanol (C₂H₅OH), katalizör olarak hidroklorik asit (HCl) ve metal alkoksitlerin hidrolizi için de saf su kullanılmıştır. TEOS:H2O mol oranı 1:4'tür. Belirlenen miktarlar ile hazırlanan sol-jel çözeltileri manyetik karıştırıcı ile oda sıcaklığında karıştırılmıştır. 0,002 mol GPTMS (3-Glisidiloksipropil trimetoksisilan) solüsyona eklenerek 4 saat aynı koşullarda karıştırılmaya devam edilmiştir. Daha sonra B çözeltisi, A çözeltisine eklenerek 24 saat aynı koşullarda karıştırılmıştır. Elde edilen çözeltiye 1:10 ağırlık oranında mikrokapsüller eklenerek 5 dakika karıştırılmıştır [37]. Hazırlanan karışım çelik üzerine Şekil 5'de verilen daldırma kaplama yöntemi kullanılarak kaplanmıştır. Kaplanan malzeme, etüvde kurutulduktan sonra kül firininda atmosfer ortamında 10 °C/dk ısıtma hızında 130 °C'de 1 saat ısıl işleme tabi tutulmuştur. Böylelikle kendi kendini iyileştiren kaplama uygulamaları tamamlanmıştır.

2.5 Elektrokimyasal korozyon testi

Kaplamanın korozyon direncini değerlendirmek amacıyla elektrokimyasal empedans spektroskopisi (Electrochemical Impedance Spectroscopy-EIS) yöntemi kullanılarak korozyon testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma elektrotu olarak kaplanmış çelik numune, referans elektrot olarak Ag/AgCl elektrot ve karşıt elektrot olarak ise platin elektrot kullanılmıştır. Numuneler, 36 saat boyunca %3,5 NaCl çözeltisine maruz bırakılmış ve belirli zaman aralıklarında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Açık devre potansiyeli ölçümleri (Open Circuit Potential-OCP) 0 V ile -1 V arasında uygulanmıştır. OCP testlerine göre yüzey potansiyeli başlangıçta -0,55 V olarak kaydedilmiş ve

zamanla -0,57 V seviyesine gerilemiştir. EIS ölçümleri 10 mHz ile 100 kHz frekans aralığında gerçekleştirilmiş olup, sinyaller 20 mV genliğinde elde edilmiştir. Kullanılan üç elektrotlu hücre sistemi ve deney düzenekleri Şekil 12'de gösterilmektedir.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 SEM incelemeleri

Keten tohumu yağlı mikrokapsüller içeren epoksi kaplamaların kendi kendine iyileşme yeteneği SEM ile görselleştirilmiştir. Kaplamanın kendi kendini iyileştirmiş hali ile kıyaslama yapılabilmesi için SEM analizine girmeden önce yüzeyinde maket bıçağı ile manuel olarak çizik oluşturulmuştur (Şekil 6). Bu çizik, daha önce çizilerek oda sıcaklığında 96 saat bekletilen ve iyileşme olmayan çizik görüntüleri ile kıyaslanmıştır.



Şekil 6. Mikrokapsül içeren epoksi ile kaplanan numune üzerine atılmış manuel çizikler (Numune yüzeyinde SEM analizi için altın/paladyum kaplama bulunmaktadır)

Şekil 7a'da mikrokapsül içeren epoksi kaplamada çizik oluşturulduktan sonra alınan görüntüye yer verilmiştir. Şekil

7b ve 7c'de 96 saat önce oluşturulmuş çizikteki iyileşme kısmı gösterilmektedir. Şekil 7d'de ise iyileşme olmayan çiziğin görüntüsü verilmiştir.

Kaplamada bulunan mikrokapsüller, oluşturulan çizik ile yırtılmıştır. Yırtılma neticesinde mikrokapsüllerin içinde bulunan keten tohumu yağı serbest kalarak oksijen ile polimerize olmuş ve çizik olan bölgeyi kapatarak yeni bir film oluşturmuştur. Bu yeni film kaplamanın bariyer özelliğini geri kazandırmıştır. Böylelikle kaplama herhangi bir müdahale olmadan kendi kendini iyileştirmiştir. Ancak mikrokapsül bulunmayan durumlar için bu durum oldukça farklıdır ve çizikte iyileşmemiş boşluk bulunmaktadır.

3.2 Optik mikroskop incelemeleri

Mikrokapsüllerin kaplama içerisinde eşit bir şekilde dağılmaması, kendi kendini iyileştirme yeteneği sergilemeyen bölgelerin görülmesine neden olmaktadır. Kaplamadaki kapsül içeriğinin artmasıyla da kapsüllerde topaklanma eğilimi artmaktadır. Bu nedenle kendi kendini iyileştirme verimliliği için mikrokapsüllerin, kaplama çözeltisine uyumu, uygun dağılımı ve miktarı önem arz etmektedir [33].

Kaplanmış numuneler üzerinde oluşturulan çiziklerin kendi kendini iyileştirme performansı OM ile gözlemlenmiştir. Oluşturulduktan belirli süre sonra alınan görüntülerde çiziklerin kendi kendini iyileştirerek kapanmaya başladığı görülmüştür. Bu durum kaplamanın çizilmesi ile yırtılan mikrokapsüllerdeki keten tohumu yağının serbest kalarak çizikte koruyucu bir tabaka oluşturması şeklinde açıklanmaktadır. Böylelikle keten tohumu yağı, işlevini yerine getirmiş olmaktadır. Mikrokapsüller, depolanma ve kaplama işlemi esnasında zarar görmemiştir. Bu durumda GO ile kabuk malzemesi yeterli derecede koruma sağlamıştır [14].





Şekil 7. (a) Mikrokapsül içeren epoksi kaplama yüzeyinde analiz öncesi oluşturulmuş çizik (b-c) 96 saat önce oluşturulmuş çizik (d) İyileştirme olmayan çizik görüntüsü

Mikrokapsül içeren epoksi kaplamanın OM görüntüsü Şekil 8'de verilmiştir ve genel itibariyle kapsüllerin epoksi içinde başarıyla dağıldığı görülmektedir. Şekil 10'da epoksi ile yapılan kaplamada çizik oluşturduktan hemen sonra alınan görüntünün 24 saat sonra kapandığı görülmektedir. SEM görüntüleri de bu durumu desteklemektedir. Şekil 11'de sol-jel ile yapılan kaplamada ise çiziğin iyileşmeye başladığı fakat bölgesel olarak iyileşmeyen yerlerin olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Mikrokapsül içeren epoksi kaplamanın optik mikroskop görüntüsü

3.3 TGA

Termal analiz, mikrokapsüllerin termal bozunma sıcaklığının anlaşılmasına yardımcı olmaktadır. Böylece doğru sıcaklık uygulama aralığı seçilebilmektektir. Şekil 9'da kendi kendini iyileştiren mikrokapsül örneklerinin 800 °C'ye kadar azot atmosferinde yapılan ölçümler neticesinde TGA/DTA eğrileri gösterilmiştir. Bu grafiğe göre ilk sıcaklıklarda, su moleküllerinin buharlaşmasından dolayı hafif dalgalanmalar meydana gelmektedir. eğride Mikrokapsüllerin TGA eğrisi için kütle kaybı yaklaşık 250 °C civarında ortaya cıkmakta ve bu kayıp PUF'un termal bozunmasına atfedilmektedir. Çekirdek malzemesini koruyan kabuğun ayrışmaya başlamasıyla ağırlık kaybı, yaklaşık 350 °C'den sonra hızla artarak 420 °C'de tepe noktasına ulaşmaktadır. 300-500 °C aralığındaki kütle kaybı, keten tohumu yağından kaynaklanmaktadır. DTA eğrisinin tepe noktası olan 420 °C'de mikrokapsüllerin çoğunun kırılarak içerisindeki keten tohumu yağını serbest bıraktığı kabul edilebilir. Ağırlık kaybı yaklaşık 500 °C'de tamamlanmakta ve bu sıcaklık itibariyle ağırlık kaybı eğrisi neredeyse yatay hale gelmektedir. Bu da tüm organik maddelerin ayrıştığını göstermektedir. Sonuç olarak TGA termogramları, keten tohumu yağının PUF kabukta başarıyla kapsüllendiğini doğrulamaktadır.



Şekil 10. (a) Mikrokapsül içeren epoksi kaplamada oluşturulan çizik sonrası optik mikroskop görüntüsü (b) Oluşturulduktan sonra 24 saat boyunca bekletilen çiziğin optik mikroskop görüntüsü



Şekil 9. Keten tohumu yağı içeren mikrokapsüllerin TGA/DTA analizi

Mikrokapsüllerin 250 °C' nin altında kimyasal stabiliteyi iyi derecede koruyabildiğini göstermektedir. Bu sonuçlar literatür ile uyum sağlamaktadır [38].



(b)

Şekil 11. (a) Mikrokapsül içeren sol-jel kaplamada oluşturulan çizik sonrası optik mikroskop görüntüsü (b) Oluşturulduktan sonra 24 saat boyunca bekletilen çiziğin optik mikroskop görüntüsü

3.4 Korozyon

Mikrokapsüller içeren kendi kendini iyileştiren epoksi kaplama için korozyon test düzeneği Şekil 12'de, EIS ölçümlerinden elde edilen Nyquist grafikleri ise Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 12. Mikrokapsül içeren epoksi kaplama için korozyon testinin uygulanması

Şekil 13' te halka içerisine alınmış kısımda çözelti direnci küçülmüş ve malzemenin korozyon direnci azalmıştır. Bu durum malzemenin zamanla korozyona uğradığını göstermektedir. Açık devre potansiyeli davranışı ve Nyquist eğrileri literatüre uyum sağlamaktadır [39].

Tablo 2'de verilen değerlere göre ise R_s (solution resistance, R1) çözelti direncini, Rct (charge transfer resistance, R2) yüzeydeki yük transfer direncini, Q (Constant Phase Element-CPE, Q1) kapasitif davranışın ideal olmayan durumlarını modelleyen sabit faz elemanını, a ise CPE'nin ideal kapasitörden sapma derecesini ifade ederken, σ Warburg empedansı (W1) olarak difüzyon kontrollü süreçlerin sistem üzerindeki etkisini göstermektedir. Başlangıçta yüksek olan R_{ct} değeri zamanla azalarak, elektrot yüzeyinde koruyucu tabakanın etkinliğini kaybettiğini ve korozyonun ilerlediğini göstermektedir. 0 saatlik ölçümde 2152,1 Ω olan R_{ct}, 36 saat sonunda 1278,6 Ω değerine inmiş olup, bu durum malzemenin zamanla daha fazla elektrokimyasal etkileşime maruz kaldığını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, zamanla korozyonun ilerlediğini, korozyon ilerledikçe kaplamanın koruyucu özelliklerinin zayıfladığını ve yük transferinin giderek daha az dirençle gerçekleştiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 2. EIS sonuçlarına göre devre eleman değerleri

Süre	R _s (Ohm)	R _{ct} (Ohm)	$Q(S \cdot s^{\alpha - 1})$	α	$\sigma \left(\Omega \cdot s^{1/2} \right)$
0 hr	862.2	2152.1	-7.5x10 ⁻⁵	0.62	12582
3 hr	909.3	2123.9	-6.4x10 ⁻⁵	0.58	15370
6 hr	877.9	2037.7	-5.3x10 ⁻⁵	0.58	14259
12 hr	924.7	1969.0	-5.7x10 ⁻⁵	0.60	16836
18 hr	809.2	1689.8	-7.8x10 ⁻⁵	0.62	12278
24 hr	739.7	1429.3	-10.5x10 ⁻⁵	0.57	9052
36 hr	845.4	1278.6	-5.3x10 ⁻⁵	0.59	17670



Şekil 13. 36 saatlik %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde başlangıçta -0,55 V açık devre potansiyeline sahip, zamanla -0,57 V'a doğru gerileyen kaplanmış çelik numunesine ait Nyquist diyagramı kıyaslaması (Eşdeğer devre şekil içerisinde verilmiştir)

4 Sonuçlar

Yapılan çalışmada GO içeren keten tohumu yağlı mikrokapsüller, Pickering emülsiyon yöntemiyle PUF kabuklarında küresel formda başarılı bir şekilde üretilmiştir. Bu mikrokapsüller epoksi reçine ve sol-jel çözeltisine dahil edilerek çelik malzeme üzerine kaplama olarak uygulanmış, kendini iyilestirme performansı incelenmiştir. Kaplamaların kendi kendini iyileştirme özelliği SEM ve optik mikroskop gözlemleriyle kanıtlanmıştır. TGA ile iyileştirici madde olan keten tohumu yağının kapsüllendiği, mikrokapsüllerin termal stabilitesinin iyi olduğu ve başlangıç ayrışma sıcaklığının yaklaşık olarak 250 °C olduğu belirlenmiştir. Kaplama içerisindeki mikrokapsüllerin dağılımının genel itibariyle homojen olduğu gözlemlenmiştir. Fakat kaplama yüzeyinde kendi kendine iyileşme olmasına rağmen çizik izleri yüzeyde durmakta ve dezavantaj oluşturmaktadır. Literatür çalışmaları da bu durumu desteklemektedir [5,33,40,41].

Sonuç itibariyle üretilen bu mikrokapsüller kendi kendini iyileştirme için gereksinimleri karşılamakta ve kaplamalara uyum sağlamaktadır. Bu malzemelerin geliştirilmesi ile otomotiv, beyaz eşya, savunma gibi alanlarda malzemelerin kullanım ömrünü artırmak, bakım ve korozyon maliyetlerinden tasarruf sağlamak son derece ilgi çekmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

- B. Willocq, J. Odent, P. Dubois and J. M. Raquez, Advances in intrinsic self-healing polyurethanes and related composites. RSC Advances, 10 (23), 13766-13782, 2020. https://doi.org/10.1039/D0RA01394C
- [2] M. A. Mohammadi, R. Eslami-Farsani and H. Ebrahimnezhad-Khaljiri, Experimental investigation of the healing properties of the microvascular channels-based self-healing glass fibers/epoxy composites containing the three-part healant. Polymer Testing, 91, 106862, 2020. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106862

https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106862

- M. Zhu, J. Liu, L. Gan ve M. Long, Research progress in bio-based self-healing materials. European Polymer Journal, 129, 109651, 2020. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109651
- [4] N. I. Khan, S. Halder, S. B. Gunjan and T. Prasad, A review on Diels-Alder based self-healing polymer composites. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 377 (1), 012007, 2018. https://doi.org/10.1088/1757-899X/377/1/012007
- J. Li, H. Shi, F. Liu and E. H. Han, Self-healing epoxy coating based on tung oil-containing microcapsules for corrosion protection. Progress in Organic Coatings, 156, 106236, 2021. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106236
- [6] X. Wang, F. Liu, X. Zheng and J. Sun, Water-enabled self-healing of polyelectrolyte multilayer coatings. Angewandte Chemie International Edition, 50 (48),

11378-11381,

https://doi.org/10.1002/anie.201105822

[7] A. Cuvellier, A. Torre-Muruzabal, G. Van Assche, K. De Clerck and H. Rahier, Selection of healing agents for a vascular self-healing application. Polymer Testing, 62, 302-310, 2017. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.07.013

2011.

- [8] Y. Du, D. Li, L. Liu and G. Gai, Recent achievements of self-healing graphene/polymer composites. Polymers, 10 (2), 114, 2018. https://doi.org/10.3390/polym10020114
- [9] G. Thangavel, M. W. M. Tan and P. S. Lee, Advances in self-healing supramolecular soft materials and nanocomposites. Nano Convergence, 6 (1), 1-18, 2019. https://doi.org/10.1186/s40580-019-0199-9
- [10] M. Kosarli, D. G. Bekas, K. Tsirka, D. Baltzis, D. T. Vaimakis-Tsogkas, S. Orfanidis and A. S. Paipetis, Microcapsule-based self-healing materials: Healing efficiency and toughness reduction vs. capsule size. Composites Part B: Engineering, 171, 78-86, 2019. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.04.030
- [11] N. N. Sahir, N. A. Hassan, N. B. Hassan and N. B. Johari, Graphene oxide microcapsules (GOMs) with linseed oil core via Pickering emulsion method: Effect of disperse speed. IIUM Engineering Journal, 22 (1), 213-222, 2021. https://doi.org/10.31436/iiumej.v22i1.1426

[12] F. Yu, H. Feng, L. Xiao and Y. Liu, Fabrication of graphene oxide microcapsules based on Pickering emulsions for self-healing water-borne epoxy resin coatings. Progress in Organic Coatings, 155, 106221, 2021. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106221

- [13] S. Sarkar and B. Kim, Synthesis of graphene oxideepoxy resin encapsulated urea-formaldehyde microcapsule by in situ polymerization process. Polymer Composites, 39 (3), 636-644, 2018. https://doi.org/10.1002/pc.23979
- [14] Li, Z. Li, Q. Feng, H. Qiu, G. Yang, S. Zheng and J. Yang, Encapsulation of linseed oil in graphene oxide shells for preparation of self-healing composite coatings. Progress in Organic Coatings, 129, 285-291, 2019. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.01.024
- [15] V. Naveen, A. P. Deshpande and S. Raja, Self-healing microcapsules encapsulated with carbon nanotubes for improved thermal and electrical properties. RSC Advances, 10 (55), 33178-33188, 2020. https://doi.org/10.1039/D0RA06631A
- [16] S. J. García, H. R. Fischer and S. Van Der Zwaag, A critical appraisal of the potential of self-healing polymeric coatings. Progress in Organic Coatings, 72 (3), 211-221, 2011. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.06.016
- [17] A. Kausar, Polymer coating technology for high performance applications: Fundamentals and advances. Journal of Macromolecular Science, Part A, 55 (5), 440-448, 2018. https://doi.org/10.1080/10601325.2018.1453266
- [18] M. Samadzadeh, S. H. Boura, M. Peikari, S. M. Kasiriha and A. Ashrafi, A review on self-healing

coatings based on micro/nanocapsules. Progress in Organic Coatings, 68 (3), 159-164, 2010. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2010.01.006

- [19] S. M. Dezfuli and M. Sabzi, Deposition of self-healing thin films by the sol-gel method: A review of layerdeposition mechanisms and activation of self-healing mechanisms. Applied Physics A, 125 (8), 1-8, 2019. https://doi.org/10.1007/s00339-019-2854-8
- [20] S. Habib, R. A. Shakoor and R. Kahraman, A focused review on smart carriers tailored for corrosion protection: Developments, applications, and challenges. Progress in Organic Coatings, 154, 106218, 2021. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106218
- [21] N. K. Mehta and M. N. Bogere, Environmental studies of smart/self-healing coating system for steel. Progress in Organic Coatings, 64 (4), 419-428, 2009. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2008.08.007
- [22] H. Y. Su, P. L. Chen and C. S. Lin, Sol–gel coatings doped with organosilane and cerium to improve the properties of hot-dip galvanized steel. Corrosion Science, 102, 63-71, 2016. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.09.019
- [23] H. Hassannejad and A. Nouri, Synthesis and evaluation of self-healing cerium-doped chitosan nanocomposite coatings on AA5083-H321. International Journal of Electrochemical Science, 11, 2106-2118, 2016. https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)16086-X
- [24] D. G. Shchukin, M. Zheludkevich, K. Yasakau, S. Lamaka, M. G. Ferreira and H. Möhwald, Layer-bylayer assembled nanocontainers for self-healing corrosion protection. Advanced Materials, 18 (13), 1672-1678, 2006. https://doi.org/10.1002/adma.200502053
- [25] M. Attaei, L. M. Calado, M. G. Taryba, Y. Morozov, R. A. Shakoor, R. Kahraman and M. F. Montemor, Autonomous self-healing in epoxy coatings provided by high efficiency isophorone diisocyanate (IPDI) microcapsules for protection of carbon steel. Progress in Organic Coatings, 139, 105445, 2020. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105445
- [26] D. Yuan, V. Solouki Bonab, A. Patel, T. Yilmaz, R. A. Gross and I. Manas-Zloczower, Design strategy for self-healing epoxy coatings. Coatings, 10 (1), 50, 2020. https://doi.org/10.3390/coatings10010050
- [27] G. Li, P. Xiao, S. Hou and Y. Huang, Graphene based self-healing materials. Carbon, 146, 371-387, 2019. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.02.011
- [28] P. Vijayan and M. Al-Maadeed, Self-repairing composites for corrosion protection: A review on recent strategies and evaluation methods. Materials, 12 (17), 2754, 2019. https://doi.org/10.3390/ma12172754
- [29] A. H. Navarchian, N. Najafipoor and F. Ahangaran, Surface-modified poly (methyl methacrylate) microcapsules containing linseed oil for application in self-healing epoxy-based coatings. Progress in Organic Coatings, 132, 288-297, 2019. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.03.029
- [30] H. Ullah, K. A. M. Azizli, M. B. C. Ismail, M. I. Khan and Z. B. Man, The potential of microencapsulated self-

healing materials for microcracks recovery in selfhealing composite systems: A review. Polymer Reviews, 56 (3), 429-485, 2016. https://doi.org/10.1080/15583724.2015.1107098

- [31] K. Wu, Y. Chen, J. Luo, R. Liu, G. Sun and X. Liu, Preparation of dual-chamber microcapsule by Pickering emulsion for self-healing application with ultra-high healing efficiency. Journal of Colloid and Interface Science, 600, 660-669, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.05.066
- [32] C. Xu, W. Gou, X. Wang, J. Zhou, J. Liu and K. Chen, Synthesis of paraffin@PS/reduced graphene oxide microcapsules via Pickering emulsion for multiprotective coatings. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 613, 126054, 2021. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.126054
- [33] H. Abdipour, M. Rezaei and F. Abbasi, Synthesis and characterization of high durable linseed oil-urea formaldehyde micro/nanocapsules and their selfhealing behaviour in epoxy coating. Progress in Organic Coatings, 124, 200-212, 2018. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.08.019
- [34] H. Ullah, K. A. M. Azizli, M. B. C. Ismail, M. I. Khan and Z. B. Man, The potential of microencapsulated selfhealing materials for microcracks recovery in selfhealing composite systems: A review. Polymer Reviews, 56 (3), 429-485, 2016. https://doi.org/10.1080/15583724.2015.1107098
- [35] E. Katoueizadeh, S. M. Zebarjad and K. Janghorban, Investigating the effect of synthesis conditions on the formation of urea–formaldehyde microcapsules. Journal of Materials Research and Technology, 8 (1), 541-552, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.04.013
- [36] A. S. Hicyilmaz, A. C. Bedeloglu and Y. Bhoge, In Situ Graphene Oxide Reinforced Poly (Urea-Formaldehyde) Microencapsulation of Epoxy. Materials Science Research India, 16 (1), 7, 2019. https://doi.org/10.13005/msri/160103
- [37] D. Şam, E. Arpat and V. Gunay, Hybrid Nano-Composite Sol-Gel Coatings on Glass. Key Engineering Materials, 264, 395-398, 2004. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.264-268.395
- [38] J. Li, Q. Feng, J. Cui, Q. Yuan, H. Qiu, S. Gao and J. Yang, Self-assembled graphene oxide microcapsules in Pickering emulsions for self-healing waterborne polyurethane coatings. Composites Science and Technology, 151, 282-290, 2017. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.07.031
- [39] M. Behzadnasab, S. M. Mirabedini, M. Esfandeh and R. R. Farnood, Evaluation of corrosion performance of a self-healing epoxy-based coating containing linseed oil-filled microcapsules via electrochemical impedance spectroscopy. Progress in Organic Coatings, 105, 212-224, 2017.

https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2017.01.006

- [40] K. Thanawala, N. Mutneja, A. S. Khanna and R. K. Singh Raman, Development of self-healing coatings based on linseed oil as autonomous repairing agent for corrosion resistance. Materials, 7 (11), 7324-7338, 2014. https://doi.org/10.3390/ma7117324
- [41] C. Suryanarayana, K. C. Rao and D. Kumar, Preparation and characterization of microcapsules containing linseed oil and its use in self-healing coatings. Progress in Organic Coatings, 63 (1), 72-78, 2008. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2008.04.008







Niğde Ömer Halisdemir Üni**ver**sitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araștırma makalesi / Research article

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



Experimental investigation of the behavior of unreinforced masonry structures under horizontal loads as defined in TBDY-2018

TBDY-2018'de belirtilen yığma yapı türlerinden donatısız yığma yapıların yatay yükler etkisi altındaki davranışlarının deneysel olarak incelenmesi

Mehmet Orhan^{1,*} ^(D), M. Sami Döndüren²

¹ Selçuk University, Department of Construction, 42130, Konya, Türkiye ² Konya Technical University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Civil Engineering Department, 42130, Konya, Türkiye

Abstract

Masonry structures constitute a significant portion of the building stock in Turkey and are commonly used, particularly along the East Anatolian, North Anatolian, and Western Aegean fault lines. These structures are often preferred for economic reasons; however, due to inadequate material quality and construction techniques, they present a considerable seismic risk. Among the various masonry types defined in the Turkish Building Earthquake Code (TBDY 2018), unreinforced masonry structures were experimentally investigated in this study. A full-scale, single-story, single-span unreinforced masonry specimen was constructed in a laboratory environment and subjected to reversed cyclic loading tests. The loading procedure of the experiment was conducted in a load-controlled manner up to the maximum load, and in a displacement-controlled manner after reaching the maximum load. At each stage of the experimental studies, the applied load and displacement values were recorded through a computer. The sizes, thicknesses, and locations of the cracks formed in the structure were carefully monitored and marked on the structure, and the damage state was determined in detail. This study aimed to evaluate the seismic performance of unreinforced masonry structures, focusing on crack formation regions under tensile and compressive loads. The findings reveal that cracks predominantly form around window openings, and unreinforced masonry structures exhibit brittle behavior. Consequently, the study highlights the importance of investigating other types of masonry structures and conducting comparative analytical analyses to understand their performance comprehensively.

Keywords: Experimental model analysis, Masonry structures, TBDY-2018 (Turkish Building Earthquake Code), Types of masonry structures, Unreinforced masonry structure, Seismic performance

1 Introduction

Turkey is located on one of the most seismically active regions in the world, as illustrated in Figure 1, which presents the seismic hazard map of the country. A significant portion

Öz

Yığma yapılar, Türkiye'deki yapı stoğunun önemli bir bölümünü olusturmakta ve özellikle Doğu Anadolu, Kuzev Anadolu ve Batı Ege fay hatları boyunca yaygın olarak kullanılmaktadır. Genellikle ekonomik nedenlerle tercih edilen bu yapılar, malzeme kalitesi ve inşaat tekniklerinin yetersizliği nedeniyle depreme karşı risk taşımaktadır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) kapsamında tanımlanan farklı yığma yapı türleri arasında yer alan donatısız yığma yapılar, bu çalışmada deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, 1/1 ölçekli, tek katlı ve tek açıklıklı donatısız yığma yapı numunesi laboratuvar ortamında üretilmiş ve tersinir yükleme testine tabi tutulmuştur. Deney yükleme prosedürü, maksimum yüke kadar yük kontrollü, maksimum yükten sonra ise deplasman kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların her aşamasında, uygulanan yük ve deplasman değerleri bilgisayar aracılığıyla kaydedilmiştir. Yapıda oluşan çatlakların boyutları, kalınlıkları ve yapıda bulundukları konumlar dikkatle gözlemlenmiş ve yapıya işaretlenerek hasar durumu detaylı bir şekilde belirlenmiştir. Bu çalışma, donatısız yığma yapıların deprem performansını incelemiş olup çekme ve itme yükleri etkisi altındaki binadaki çatlak oluşum bölgeleri gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, donatısız yığma yapıların pencere çevresinde çatlaklarının oluştuğu ve gevrek bir davranış sergilediği, bu nedenle diğer yığma yapı türlerinin incelenmesi ve analitik olarak karşılaştırılmasının önem taşıdığı anlaşılmaktadır.

Anahtar kelimeler: Deneysel model analiz, Yığma yapılar, TBDY-2018, Yığma yapı türleri, Donatısız yığma yapı, sismik performans

of Turkey's population resides in areas with high seismic risk.

This situation increases the loss of life and property caused by earthquakes, thus making it necessary to take precautions to reduce the earthquake risk. One of the primary factors contributing to building collapses in Turkey is

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mehmet.orhan@selcuk.edu.tr (M. Orhan) Geliş / Received: 03.01.2025 Kabul / Accepted: 19.03.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngmuh.1612998

inadequate design and poor construction quality in response to seismic loads. To address these losses, the Turkish Building Earthquake Code 2018 (TBDY-2018) was enacted.



Figure 1. The seismic hazard map of Turkey [1]

TBDY-2018 provides criteria for designing earthquakeresistant structures, including masonry buildings. Masonry structures, constructed using materials such as stone, brick, and concrete blocks, are notable for their ability to bear both vertical and horizontal loads. These structures are particularly prevalent in rural areas and historical buildings, offering advantages such as low cost and simple construction techniques. Furthermore, masonry structures hold cultural significance as they reflect the architectural and engineering knowledge of past eras.

In this study, unreinforced masonry structures, as defined under TBDY-2018, were investigated for their behavior under different loading conditions. Experimental tests were conducted on a full-scale, single-story, single-span unreinforced masonry specimen in a laboratory environment. The structures were subjected to reversed cyclic loads.

The primary aim of this study is to experimentally examine the behavior of masonry structures under seismic effects and assess their damage states.

The literature highlights several experimental academic studies focusing on the seismic behavior of masonry structures. For instance, Saberi [2], investigated the seismic behavior of masonry walls with door openings having a height-to-width ratio greater than one, employing quasistatic testing methods to analyze the influence of this ratio on seismic performance. Döndüren [3], constructed two fullscale masonry wall prototypes with identical geometric properties in a laboratory setting; one was built with normal mortar, while the other used Sikalatex-enhanced mortar, and both were subjected to compression tests. Döndüren and Kollu [4], analyzed the damage and collapse causes of masonry structures during earthquakes in Turkey over the past 15 years, using photographs to support their findings, and proposed solutions for mitigating damage in rural areas. Yıldızoğlu, Can, and Tayfur [5], examined the material properties and existing issues of the Korkut Ata High School in Bayburt using the StatiCAD-Masonry program, evaluating its performance under the 2007 Earthquake Code and the 2013 Risky Buildings Regulation. Bahadır and Balık [6], developed 1/6 scale, single-story, three-bay masonry prototypes using various wall bonding techniques and subjected these prototypes to dynamic tests on a shaking table, with displacement measurements captured through image processing and acceleration data obtained using

accelerometers. García, Jiménez-Pacheco, and Ulloa [7], analyzed the seismic resilience of brick structures using an experimental damage model, validating this model with reallife examples from Cuenca, Ecuador. Kanit R., Erdal M., and Can O. [8], experimentally investigated the behavior of loadbearing masonry walls under out-of-plane loads. The effects of different material types and wall geometries on loadbearing capacity and cracking behavior were evaluated, and design recommendations were provided based on the results. [9], Kıpçak F. and Erdil Barış, in their study, they experimentally and analytically examined the out-of-plane behavior of brick masonry walls, demonstrating that side walls increase stiffness and lateral load capacity, while door and window openings reduce stiffness, leading to earlier and more brittle failure.

These studies significantly contribute to understanding and improving the seismic behavior of masonry structures under varying conditions.

2 Materials and methods

As part of this study, a single-story, full-scale (1:1) unreinforced masonry building specimen (S1) with dimensions of $3.2 \text{ m} \times 3.3 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$ was constructed. This specimen was experimentally investigated under the influence of reversed and repeated loads.

Loading Process: Reversed cyclic loads were applied to the setup using a hydraulic loading system. The resulting damage under the applied loads were marked and visually observed on the building wall's surface.

Displacement Measurement: Displacement values were recorded using displacement gauge and a data acquisition system.

Test Environment: All experiments were conducted at the Structural and Earthquake Laboratory of the Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Konya Technical University.

2.1 General characteristics of the specimen designed as an unreinforced masonry building

The unreinforced masonry building setup used in the experimental study was prepared in accordance with the minimum requirements specified in the *Turkish Building Earthquake Code 2018 (TBDY 2018). The architectural plan of the building is presented in Figure 2.

Materials and Geometry: The materials and geometric properties used in the construction of the setup were designed in compliance with the standards outlined in TBDY 2018.

In this study, the experimental specimen was constructed using binding mortar and load-bearing masonry bricks. The window openings measure 100 cm \times 100 cm each (two windows), and the door opening measures 100 cm in width and 200 cm in height. The door openings begin at the foundation level, while the window openings are positioned 100 cm above the foundation level. Displacement transducers were placed at the corner points of the specimen, and the loading system was arranged at the top floor level of the rear facade.



Figure 2. The architectural plan of the unreinforced masonry building

The detailed views and geometric dimensions of the specimen's left, right, front, and rear facades are presented in Figure 3.



Figure 3. The views of the masonry test specimen

2.1.1 Materials used in the construction of the unreinforced masonry building specimen and compression strength tests

Load-bearing bricks with dimensions of $190 \times 290 \times 135$ mm, compliant with the standards outlined in TBDY 2018, were used in the construction of the masonry walls. To ensure that the bricks met the minimum quality requirements, three samples were prepared and subjected to compression strength tests. The compressive strengths of the bricks were calculated by excluding the void areas of the bricks. The brick void ratio was calculated as 0.52 in Figure 4.

The compression strength results of the brick samples are presented in Table 1, and the average compression strength value was used for analysis.

Number No	Compressive Strength (MPa)	Average (MPa)
1	5.15	
2	5.32	5.14
3	4.94	



Figure 4. Dimensions of the test brick.

Table 2 presents the compressive strength results of the mortar samples used in the compressive strength test of the walls of the unreinforced masonry specimen. To test the strength of the mortar used in the unreinforced masonry building specimen, three cube samples with dimensions of 15x15x15 cm were taken. The samples were cured in water for 28 days in accordance with standard procedures and then tested for compressive strength at the Material Laboratory of Konya Technical University.

The compressive strength values obtained from tests conducted on brick and mortar materials in accordance with TS EN 772-1 and TS EN 1015-11 standards are used for determination [10].

Table 2. Compressive strength of mortar in unreinforced masonry walls

Number No	Compressive Strength (MPa)	Average (MPa)
1	9.41	
2	10.19	10.40
3	11.59	

The concrete class of reinforced concrete components used in unreinforced, reinforced, confined masonry buildings, and reinforced panel system buildings must be at least C25 [11].

To determine the mechanical properties of the concrete used in foundations, slabs, and horizontal beams, three cube samples with dimensions of $15 \times 15 \times 15$ cm were taken during the concrete casting process.

Table 3 provides a detailed presentation of the samples used in the compressive strength tests of the concrete in the foundations, slabs, and horizontal beams of the unreinforced masonry walls.

Table 3. Compressive strength of concrete samples used in the experiments

	Building	
Number No	Compressive Strength (MPa)	Average (MPa)
1 2	26.41 24.78	26.26
3	27.58	
	Floor, Horizontal Beams	
Number No	Compressive Strength (MPa)	Average (MPa)
1 2	25.15 23.98	25.51
3	27.41	

2.1.2 Dimensions and technical specifications of the test specimen's foundation

The foundation used in the unreinforced test specimen was designed with dimensions of 320 cm×330 cm and a height of 15 cm, as shown in Figure 5, ensuring a rigid diaphragm property.



Figure 5. Technical drawing of the test specimen's foundation plan

After the completion of formwork and reinforcement works, ready-mix concrete of class C25 was ordered, and the concrete was cast. The concrete was placed using a concrete pump, and images of the process before and after the casting are presented in Figure 6.

The reinforcement and formwork plan for the horizontal beams is shown in Figure 7. B420C ribbed steel reinforcements were used in the horizontal beams. The reinforcements were tied with binding wire, and longitudinal reinforcements of 6012 and stirrups of 08 spaced at 150 mm intervals were placed.



Figure 6. Foundation concrete casting for test specimens



Figure 7. Formwork and reinforcement plan for the floor and horizontal beams of the unreinforced masonry building

After completing the reinforcement assembly, the concrete casting process was initiated. Concrete of class C25 was placed on the floor using a concrete pump. The concrete casting process is illustrated in Figure 8.



Figure 8. Concrete casting process

The formwork was removed after a 15-day curing period to allow the concrete to set. To enhance the visibility of cracks and fractures during analysis, the surfaces were painted with white paint, as shown in Figure 9.



Figure 9. Appearance of the unreinforced test specimen painted in white

2.1.3 Experimental setup for the unreinforced masonry building

In the experiments, load measurements were conducted using a single load cell, while displacement measurements were obtained using 12 linear variable displacement gauge (LVDTs). To enhance the precision of the LVDTs, 15 cm \times 15 cm glass plates were cut and fixed at the contact points on the specimen using silicone. Data from the load cell and LVDTs were transmitted via cables to a data acquisition system.

The measurements recorded by the data acquisition system were transferred to a computer through a device known as a gateway. The system comprised 13 channels in total, including 12 LVDTs (4 of which were positioned at the foundation) and 1 load measurement channel (Channel 8) in Figure 10.



Figure 10. Naming of the elements in the unreinforced test specimen (S1)

The data transferred to the computer were analyzed in real-time using specialized software, enabling the simultaneous generation of desired graphs during the experiments.

LVDTs and the load cell data were utilized to evaluate the load-deformation relationships and mechanical performance of the specimens. Graphs were prepared for each specimen to visualize the experimental results, with detailed attention to the data processing methods and analysis steps involved in their creation. This approach to data processing and graphical representation served as a fundamental method for assessing the experimental outcomes.

3 Findings and Discussion

The pre-test images of the S1 test specimen are shown in Figure 11.



Figure 11. Pre-test appearance of the S1 test specimen

The loading procedure of the experiment was conducted in a load-controlled manner up to the maximum load, and in a displacement-controlled manner after reaching the maximum load. Since the reinforced masonry structures to be examined in future studies, as mentioned at the end of the article, are expected to exhibit behavior similar to that of reinforced concrete structures, the loading procedure was designed to be consistent with the procedures used for reinforced concrete structures. The loading procedure for reinforced concrete structures is generally performed in a load-controlled manner up to the maximum load, followed by a displacement-controlled manner after the maximum load. To ensure consistency in the comparison with the reinforced masonry structure in this study, the same loading procedure was applied.

The loading history applied during the tests conducted on the S1 specimen and the resulting displacement values are presented in Table 4.

The horizontal load-peak displacement hysteresis curves obtained from the front and rear faces of the S1 test specimen are presented and analyzed in detail in the results section. These graphs comprehensively illustrate the mechanical behavior and performance of the specimen under loading conditions (Figure 12).

Table 4. Horizontal loads applied to the s1 test specimen and the resulting displacements

S1	S1-Front	S1-Front	S1-Rear	S1-Rear	Horizont
CYCLE	1	2	2	1	al Load
S	LVDT-	LVDT-	LVDT-	LVDT-	(kN)
	2- Front	3- Front	6- Rear	7- Rear	
	(mm)	(mm)	2	1	
			(mm)	(mm)	
-8	4.18	0.33	-2.55	-4.26	-46.99
-7	5.40	1.51	-3.73	-4.23	-59.68
-6	2.59	0.89	-1.38	-2.07	-55.65
-5	1.66	2.29	-1.43	-2.23	-49.13
-4	0.92	1.26	-0.84	-1.01	-40.28
-3	0.74	1.02	-0.68	-0.76	-31.11
-2	0.46	0.69	-0.42	-0.44	-21.00
-1	0.18	0.38	-0.17	-0.14	-10.73
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
+1	-0.12	-0.15	-0.12	-0.13	9.46
+2	-0.35	-1.15	0.33	0.36	21.90
+3	-1.10	-2.03	1.11	1.11	29.82
+4	-2.39	-3.48	2.43	1.09	38.68
+5	-4.12	-5.04	4.24	2.45	38.61
+6	-10.33	-10.04	10.45	6.98	32.83
+7	-12.00	-13.88	11.66	10.53	26.14
+8	-17.53	-19.40	17.18	14.40	22.62

The maximum horizontal load generated in the push and pull directions and the corresponding displacement values are presented in Table 4. The structure carried less horizontal load in the push direction. This indicates that brittle building systems such as masonry have a higher load-bearing capacity in the compression direction, while the load-bearing capacity in the other direction is not significantly affected. Since the unreinforced specimen exhibited brittle behavior, its stiffness was found to be high. As the load increased, the amount of damage in the unreinforced specimen also increased, leading to higher displacement values, which in turn resulted in a reduction in stiffness during subsequent cycles.

In the loading protocol applied to the S1 test specimen, no movement was observed in the foundation plane. A total of ± 8 cycles of loading were applied during the experiment, transitioning from load-controlled to displacementcontrolled loading at the end of the process. While no cracks were observed during the first three cycles, the first crack appeared during the +4th cycle (Figure 13).

During this cycle, the total horizontal load applied to the specimen reached a maximum of 38.68 kN, followed by a reduction in the pushing load. The displacement values measured during the +4th cycle were recorded as 2.39 mm (S1-Front 1) and 3.48 mm (S1-Front 2) on the front face and 1.09 mm (S1-Rear 1) and 2.43 mm (S1-Rear 2) on the rear face (Table 6).



Figure 12. Cyclic hysteresis curves of horizontal loaddisplacement for the S1 test



Figure 13. General appearance after the 4th cycle

In the -7th cycle, the maximum horizontal load resistance of the specimen was measured as 59.68 kN. During this cycle, the displacements were recorded as 5.40 mm (S1-Front 1) and 1.51 mm (S1-Front 2) on the front face and 4.23 mm (S1-Rear 1) and 3.73 mm (S1-Rear 2) on the rear face. Crack formations were observed around the windows, including shear cracks inclined at approximately 45° and horizontal sliding cracks in the upper and lower regions of the windows.

The loading protocol continued during the 7th cycle, and the specimen was loaded up to a crack level of 30 mm. This process was closely monitored to determine the reduction in the load-bearing capacity and the extent of damage to the specimen (Figure 14).



Figure 14. General appearance after the 7th cycle

After the 7th cycle, diagonal (shear) cracks were observed, particularly in areas near the edges of the windows and corners (Figure 15).



Figure 15. General appearance after completion of all cycles

The types of cracks that may occur in masonry structures after an earthquake are shown in Figure 16.



Figure 16. Types of cracks that may occur in masonry structures after an earthquake [12].

Figure 17 details the types of fractures that occur in masonry walls under loads parallel to the horizontal joints. These include cracks along the bricks (Figure 17a), shear cracks passing through the joints (Figure 17b), crushing at the wall toes (Figure 17c), and rocking of load-bearing walls due to separation from the floors (Figure 17d) [13].



Figure 17. Failure modes in masonry walls under the effect of loads parallel to horizontal joints [13].

The cracks formed after the S1 test were analyzed by mapping them on the left side of the specimen. Diagonal cracks in the specimen initiated from the edges of the windows and propagated upward and downward at a 45° angle, being classified as shear cracks.

The concentration of cracks around window and door openings indicates that these regions are structurally weak due to stress concentration. Horizontally propagating cracks in areas with mortar infill typically suggest damage resulting from friction or weak connections under horizontal loads.

The accumulation of dense cracks around the windows and in the lower sections of the walls reveals that the load was more concentrated in these areas, identifying them as critical weak points in the structure (Figure 14).



Figure 14. Appearance of the cracks on the left side facade of the s1 test specimen after the experiment

Based on the data obtained from the hysteresis curve of the S1 specimen, envelope curves were generated using the maximum load values measured in each cycle and the corresponding displacement values (Figure 15).

As shown in Figure 15, the unreinforced masonry structure exhibited brittle behavior, indicating that while the building system has a higher load-bearing capacity in the compression direction, it has no significant effect on the load-bearing capacity in the opposite direction.

The maximum load values in the tension and compression directions, along with the corresponding displacement values, are presented in Table 6.

In each experimental cycle, the cyclic stiffness was calculated by taking the ratio of the maximum horizontal load to the corresponding horizontal displacement (Figure 16).

In the graph, the stiffness values obtained from the push cycles are presented on the right side, while the values from the pull cycles are shown on the left side. These calculations were carried out to evaluate the stiffness variations exhibited by the specimen in each cycle and to analyze its mechanical behavior in detail.



Figure 15. Horizontal load-displacement graphs of the S1 test specimen

Table 6. Displacement values corresponding to themaximum loads in tensile and compressive for the S1 test

		Peak Displacement at Maximum Load (mm)					
Max	imum Load	Fro	nt 1	Rea	r 1	Rea	ur 2
Tensile (T)	Compressive (C)	Т	С	Т	С	Т	С
-59.7	38.7	-5.4	2.4	-4.2	1.1	-3.7	2.4



Figure 16. Stiffness degradation curve of the S1 test

4 Conclusions

When a lateral load, such as seismic forces, is applied to structures, they initially exhibit rigid behavior rather than ductile behavior. The initial stiffness observed in this phase indicates the structures' ability to undergo displacements under low loads.

In the case of the unreinforced specimen, as the load increased, the amount of damage also increased, leading to higher displacement values. As a result, stiffness decreased in subsequent cycles. It was observed that these structures exhibited brittle behavior, with a rapid reduction in stiffness under horizontal loading and inadequate performance in the tensile direction.

In the experimental studies, fractures and cracks were formed in the brick and mortar elements. The stress concentrations around the window and door openings indicate that these regions are weak points in masonry buildings. Such stress concentrations can lead to the initiation of cracks or material fatigue over time. The stress concentrations around the openings emerge as critical regions in terms of structural integrity. Research on reinforced, confined, and reinforced panel masonry buildings, as defined in TBDY-2018, is essential for comparing with existing studies and evaluating the performance of these structures.

Design and material improvements can be made by optimizing the reinforcement and adding strengthening elements at the edges of windows and doors to reduce stress concentrations.

Acknowledgement

This study is derived from the doctoral thesis titled "Experimental and Analytical Investigation of the Behavior of Masonry Structures Under Horizontal Loads as Defined in TBDY-2018" prepared by Lecturer Mehmet Orhan. In the study, the behavior of reinforced masonry structures under lateral loads will be comprehensively examined using both experimental and analytical methods. While the experimental studies will be conducted in a laboratory environment, the analytical analyses will be performed using ANSYS software. The experimental and analytical data evaluated obtained will be comparatively, and recommendations will be provided regarding the practical challenges and advantages of the design criteria specified in the regulations, focusing on the cost and applicability of these structures. Thus, the study aims to make a significant contribution to existing literature. The doctoral thesis has been supported by the Scientific Research Projects (BAP) Coordination Unit of Konya Technical University.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (ithenticate): %14

References

- [1] AFAD, Seismic Hazard Map Summary Report, Jan. 2, 2018. [Online]. Available: https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/ozetRapor.xhtml [Accessed: Dec. 2, 2024].
- [2] M. Saberi, Behavior of Masonry Buildings under Earthquake Loads, MSc thesis, Istanbul Technical University, 1998.
- [3] M. S. Döndüren, Effect of Improved Mortar and Plaster on the Mechanical Behavior of Out-of-Plane Loaded Brick Walls, MSc thesis, Selçuk University, Institute of Science, 2008.
- M. S. Döndüren and M. S. Kollu, "Damages and Causes Observed in Masonry Buildings During Earthquakes in Turkey in the Last 15 Years," Selçuk Technical Journal, vol. 17, no. 2, pp. 59–70, 2018.
 [Online]. Available: http://sutod.selcuk.edu.tr/sutod/article/view/438.
- [5] H. Yıldızoğlu, Ö. Can, and B. Tayfur, "Determination of Earthquake Performance in Masonry Buildings (Case Study of Bayburt Korkut Ata High School)," Gümüşhane University Journal of Science, vol. 8, no. 2, pp. 372–380, 2018. doi:10.17714/GUMUSFENBIL.380259.
- [6] F. Bahadır and F. S. Balık, "Shake Table Tests of Prototype Masonry Buildings Constructed with

Different Wall Bond Patterns," Konya Journal of Engineering Sciences, vol. 9, no. 2, pp. 343–358, 2021. doi:10.36306/KONJES.837692.

- [7] H. García, J. Jiménez-Pacheco, and J. Ulloa, "Effective Properties of Masonry Structures and Macro-Model Analysis with Experimental Verification," Results in Engineering, vol. 23, 102546, 2024. doi:10.1016/J.RINENG.2024.102546.
- [8] R. Kanit, M. Erdal, and O. Can, "Assessing the Experimental Behaviour of Load-Bearing Masonry Walls Subjected to Out-of-Plane Loading," Scientific Research and Essays, vol. 5, no. 21, pp. 3336–3344, 2010.
- [9] F. Kıpçak and B. Erdil, "Effect of Side Wall and Side Wall Opening on the Out-of-Plane Behavior of Masonry Structures," Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences, vol. 12, no. 3, pp. 853–860, 2023. doi:10.28948/ngumuh.1268912.

- [10] Turkish Standards Institution, TS EN 772-1 and TS EN 1015-11, Standards Publication.
- [11] Ministry of Interior Disaster and Emergency Management Authority (AFAD), Turkish Building Earthquake Code (TBDY), Ankara, Turkey, 2018.
- [12] A. S. Arya, T. Boen, and Y. Ishiyama, Guidelines for Earthquake Resistant Non-Engineered Construction, UNESCO, 2014. [Online]. Available: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000229059 [Accessed: Apr. 8, 2025].
- [13] F. L. Moon, Seismic Strengthening of Low-Rise Unreinforced Masonry Structures with Flexible Diaphragms, PhD thesis, Georgia Institute of Technology, Dec. 11, 2003. [Online]. Available: http://hdl.handle.net/1853/5128 [Accessed: Apr. 8, 2025].



NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 732-737



Niğde Ömer Halisdemir Üni**ver**sitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araștırma makalesi / Research article

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



Vinç temel altı grup kazıkların taşıma gücü ve oturmasının değerlendirilmesi: Vaka analizi

Evaluation of the bearing capacity and settlement of the pile groups for the crane foundation: Case study

Esra Tatlıoğlu^{1,*} (1), Firdevs Uysal²(1)

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

Öz

Bu çalışmada, sanayi tipi gezer bir vinç temeli altına yapılması planlanan grup kazıkların taşıma gücü ve oturması değerlendirilmiştir. Vincin ayakları birbirine paralel 150m uzunluğunda iki şerit temel üzerinde hareket edebilecektir. Kontrolsüz dolgu üzerine yapılacak bu şerit temelin altına taşıma gücünü desteklemek ve oturmaları azaltmak için kazık yapılması düşünülmüştür. Çalışma arazisinde 8 adet 16m'lik sondaj yapılmıştır. Yerinde yapılan çalışmalar sonucunda, 10.5 metreyi aşan kontrolsüz dolgunun altında katı-sert orta plastisiteli kil, son olarak da sert kava özelliği gösteren kil-kil tası yer almaktadır. Bu çalışmada, yükün kazıklar aracılığıyla kontrolsüz dolgunun altındaki sağlam birimlere aktarılması için 65 cm çapında ve 16.0m boyunda fore kazıklar tasarlanmıştır. Tasarlanan kazık uygulamasının öncesi ve sonrasında yapılan değerlendirmeler ile grup kazık uygulamasının taşıma gücü ve oturmaların azaltılmasında etkili olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Vinç temeli, Taşıma gücü, Oturma, Grup kazık, Kontrolsüz dolgu

1 Giriş

Vinçler, yük kaldırma ve yük taşıma gibi işlerde kullanılan makinalar olup, özellikle sanayide önemli bir rol oynamaktadır. Bu makinaların ağır yükler taşıması ve kendinin de ağır olması zayıf zemin koşulları ile birleştiğinde can ve mal kayıplarına neden olabilmektedir [1]. Bu nedenle zayıf zeminlerde ağır makinaların kullanımı dikkat edilmesi gereken konulardandır.

Fore kazıklar, derin temellerin bir türü olarak, ağır yüklü yapıların desteklenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [2]. Bu kazıklar, imalatının nispeten kolay olması ve değişken zemin koşullarına uygun olarak boyutlandırılabilmesi öne çıkan özelliklerindendir [3]. Bu özellikleri ile fore kazıklar, vinç temel altına kullanılan yaygın uygulamalardandır. Literatür araştırmaları incelendiğinde, bu alanda deneysel çalışmaların yanı sıra sayısal analizlerin de yapıldığı görülmektedir. Itoh vd. [4], yumuşak bir zeminde kazık ile desteklenen vinçlerin stabilitesini ve sismik performansını değerlendirmek

Abstract

In this study, the bearing capacity and settlement of the group piles planned to be constructed under an industrialtype overhead crane foundation have been evaluated. The crane will be able to move on two strip foundations that are 150 meters long and parallel to each other. A pile installation has been considered beneath this strip foundation, which is to be constructed on uncontrolled fill, in order to enhance the bearing capacity and minimize settlement. Eight boreholes, each 16 meters deep, were drilled at the study site. As a result of the field investigations, beneath the uncontrolled fill exceeding 10.5 meters, there is a layer of stiff-moderately plastic clay, followed by a layer exhibiting properties of hard rock and claystone. In this study, bored piles with a diameter of 65 cm and a length of 16.0 m have been designed to transfer the load to the competent strata beneath the uncontrolled fill. Evaluations conducted before and after the implementation of the designed pile system indicate that the group pile application is effective in enhancing bearing capacity and reducing settlements.

Keywords: Crane foundation, Bearing capacity, Settlement, Pile group, Uncontrolled fill

amacıyla bir dizi santrifüj sarsma tablası deneyi yapmıştır. Çalışma ile vinç kolu ağırlığının kazıklarda hasarlara neden olabileceği tespit edilmiştir. Pula ve Rybak [5], büyük bir köprülü vinç temeli için planlanan kazık temel tasarımı ve inşaat süreçlerini ele almıştır. Tasarımda vincin taşıyabileceği yükler ve dinamik yükler hesaba katılarak temelin stabilitesini sağlamak için izlenen adımlar anlatılmıştır. Zhang vd. [6], sıvılaşabilir zemin koşullarında kazık destekli vinç iskelesinin dinamik yükler altındaki davranışını araştırmıştır. Laboratuvarda yapılan deneysel çalışmalarda sıvılaşma halinde yapının performansı değerlendirilirken sayısal çalışmalarda, bu tür zeminlerde meydana gelen etkileşimler ve yapı davranışı araştırılmıştır. Elde edilen bulgular, sıvılaşabilir zeminde inşa edilen kazıklı vinç-iskele yapılarının tasarımında dikkate alınması gereken kritik parametreleri ve güvenlik önlemlerini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, kontrolsüz bir dolgu üzerine inşa edilmesi planlanan birbirine paralel iki sürekli temel için tasarlanan

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: esratatlioglu@ohu.edu.tr (E. Tatlıoğlu) Geliş / Received: 30.12.2024 Kabul / Accepted: 21.03.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngmuh.1610249

grup kazıkların taşıma gücü ve oturması değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmeler düşey yük altındaki kazık performansının statik olarak değerlendirilmesini kapsamaktadır. Sürekli temeller, endüstriyel bir fabrikanın dışında yük taşımak amacıyla kullanılacak gezer vinçlerin hareket edeceği raylar için tasarlanmıştır. İki ayak üzerinde hareket edecek vinc, birbirine paralel raylar üzerinde belirlenen hat üzerinde yük taşıyabilecektir (Şekil 1). Yapılan zemin araştırmaları ile şerit temelin altında 10.5m'yi bulan kontrolsüz dolgu olduğu tespit edilmiştir. Kontrolsüz dolguların taşıma gücü ve oturmaya yönelik sorun teşkil edebilecek nitelikte olması nedeniyle, zemininin üzerine gelecek yükler için yeterliliği değerlendirilmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda vincin kendi ağırlığı ve taşıyacağı yükün kontrolsüz dolgu altındaki sağlam birimlere aktarılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmalar aşağıda kısaca verilmiştir.

- İnceleme alanı için yapılan zemin araştırmaları (sondaj, arazi ve laboratuvar deneyleri vb.,) sonucunda zemin özellikleri belirlenerek idealize zemin profili oluşturulmuştur.
- Zemine aktarılacak yükler tespit edilmiştir.
- Mevcut zemin koşullarında sürekli temeller için taşıma gücü ve oturma analizleri yapılmıştır.
- Zeminin sıvılaşabilirliği değerlendirilmiştir.
- Kazık uygulaması ile kazık grubunun düşey yük taşıma kapasitesi değerlendirilmiş ve grup kazıkların oturma (ani ve konsolidasyon) analizi yapılmıştır.



Şekil 1. Vincin hareket edeceği hat

2 Yapı ve zemin özellikleri

2.1 Yapı özellikleri

Endüstriyel fabrikalar, sanayi atölyeleri ve barajlarda yük taşıma amacıyla hareketli vinçler kullanılmaktadır. Farklı taşıma yüksekliği ve yük taşıma kapasitesine sahip vinçler kimi zaman yapının içine kimi zamanda dışına inşa edilmektedir. Gezer vinçler, taşıyıcı kiriş veya zemin üzerine sabitlenmiş birbirine paralel raylar üzerinde hareket edebilmektedir. Bu çalışmada bahsi geçen gezer vinç, endüstriyel bir fabrikanın dışında yük taşımak amacıyla kullanılacaktır. Şekil 2'de benzer bir vinç görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2. Benzer vinç görüntüsü [7]

Vinç, fabrika yakınına inşa edilecek 150m uzunluğunda bir ray üzerinde hareket edecektir. Rayların altına da 150m uzunluğunda birbirine paralel iki şerit temel tasarlanmıştır (Şekil 3). Şerit temellerin, uzunluğu 50'şer metre olacak şekilde derzler ile ayrılarak 3 kısım halinde yapılması planlanmaktadır. Vincin iki ayağının altında yer alacak sürekli temeller 2.5m genişliğinde ve 150m uzunluğundadır. Bu paralel şerit temeller 36.15m uzunluğunda bağ kirişler ile 7 ve 9 metre aralıklarla birbirine bağlanmıştır. Gezer vincin taşıyacağı ağırlık 5 ton ve vincin kendi ağırlığı da 40 tondur.



Şekil 3. Gezer vinç için yapılan şerit temel

2.2 Zemin özellikleri

Vinç temelinin yapılması planlanan alanda 8 adet 16m'lik sondaj yapılmıştır. Laboratuvar çalışmaları için araziden örselenmiş ve örselenmemiş numuneler alınmıştır. Deneyler ile tespit edilen mühendislik parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Ayrıca arazide Standart Penetrasyon Deneyleri (SPT) gerçekleştirilmiştir.

Yapılan zemin araştırmaları ile bölgede yaklaşık 0.60m organik zemin, organik zemin altında 10.5metreyi bulan kontrolsüz dolgu bulunmaktadır.

	Tablo	1. Zeminler	in mühendislik	parametreleri
--	-------	-------------	----------------	---------------

Sondaj No/Derinlik (m)	Zemin Sınıfı	c _u (kPa)	φ
SK1-UD1/0.50-1.00	CL	58.18	-
SK2-UD1/1.00-1.50	CH	58.18	7.5
SK3-UD4/13.50-14.00	CH	87.27	

Dolgu altında sondaj noktalarının bazı yerlerinde 15metreyi bulan krem-kahve renkli CaCO₃ içerikli çok katısert orta plastisiteli kil, son olarak da sert kaya özelliği gösteren kil-kil taşı yer almaktadır. Zemin araştırmalarında yeraltı suyuna rastlanmamıştır. SPT (N) değerlerinin derinlikle değişimi, laboratuvarda belirlenen zeminin mekanik özellikleri ve zemin sınıflama sonuçları kullanılarak idealize zemin profili oluşturulmuştur (Şekil 4).



Şekil 4. İdealize zemin profili

3 Taşıma gücü ve oturma analizleri

Bu çalışmada, vinç yükünün çoğunun kontrolsüz dolgu ile karşılanacak olması, bu dolgunun kimi yerlerde 10.5 metreye kadar yer alması durumları göz önüne alındığında, zeminde meydana gelebilecek taşıma gücü ve olası oturma problemlerinin değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Bu kapsamda, uygulama öncesi ve sonrası için taşıma gücü ve oturma analizleri yapılarak fore kazık uygulamasının sağlayacağı katkılar değerlendirilmiştir. Yapılan analizlerde temelin taşıma gücü sorunu olmadığı ancak oturmaların izin verilen değerleri aştığı tespit edilmiştir. Tüm bu faktörler göz önüne alındığında, temel zeminin taşıma gücüne katkı sağlamak ve oturmaları azaltmak için temel altına fore kazık yapılmasının uygun olacağı düşünülmüştür.

3.1 Uygulama öncesi yapılan analizler

Vinç ayaklarının altına yapılması planlanan 2.5m genişlik ve 150 uzunluğundaki sürekli temelin, derzlerle ayrılarak 2.5m genişlik ve 50m uzunlukta olacak şekilde üç kısım halinde inşa edilmesi tasarlanmıştır. Fore kazık öncesi çalışma arazisinin taşıma gücü tahkiki TBDY 2018 [8] esas alınarak Denklem (1) yardımı ile yapılmıştır (Şekil 5). Vinç ağırlığı, vinç yükü ve temel ağırlığının da etkisi ile temel altında meydana gelecek maksimum temel taban basıncı (G+Q+E) 19.10 t/m²'dir.

$$q_k = cN_c s_c d_c i_c g_c b_c + qN_q s_q d_q i_q g_q b_q + 0.5\gamma B' N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma$$
(1)

TBDY (2018) [8]'e göre yapılan taşıma gücü analizinde Karakteristik Dayanım (q_k) 59.69 t/m², Tasarım Dayanımı (q_t) ise 42.64 t/m² elde edilmiştir. Bu durumda çalışma alanında taşıma gücü probleminin olmadığı görülmektedir.

B (m)	2,50	Temel Genişliği	
L (m)	50,00	Temel Uzunluğu	
Df (m)	1,00	Gömülme Derinliği	
γ_1 (ton/m ³)	1,90	Zeminin Birim Hacim Ağırlığı	
γ_2 (ton/m ³)	1,90	Zeminin Birim Hacim Ağırlığı	
¢ (derece)	7,5	Zeminin İçsel Sürtünme Açısı	
c (ton/m²)	7,39	Zeminin Kohezyonu	
α	0,00	Yük Temele Herhangi Bir Eğim ile Etkiyorsa Girilecek. Yük Düşey ise Sıfır (0) alınaca	
β	0,00	Temel Tabanı Eğimli ise Girilecek. Temel Tabanı Düz ise Sıfır(0) alınacak	
YRV	1,40	Temelin yatayla yaptığı açı	

Şekil 5. TBDY (2018) [8]'e göre taşıma gücü hesabı

Fore kazık uygulama öncesinde yapılan bir diğer değerlendirme de kontrolsüz dolgu altında meydana gelecek ani oturma ve zamana bağlı oturmalardır. Oturma analizinde laboratuvar deneylerinden elde edilen zemin parametreleri kullanılmıştır. Aşağıda analizlerde kullanılan zemin ve yapı özellikleri verilmiştir.

 $\begin{array}{l} q=15.3 \ t/m^2 \ (G+Q) \\ B=2.5 \ m \ (Temel \ genişliği) \\ L=50 \ m \ (Temel \ uzunluğu) \\ \gamma=19.0 \ kN/m^3 \ (Zeminin \ tabi \ birim \ hacim \ ağırlığı) \\ m_v = 0.0144 \ cm^2/kg \ (Hacimsel \ sıkışma \ katsayısı) \\ \Delta_p = 0.38 \ kg/cm^2 \ (Tabaka \ ortasındaki \ gerilme \ artışı) \\ D_f=100 \ cm \ (Temel \ gömülme \ derinliği) \\ H = 1250 \ cm \ (Tabaka \ kalınlığı) \\ E_u=65c_u=378.1 \ t/m^2 \ (Zeminin \ drenajsız \ elastik \ modülü) \\ I_1 = 0.95 \ (D_f/B'ye \ bağlı \ şekil \ katsayısı) \\ I_2 = 1.1 \ (L/B \ ve \ H/B'ye \ bağlı \ şekil \ katsayısı) \\ \end{array}$

$$s_i = \frac{qB}{E_u} I_1 I_2 = \frac{15.3x^{2.5}}{378.1} 0.95 x_{1.1} = 11 cm$$
(2)

Denklem (2)'de ani oturma miktarı 11 cm olarak hesaplanmıştır. Temel altında bulunan kil birimde zamana bağlı gerçekleşecek oturma ise Denklem (3) ile 6.84 cm olarak hesaplanmıştır.

$$\Delta H = m_{\nu} \Delta p H = 0.0144 \times 0.38 \times 1250 = 6.84 cm \tag{3}$$

Fore kazık uygulama öncesinde temel altındaki 12.5 m kalınlığa sahip kil tabakasında meydana gelen toplam oturma (Δ H) miktarı Denklem (2-3)' de 17.84 cm olarak hesaplanmıştır. Uzuner [9]'a göre çalışma alanında yapılması planlanan şerit temelde oturma problemi olduğu görülmektedir (Tablo 2).

 Tablo 2. Müsaade edilebilir toplam oturma değerleri [9]

	Zemin Cinsi	Tekil-şerit temeller	Radye temeller	
Dönme	Hepsi	1/300	1/300	
Max, farklı	Kil	4 cm	4 cm	
oturma	Kum	2.5 cm	2.5 cm	
Max, mutlak	Kil	6.5 cm	6.5-10 cm	
oturma	Kum	4 cm	4-6.5 cm	

3.2 Uygulama sonrası yapılan analizler

Bu bölümde, fore kazık uygulama sonrasında yapılan taşıma gücü ve oturma analizleri verilmiştir. Bu analizler,

 Tablo 1 ve Şekil 4'te verilen zemin profili ve zemin parametreleri dikkate alınarak yapılmıştır.

Kazıkların tayininde, düşey deplasmanların sınırlı tutulabilmesi için, kazıkların çevresinde mobilize olacak sürtünmenin dikkate alınması gerekir. Bu çalışmada kazıklar hem uç hem de çevre sürtünme direnci dikkate alınarak tasarlanmıştır. Kazık yüzeyi boyunca üç farklı tabakada (Tablo 3) ve kazık ucunda (Denklem 5) dayanım hesaplanmıştır. Temel zemin özellikleri ve vinçten aktarılan yük dikkate alındığında Ø65 cm çapında ve 16.0m boyunda fore kazık uygulanması tasarlanmıştır. Bu şekilde, hem dolgudan gelen sürtünmeden faydalanılacak hem de yüklerin kontrolsüz dolgu altındaki sağlam tabakaya aktarılması sağlanacaktır.

Kazıklar, şerit temel boyunca iki sıra halinde yerleştirilecektir. Üçgen dizilim ile yerleştirilecek donatılı kazıkların merkezleri arası mesafe 2m [10,11] olacaktır (Şekil 6). Kazık ve temel arasındaki yük aktarımı bir yastık görevi yapan 0.5m kalınlığında dolgu tabakası ile sağlanacaktır (Şekil 6). Kazıkların uç direncinin yanı sıra soket sürtünmesinden de yararlanılmak isteniyorsa, soket uzunluğunun dört kazık çapından daha az olması gerekmektedir [12]. Bu nedenle kazıkların 2.5m kil taşına soketlenmesi sağlanmıştır.





Kazığın karakteristik çevre sürtünme direnci;

$$Q_{ks} = \pi D L_s f_s \tag{4}$$

Burada;

- D = Kazık çapı
- $L_s = Kazık$ sürtünme boyu
- $f_s = Birim$ çevre sürtünmesi

Tablo 3. Kazık boyunca hesaplanan sürtünme dirençleri

Q_{ks}	$\pi DL_s f_s$	Sonuç kN
Q_{ks1}	3.14*0.65*10*36.07	736.19
Q_{ks2}	3.14*0.65*3.5*36.07	257.67
Q_{ks3}	3.14*0.65*2.5*47.13	240.48

Kazığın karakteristik uç direnci;

$$Q_{ku} = 9c_u A_p = 9x87.27x0.33 = 260 \ kN \tag{5}$$

Tek fore kazık taşıma kapasitesi;

$$Q_{tv} = \frac{Q_{ku}}{\gamma_{Ru}} + \frac{Q_{ks}}{\gamma_{Rs}} \tag{6}$$

Kazığın düşey tasarım dayanımı, TBDY 2018 [8] esas alınarak Tablo 3 ve Denklem (5) kullanılarak Denklem (6) yardımı ile $Q_{tv}=95$ ton olarak hesaplanmıştır. Q_{tv} hesabındaki dayanım katsayısı değerleri uç direnç için 2, çevre sürtünmesi direnci için 1.5 olarak TBDY 2018 [8]' den alınmıştır. Tekil kazık için yapılan bu hesapta temel altı kazıklar için grup etkisi uygulanmıştır. Kazık grup etki katsayısı 3D için 0.67 olarak alınmıştır (Tablo 4). Grup kazıkların (50 adet) toplam taşıma kapasitesi Denklem (7) kullanılarak 3183 ton olarak hesaplanmıştır. 2.5m genişliğinde 50 m uzunluğunda derz ile ayrılmış temele gelen toplam yük 2387.5 ton olduğu için grup kazıkların toplam taşıma kapasitesinin yeterli olduğu görülmektedir.

$$\sum Q_a = \eta Q_{tv} N \tag{7}$$

Denklemde;

Qa = Grup kazıkların düşey tasarım dayanımı

- η = Grup etki faktörü
- $\dot{Q}_{ty} = Tek$ bir kazığın düşey tasarım dayanımı

N = Toplam kazık sayısı

Tablo 4. Killi zeminler için grup etki faktörü (η) [13]

Kazıklar arası mesafe (merkezden merkeze)	Grup etkisi
3D	0.67
4D	0.78
5D	0.89
6D ve daha fazlası	1.00

Fore kazık uygulama sonrası, zemin ve kazığın taşıma gücüne katkısı ile yeni taşıma gücü Denklem (8) ile hesaplanmıştır. Fore kazık imalatı sonrası yeni taşıma gücü değeri 57 t/m² olarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_{emslah} = [(\sigma_{em} x A_{net}) + Q_{emkazık}]/A$$
(8)
$$\sigma_{emslah} = Kazık sonrası emniyet gerilmesi
$$\sigma_{em} = Kazık öncesi zemin emniyet gerilmesi$$$$

Qemkazık=Emniyetli kazık yükü

$$\sigma_{\text{emslah}} = [(42.64 \times 1.57) + (63.65/2)]/1.73 = 57 \text{ t/m}^2$$
(9)

Fore kazık imalatı sonrası ani oturma değeri Tomlinson ve Boorman [14]' ün önerdiği Denklem (10) ile 0.003 cm olarak hesaplanmıştır.

$$\rho = \frac{(W_s + 2W_b)L}{2A_s E_p} + \frac{\pi W_b}{4A_b} * \frac{B(1 - \nu^2)I_p}{E_b}$$
(10)

$$\begin{split} &W_s = 1234 \text{ kN (Kazık gövdesindeki yük)} \\ &W_b = 260 \text{ kN (Kazık ucundaki yük)} \\ &L = 16m (Sürtünme yüzey uzunluğu) \\ &A_s = 32.65 \text{ m}^2 (Kazık gövde kesit alanı) \\ &A_b = 0.33 \text{ m}^2 (Kazık uç kesit alanı) \\ &E_p = 25e6 \text{ kN/m}^2 (Kazığın elastik modülü) \\ &B = 0.65 \text{ m (Kazık çapı)} \\ &v = 0.35 (Zeminin poisson oranı) \\ &I_p = 0.7 (L/B oranına bağlı tesir faktörü) \\ &E_b = 15e6 \text{ kN/m}^2 (Kazık ucu altındaki zeminin elastik modülü) \end{split}$$

Fore kazık uygulama sonrası için zamana bağlı oturma analizi ise Denklem (11) yardımı ile yapılmıştır.

$$P_{oed} = m_d m_v \Delta \sigma H \tag{11}$$

Denklem (12) ile laboratuvar deneyleri sonucu belirlenen zemin konsolidasyonunun, arazi konsolidasyonuna dönüştürülmesi için gerekli düzeltme yapılmaktadır [12].

$$P_c = m_g P_{oed} \tag{12}$$

Burada;

m_g = 0.7 (Jeolojik faktör) (Tablo 5)

 $m_d = 1$ (Derinlik faktörü) (Şekil 7)

 $m_v = 0.08 \text{ m}^2/\text{MN}$ (İyileştirme sonrası hacimsel sıkışma katsayısı)

 $\Delta \sigma = 99.6 \text{ kN/m}^2$ (Tabaka ortasındaki gerilme artışı)

$$\Delta \sigma = \frac{Q}{(B+z)(L+z)} \tag{13}$$

Denklem (13) kullanılarak kazığın 2L/3 aşağısında yer alan 4.2 m'lik kil tabakası ortasında net gerilme artışı 99.6 kN/m^2 elde edilmiştir. Buradan konsolidasyon oturması (P_{oed}) 3.2 cm olarak hesaplanmıştır. Denklem (12) ile yapılan düzeltme sonrası arazide gerçekleşecek konsolidasyon oturması 2.3 cm bulunmuştur (Denklem (14)).

$$P_c = 0.7 \text{x} 3.2 = 2.3 \text{cm} \tag{14}$$

Tablo 5. Jeolojik faktör, μ_g [12]

Kil çeşitleri	μ_{g}
Çok hassas killer	1.0-1.2
Normal konsolide killer	0.7-1.0
Aşırı konsolide killer	0.5-0.7
Çok aşırı konsolide killer	0.2-0.5

Fore kazık uygulama sonrasında toplam oturma miktarı (Δ H) 2.303 cm olarak hesaplanmıştır. Uzuner [9]'a göre çalışma alanında hesaplanan toplam oturma, müsaade edilen sınırlar içinde kalmaktadır (Tablo 2). Elde edilen sonuçlara göre fore kazık uygulamasıyla toplam oturmalar yaklaşık %90 azaltılmıştır.



4 Sonuçlar

40 ton kendi ağırlığı olan ve 5 ton da yük taşıyacak gezer vinç için tasarlanan şerit temelin altına yapılması planlanan kazıkların taşıma gücü ve oturması kazık öncesi ve sonrası durum için değerlendirilmiştir. Fore kazık uygulama öncesi yapılan taşıma gücü ve oturma tahkikleri ile temelin taşıma gücü açısından sorun teşkil etmediği ancak oturmaların izin verilebilir sınırları aştığı görülmüştür. Şerit temelin oturma sorununu çözmek ve taşıma gücünü desteklemek için temel vükünün daha derin tabakalardaki sağlam birimlere aktarılması istenmektedir. Bu amaçla tasarlanan düşey yüklü değerlendirilmiştir. kazıklar statik olarak Yapılan değerlendirmeler ile elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Çalışma arazisinde yapılan zemin araştırmaları sonucunda idealize zemin profili oluşturulmuştur.
- Uygulama öncesi için TBDY (2018)'e göre yapılan taşıma gücü analizinde q_k=59.69 t/m², q_t= 42.64 t/m² elde edilmiş ve çalışma arazisinde taşıma gücü probleminin olmadığı görülmüştür.
- Uygulama öncesi için toplam oturma 17.84 cm olarak hesaplanmış ve çalışma alanında oturma problemi olduğu tespit edilmiştir.

- 0.65m çap ve 16m boya sahip kazıklar hem uç hem de sürtünme kazığı olarak tasarlanmıştır. Kazıklar, üçgen dizilim ile merkezler arası mesafesi 2m olacak şekilde yerleştirilmiş ve kazıkların kil taşına 2.5m soketlenmesi sağlanmıştır.
- Fore kazıklar donatılı olarak tasarlanmış olup, kazık ve temel arasındaki yük aktarımı bir yastık görevi yapan 0.5m kalınlığında dolgu tabakası ile sağlanacaktır.
- Üst yapıdan gelen gerilmelerin güvenli bir şekilde karşılanması esasına dayanarak yapılan tasarım ile tek bir kazığın taşıma kapasitesi 95 ton olarak hesaplanmıştır. Grup etkisinin de dikkate alınması ile 50m'lik temel için projelendirilen 50 adet kazığın taşıma kapasitesi 3183 ton olarak belirlenmiştir.
- Kazık uygulama sonrası yapılan oturma hesapları ile toplam oturma 2.303 cm olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre fore kazık uygulamasıyla toplam oturmalar yaklaşık %90 azaltılmıştır.

Teşekkür

Bu çalışmadaki zemin verileri ZEMKA Yapı Malzemeleri Zemin Araş. Laboratuar Proje Danş. Müş. Müh. İnş. Taah. Tic. Ltd. Şti. tarafından hazırlanan zemin ve temel etüdü inceleme veri raporundan alınmıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %12

Kaynaklar

- E. L. K. Lundblad, Crane foundations on soft soil: Master's Thesis, Chalmers University of Technology, Sweden, 2017.
- P. E. Ming-Fang Chang and H. Zhu, Construction effect on load transfer along bored piles. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130 (4), 426-437, 2004. https://doi.org/ 10.1061/(ASCE) 1090-0241(2004)1 30:4(426).

- [3] A. K. M. Zein, and E. M. Ayoub, Evaluation of measured and interpreted failure loads of bored piles in alluvial soil deposits. Int. J. of GEOMATE, 10 (19), 1636-1643, 2016.
- [4] K. Itoh, N. Suemasa, S. Tamate, Y. Toyosawa, N. Horii, T. Katada, S. Hirano F. Arai, Dynamic loading test for pile supported tower crane in soft clay. In 13th World Conference on Earthquake Engineering, 820, Vancover, Canada, 2004.
- [5] W. Pula, and J. Rybak, Case history: Pile foundations of a large gantry crane. In Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering, Springer, 185-199, 2007.
- [6] Y. Zhang, S. Tian, L. Tang, X. Ling, Experimental and numerical investigation on the response characteristic of the crane-wharf structure in liquefiable site. Ocean Engineering, 299, 117312, 2024. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117312.
- [7] Örnek vinç görüntüsü. https://www.ellsengantrycranes.com/ outdoor-gantrycrane/, Accessed 08 November 2024.
- [8] TBDY 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, 2018.
- [9] B. A. Uzuner, Temel Mühendisliğine Giriş. Derya Kitabevi, Trabzon, 2019.
- [10] FHWA HI-96-033, Design and Construction of Driven Pile Foundations, P.J. Hannigan, G.G. Gobel, G. Thedean, G.E. Likins and F. Rausche for FHWA, December, 1,1996.
- [11] J.E. Bowles, Foundation Analysis and Design, 5th Edition, McGraw Hill, New York, 1175,1996.
- [12] M. Tomlinson and J. Woodward, Pile design and construction practice, CRC press, 2007.
- [13] S. Prakash, H. D. Sharma, Pile foundations in engineering practice, John Wiley & Sons, 1991.
- [14] M. J. Tomlinson and R. Boorman, Foundation design and construction, Pearson education, 2001.





Niğde Ömer Halisdemir Üniversity Journal of Engineering Sciences

Araștırma makalesi / Research article

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



Niğde (Orta Anadolu, Türkiye) Merkezi yeraltısuyunun kalite değerlendirmesi

Quality assessment of groundwater in Central Nigde (Central Anatolia, Türkiye)

Uğur Erdem Dokuz^{1,*} (¹), Selma Yaşar Korkanç² (¹), Mustafa Korkanç³ (¹), Hilal Dokuz⁴ (¹)

^{1.3} Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye
² Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye
⁴ Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 40100, Kırşehir Türkiye

Öz

Bu çalışmanın amacı, Niğde kent merkezinin üzerinde yer aldığı alüvyon akiferin yeraltısuyu kalitesinin ve kullanım olanaklarının belirlenmesidir. Yapılan çalışmada, yeraltısuları ulusal ve uluslararası standartlar yardımıyla içme ve kullanma suyu; Elektriksel İletkenlik (EC), Toplam Sertlik (TH); Sodyum Adsorbsiyon Oranı (SAR); Sodyum Yüzdesi (%Na); Magnezyum Oranı (MR); Kalıntı Sodyum Karbonat (RSC); Kelly İndisi (KI), Permeabilite İndisi (PI) yardımıyla tarımsal sulama suyu; Langier Doygunluk İndisi (LI), Larson-Skold İndisi (LS), Ryznar Stabilite İndisi (RSI), Puckorius Kabuklaşma İndisi (PSI), Agresiflik İndisi (AI), Klorür Sülfat Kütle Oranı (CSMR) ve mineral doygunluk indisleri yardımıyla da endüstriyel amaçlı kullanma suyu bakımından değerlendirilmiştir. Çalışma alanındaki suların genel olarak sulamaya uygun kalitede sular olduğu, içme-kullanma suyu olarak ise alüvyonun orta kısmında tarımsal kirlilik, mansap kısmına doğru jeotermal sularla karışım sonucu kirlilik saptanmıştır. Akiferin beslenme bölgesinde veraltısuyunda düşük iyon içeriğine rağmen, jeotermal akışkan karışımın etkin olduğu bölgede düşük pH ve yüksek iyon yükü nedeniyle yeraltısularının endüstriyel kullanıma uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Niğde, Alüvyon akifer, Hidrokimya, Su kalitesi, Jeotermal etki

1 Giriş

Canlı yaşamının en önemli yapıtaşlarından biri olan su, insanlık tarihinin her döneminde hayati öneme sahip olmakla birlikte tarihin akışı içerisinde önemi hızla artmıştır. Sanayi Devrimi'nden başlayan süreçte ise gerek endüstriyel amaçlı su kullanımı gerekse artan nüfus ve nüfusun belli bölgelerde yoğunlaşması nedeniyle su kaynaklarına duyulan gereksinimdeki artış daha da hızlanmıştır. Gerek dış etkenlere karşı yüzey sularına nazaran nispeten daha korunaklı olması, gerek mevsimsel etkilerin daha geç ve nispeten az hissedilmesi gerekse de kullanımda sağladığı kolaylıklar nedeniyle insani faaliyetlerde yeraltısuları daha fazla tercih edilmektedir. Dünya nüfusunun üçte ikisi içme ve kullanma suyu ihtiyacını yeraltı sularından sağlamakta [1-

Abstract

This study aims to assess the groundwater quality and usability of the alluvial aquifer where the city center of Niğde is located. Groundwaters were evaluated based on their hydrochemical properties using national and international standards. The water quality was assessed for drinking and domestic use; agricultural irrigation suitability was determined based on Electrical Conductivity (EC), Total Hardness (TH), Sodium Adsorption Ratio (SAR), Sodium Percentage (%Na), Magnesium Ratio (MR), Residual Sodium Carbonate (RSC), Kelly Index (KI), and Permeability Index (PI); while industrial usability was evaluated using the Langelier Saturation Index (LI), Larson-Skold Index (LS), Ryznar Stability Index (RSI), Puckorius Scaling Index (PSI), Aggressiveness Index (AI), Chloride-Sulfate Mass Ratio (CSMR), and mineral saturation indices. The results indicate that the groundwater in the study area is generally suitable for irrigation. However, in terms of drinking and domestic use, contamination was detected due to agricultural activities in the central part of the alluvial aquifer and mixing with geothermal waters in the downstream sections. Despite the low ion content in the groundwater in the recharge zone of the aquifer, it was concluded that the groundwater is not suitable for industrial use due to the low pH and high ion load in the region where the geothermal fluid mixture is active.

Keywords: Niğde, Alluvium aquifer, Hydrochemistry, Water quality, Geothermal effect

3]; dünya genelinde yapılan sulamanın da %43'ü yeraltısularından karşılanmaktadır [4]. Nitekim buzullar hariç gezegenimizdeki kullanılabilir tatlısu rezervinin %97'sini de yeraltısuları oluşturmaktadır [3]. Artan yoğun yeraltısuyu kullanımının yanı sıra küresel iklim değişikliklerinin olumsuz etkileri yeraltısuları üzerindeki baskıyı arttırmaktadır. Bu durum özellikle kurak-yarı kurak iklime sahip bölgelerde doğal ekosistemleri, sürdürülebilir kalkınmayı ve dolayısıyla toplumsal refahı ve toplum sağlığını tehdit etmektedir. Nitekim dünya üzerinde işletilen yeraltısularının %65'i içme, %20'si hayvancılık ve tarımsal sulama, %15'i ise endüstriyel su ihtiyacını karşılamak üzere kullanılmaktadır [5]. Su kaynakları üzerindeki olumsuz etkilerin en önemli sonucu kullanılabilir su miktarında

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: udokuz@ohu.edu.tr (U. E. Dokuz) Geliş / Received: 03.03.2025 Kabul / Accepted: 25.03.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngumuh.1650043

azalma olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durum su kaynaklarının miktar bakımından azalmasının yanı sıra doğal ve antropojenik faaliyetler sonucu su kalitesinin kötüleşmesinin de bir sonucudur. Nitekim su kaynaklarından etkin şekilde faydalanılabilmesi için suların hangi amaçla kullanılacağına bağlı olarak belirli kalite parametrelerini sağlaması gerekmektedir [1]. Kalite bakımından yeterli sevivede olmavan sular cevre ve halk sağlığı sorunlarının yanı sıra tarımsal arazilerin zarar görmesine, ürün kalitesinin bozulmasına, endüstriyel kullanımda ise maliyet kayıplarına sebep olmaktadır. Günümüzde hastalıkların yaklaşık %80'i; gelişmekte olan ülkelerde gerçekleşen ölümlerin yaklaşık üçte biri temiz suya ulaşımda yaşanan zorluklardan kaynaklanmaktadır [6]. Bu nedenle su kalitesinin korunmasının yanı sıra kalite parametrelerinin saptanarak, kullanım amacına göre değerlendirilmesi doğal ekosistemin, toplum sağlığı ve refahının korunması ve bölgesel sürdürülebilir kalkınmanın sağlanması için de önem arz etmektedir. Su kimyası, suyun kökeni, kimyasal fasiyesi, beslenme-boşalım süreçlerinde maruz kaldıkları etkiler, sukayaç etkileşimi gibi bilgilerin yanı sıra suyun kullanım olanakları hakkında da önemli bilgiler sağlamaktadır [7-9]. Bu nedenle birçok çalışma, farklı kullanım amaçları için yeraltısuyu kalitesini belirlemeye odaklanmıştır [1, 5, 10-16]. Çalışmaların bazıları su kalitesini genel hidrokimyasal özellikleri standartlar ışığında değerlendirerek özellikle içme suyu ve insan sağlığına etkilerine odaklanmışken [1, 11, 12, 14-16]; bir kısmı da suları indis hesaplamaları yardımıyla tarımsal ve endüstriyel amaçlı kullanıma uygunluk açısından değerlendirmiştir [1, 11, 13, 14, 17].

Çalışmanın gerçekleştirildiği, İç Anadolu Bölgesi'nde bulunan Niğde ili yarı kurak iklimi ve jeolojik koşuların da etkisiyle diğer Orta Anadolu illeri gibi su kaynakları bakımından nispeten fakir bir alanda bulunmakta olup kentin su ihtiyacının önemli bir bölümü yeraltısularından karşılanmaktadır. Özellikle son yıllarda yaşanan sosyoekonomik gelişmeler bölgede su kaynaklarının önemini ve su kaynakları üzerindeki baskıyı ciddi derecede arttırmıştır. Buna karşın Niğde kent merkezi dolayında hidrojeokimyasal özellikleri üzerine yapılmış çalışmalar sınırlıdır. Lermi ve Ertan [18], Niğde kent merkezi yakınında kırsal kesime ait kuyu ve kaynak sularının hidrojeokimyasal özelliklerini; Ciner vd. [19], ise Niğde kent merkezi yeraltısularını, iz elementler bakımından incelemişlerdir. Her iki çalışma da yeraltısularının genel hidrokimyasal özelliklerini incelemiş olup, As kirliliğinin kökenine ilişkin değerlendirmelerde bulunulmuştur. Dokuz vd. [20], Niğde kent merkezi dolayında veraltı ve yüzey sularının hidrokimyasal özelliklerini incelemiş ve bu özelliklerin ortaya çıkmasında etkin olan faktörleri değerlendirmişlerdir. Bu çalışmada ise veraltısuyu kalitesinin ve kullanım olanaklarının belirlenmesi amacıyla alüvyon akifere ait yeraltısuyu örneklerinin hidrokimyasal özelliklerinden faydalanarak sular, ulusal [21] ve uluslararası standartlar [6] yardımıyla içme ve kullanma suyu; Elektriksel İletkenlik (EC), Toplam Sertlik (TH); Sodyum Adsorbsiyon Oranı (SAR); Sodyum Yüzdesi (%Na); Magnezyum Oranı (MR); Kalıntı Sodyum Karbonat (RSC); Kelly İndisi (KI), Permeabilite İndisi (PI) yardımıyla tarımsal sulama suyu; Langier Doygunluk İndisi

(LI), Larson-Skold İndisi (LS), Ryznar Stabilite İndisi (RSI), Puckorius Kabuklaşma İndisi (PSI), Agresiflik İndisi (AI), Klorür Sülfat Kütle Oranı (CSMR) ve mineral doygunluk indisleri yardımıyla da endüstriyel amaçlı kullanma suyu bakımından değerlendirilmiştir.

2 Materyal ve metot

2.1 Çalışma alanı

Çalışma alanı İç Anadolu Bölgesi'nin güneydoğusunda bulunan Niğde ilinin kent merkezi ve yakın dolayını kapsamaktadır. 37 ° 55'-38 ° 03' kuzey enlemleri ve 34° 36'-34 ° 45' doğu boylamları arasında yer alan çalışma alanı, batıda Melendiz, doğuda ise Aladağlar'a ait yükseltiler arasında, kuzeyindeki Misli Ovası ile güneyindeki Bor Ovası'nı birbirine bağlayan dar bir geçit görünümündeki arazi üzerine yeralmaktadır. Kuzeyde Aktaş kasabası civarında doğan Karasu Deresi, kent merkezini kat ederek Akkaya Barajı'nı besler (Şekil 1). Bölgede tipik karasal iklim hakimdir. Uzun yıllar (1935-2024) meteoroloji verilerine göre ortalama sıcaklıklar en yüksek 22,5 (Ağustos) ile en düşük -0,2 °C (Ocak) arasında değişmektedir. 89 yıllık yağış ortalaması 342,8 mm'dir [22]. Yağışlar kışın kar, bahar aylarında yağmur olarak düşmektedir.

2.2 Örnekleme ve analiz yöntemleri

Calısma kapsamında Niğde kent merkezi ve dolayında yayılım gösteren alüvyon akifer ve yakın dolayını temsil etmesi amacıyla 25 noktadan yeraltısuyu örneklenmiştir. 2016-2020 yılları arasında yapılan arazi çalışmaları ile alanın hidrojeoloji haritası oluşturulmuş ve FEB2016/14-BAGEP nolu projeden elde edilen analiz sonuçları [20], yüzey suları çıkarılarak ve örnekler yeraltısuyu akım yönü boyunca yeniden numaralandırılarak kullanılmıştır. Numuneler katyon ve anyon analizleri (500'er ml) için polietilen numune kaplarında, 0,45µm filtrelerden süzülerek, ayrı ayrı örneklenmiştir. Katyon analizleri için kullanılacak olan numunelere pH'1 2'nin altında tutmak için HNO3 ilave edilmiştir. Ana katyon analizleri Ankara Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (YEBİM), Mikroanaliz-ICP Laboratuvarı'nda ICP-OES cihazında, anyon analizleri ise Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü Analitik Kimya Laboratuvarında, HCO3⁻ için titrimetrik yöntem, SO42-, Cl-, NO3-, PO43- için ise iyon kromatografi vöntemi kullanılarak yapılmıştır. Örnekleme sırasında suların fizikokimyasal özellikleri (T, EC, pH, DO) Hach Lange marka taşınabilir ölçüm cihazı ile kuyu başında ölçülmüştür. Elde edilen analiz ve ölçüm sonuçları grafiksel yöntemler ve indis hesaplamaları ile değerlendirilmiştir. Hidrojeokimyasal grafiklerin hazırlanmasında Aquachem paket programı kullanılmıştır. Suların iyon dengesi (EN) hesaplamaları yine aynı program yardımıyla gerçekleştirilmiş olup kirlilik etkisi ile kimi numunelerin EN değerlerinin nispeten arttığı görülmüş olup, bu artışlar kabul edilebilir sınırlar içerisinde değerlendirilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Jeolojik ve hidroejolojik özellikler

Çalışma alanı jeolojik bakımdan, kuzey-kuzeybatısında Kapadokya Volkanik Provensi, güney-güneydoğusunda ise

Toroslar'ın etkisi altındadır. Alanın kuzey-kuzeybatısında Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı andezit ve piroklastiklerden oluşan volkanitler, doğu-güneydoğusunda ise Paleozoyik-Mesozoyik yaşlı Aşıgediği Formasyonu'na ait mermerlerce temsil edilen temel birimler yüzeylenmektedir. Daha doğuda ise genel olarak kuvarsit, amfibolit ve şistlerden oluşan Kaleboynu Formasyonu yüzeylenmektedir (Sekil 1). Niğde kent merkezi ise genel olarak bu iki birimin ortasındaki çöküntüde depolanmış alüvyon örtü üzerine kurulmuştur. Alüvyon örtü, inceleme alanını yaklaşık KD-GB yönlü kat eden hattın güneyinde Aşıgediği Formasyonu'na ait mermerleri, kuzeyinde kalan bölgede ise Melendiz Dağı volkanitlerini uyumsuz olarak örtmektedir [23, 24]. Kilden çakıla kadar değişen boyutta tanelerin heterojen ve anizotrop şekilde depolanması ile oluşmuş olan alüvyon örtü yer yer tüf seviyeleri içermektedir. Alüvyon örtü, başlıca Aşıgediği ve Kaleboynu Formasyonları'na ait metamorfikler olmak üzere, daha ziyade batı kesimde ise Melendiz Dağı Volkanitleri'ne ait kayaç parçaları ve tanelerden oluşmaktadır. Bu nedenle alüvyon örtünün hidrojeolojik özellikleri de değişkendir. Yapılan incelemeler neticesinde alüvyon örtünün kil, silt boyu taneler içeren ve tüflü seviyelerinin geçirimsiz, kum, çakıl boyutu tanelerden

oluştuğu kesimlerinin ise geçirimli özellik taşıdığı görülmüştür. Geçirimsiz kil, silt boyu tanelerden ve yer yer tüflerden oluşan seviyeler arasında değişik derinlik ve seviyelerde depolanmış olan kum, çakıl boyutu gevşek sedimanlar serbest ve basınçlı akifer seviyelerini oluşturmaktadır. Niğde kent merkezi alüvyon akiferini çevreleyen volkanitlerin kırıklı çatlaklı kesimleri ile Aşıgediği ve Kaleboynu Formasyonları ile temsil edilen Niğde Masifi'nin (özellikle mermerlerin) kırıklı çatlaklı ve yer yer karstik kesimleri akifer özelliği taşımakta olup sırasıyla kuzey-kuzeybatıdan ve güneydoğudan alüvyon akiferi beslemektedir [20]. Yeraltısuyu derinlikleri 3-20 m, seviyeleri ise 1200-1260 m arasında değişmektedir. Genel yeraltısuyu akım yönü KD'dan GB'ya doğrudur [20] (Şekil 1).

3.2 Hidrojeokimyasal değerlendirmeler

Hidrolojik döngü sırasında yağışın yeryüzüne düşmesinden itibaren yaşanan hidrojeolojik süreçler sırasında su-kayaç etkileşimi, antropojenik faaliyetler, farklı su kütlelerinin karışımı ile yeraltısuyunun kimyasal özellikleri değişmektedir.



Şekil 1. Çalışma alanının hidrojeoloji haritası (Dokuz vd. [20]'den değiştirilerek)

Bu durum suların kalitesini de doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle yeraltısularının hidrokimyasal özelliklerinin saptanması ve bu özelliklerde meydana gelen değişimlerin anlaşılması yeraltısuyu kalitesini etkileyen faktörlerin belirlenmesine de yardımcı olmaktadır [25-30]. Çalışma kapsamında değerlendirilen yeraltısuyu örneklerine ait fizikokimvasal ölcüm ve hidrokimvasal analiz sonucları Tablo 1'de sunulmuştur. Buna göre suların pH değerleri 5,67-7,84; EC değerleri ise 384-1472 µS/cm gibi geniş bir aralıkta değişmektedir. Suların ana iyon derişimleri Piper [31] (Şekil 2) ve Schoeller [32] (Şekil 3) diyagramlarında değerlendirildiğinde suların katyonlar bakımından Ca²⁺, anyonlar bakımından ise HCO3-'ca zengin oldukları anlaşılmıştır. Suların Piper [31] diyagramında katyonlar bakımından kümelenme göstermelerine karşın Schoeller [32] diyagramında genel olarak akım yönü boyunca Na⁺ ve kısmen de Mg2+ zenginleşmeleri söz konusudur. Anyonlar bakımından ise 12 ve 13 nolu örneklerde görülen düşük SO42- ve Cl- içeriğinin yanı sıra SO42- bakımından belirgin zenginleşmeler söz konusudur. Böylece Ca-HCO3, Ca-HCO3-SO4, Ca-SO4-HCO3, Ca-Mg-HCO3, Ca-Mg-HCO3-SO₄, Ca-Mg-SO₄-HCO₃ ve Ca-HCO₃-Cl tipinde hidrokimyasal fasiyesler ortaya çıkmıştır. Mg²⁺ ve SO₄²⁻ zenginleşmeleri Niğde kent merkezinin güney kesiminde maksimuma ulasmaktadır. Bu alanın Derdalan Jeotermal Alanı'na yakınlığı söz konusu zenginleşmelerin ve dolayısıyla hidrokimyasal karakter değişiminin başlıca jeotermal karışım etkisi ile ortaya çıktığını göstermektedir [20] (Şekil 2). Na⁺ zenginleşmesi ise jeotermal alana yakın örneklerin yanı sıra alüvyonun orta kesiminde görülmektedir. Bu durum söz konusu zenginleşmelerin jeotermal akışkan etkisi ve/veya alüvyonda killi seviyelerin yoğunlaşmasından kaynaklı olabileceğini göstermektedir.



Şekil 2. Piper Diyagramı (Dokuz vd. [20]'den değiştirilerek)



Şekil 3. Schoeller Diyagramı (Semboller için Şekil 2'ye bakınız)

3.3 Su kalitesi değerlendirmeleri

Başta içme ve kullanma suları olmak üzere suların kimyasal özellikleri, kullanım amaçlarına bağlı olarak önem arz etmektedir. Bu nedenle içme ve kullanma suları için [6, 21] insan sağlığının korunması, sulama suları için [9, 32-36] sürdürülebilir tarımın sağlanması, verimin arttırılması, endüstriyel amaçlı kullanım suları için [37-42] ise işletme maliyetinin düşürülmesi amacıyla su kalite parametreleri tanımlanmış ve çeşitli indisler geliştirilmiştir.

3.3.1 İçme ve insani kullanım suları bakımından değerlendirme

İçme sularının insan sağlığına olası olumsuz etkilerinin değerlendirilebilmesi amacıyla çalışma kapsamında ölçülen hidrokimyasal parametreler, Türk Standartları Enstitüsü (TSE) [21] ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO) [6] standartları cerçevesinde değerlendirilmiştir (Tablo 1). Buna göre; pH değerleri bakımından her iki standart için de izin verilebilen alt sınır (6,5) 7 numune için aşılmıştır. TSE için 9,2 WHO için ise 8,5 olan üst sınır ise hiçbir numunede aşılmamaktadır. 3,87-1472 µS/cm arasında değişen EC değerleri TSE tarafından önerilen 2000 µS/cm üst sınır değerini sağlamakta iken 5 numune WHO tarafından önerilen 1000 µS/cm değerini aşmaktadır. EC değerleri 387-488 µS/cm arasında değişen 6 numune ise TSE tarafından tavsiye edilen 400 µS/cm değerine yakın EC değerlerine sahiptir. Sıcaklık için WHO tarafından herhangi bir limit belirtilmemişken 27,3 °C sıcaklığa sahip 16 nolu numune TSE tarafından önerilen 25 °C sınır koşulunu sağlamamaktadır. Söz konusu numune noktasının konumu yine Niğde kent merkezinin güney çıkışında bulunmakta iken, diğer numunelere nazaran Derdalan Jeotermal Alanı'na nispeten daha uzaktır. Bu durum olası jeotermal karışımın farklı alanlarda etkin olduğunu göstermektedir.

İyon konsantrasyonları bakımından incelendiğinde ise 18 ve 21 nolu numuneler Ca^{2+} ve Mg^{2+} bakımından TSE'ne göre sırasıyla 200 ve 50 mg/l olan üst sınır değerini sağlamamaktadır. WHO'ya göre 500 mg/l olan HCO₃⁻ ve SO₄²⁻ sınır değerleri sırasıyla 4 ve 1 numunede aşılmaktadır.

TSE tarafından HCO_3^- için herhangi bir sınır değer önerilmemişken SO_4^{2-} için 250 mg/l değeri önerilmiş olup 5 numunenin bu sınır değeri sağlamadığı görülmüştür. Önemli bir kirlilik parametresi olan NO_3^- için her iki standartta da 50 mg/l üst sınır değeri önerilmiş olup 12 ve 13 nolu numunelerde bu değerin çok üzerinde (sırasıyla 141 ve 125 mg/l) değerler elde edilmiştir. Bu durum, ana iyonlar ve nitrat kirliliğinin farklı alanlarda etkin olduğunu dolayısıyla farklı proseslerden kaynaklandığını göstermektedir. Buna göre; ana iyonlar bakımından meydana gelen kirliliğin Dokuz vd. [20], tarafından saptanan jeotermal karışımdan kaynaklandığı, NO₃⁻ kirliliğinin ise tarımsal arazi kullanımıyla ilişkili olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 1. Çalışma kapsamında örneklenen yeraltısularının fizikokimyasal ölçüm ve kimyasal analiz sonuçları (Ekim-2016; Dokuz vd. [20]'den değiştirilerek)

Örnek No	Koo	ordinat	pН	Ε	00	EC	Т	Ca ²⁺	Mg^{2+}	Na ⁺	\mathbf{K}^{+}	HCO ₃ -	SO4 ²⁻	Cl	PO4 ³⁻	NO ₃ -	EN (%)
Limit	Х	Y	(5.0.2	mg/l	%	μS/cm 2000	C 25	200	50	175		mg/l	250	600		50	
			6.5-9.2 6.5-8.5			400	12	100	30	20			25	25		25	
Tavsiye			6.5-8.5			1000				200		500	500	250	20	50	
1	653690	4212555	7.52	8.3	94.9	460	14.4	44.3	6.6	7.6	2.5	134	36.1	7.5	-	41.8	-0.6
2	652948	4212337	6.3	6.89	83	532	17.3	89.7	16.1	22.8	8.7	350	10.8	6.7	0.1	16.4	6.5
3	652230	4207594	7.84	7.64	106.7	394	19	57.6	12.9	18.7	3.8	222	15.5	10.1	-	22.5	6.2
4	650462	4207298	6.32	6.89	81.8	637	17.2	104.3	24.7	30.8	12	345	86.9	11.1	0.4	12.4	6.5
5	651155	4205887	6.47	5.51	63.5	529	15.5	87	14.7	23.2	6.1	339	21.7	10.5	-	16.4	2.9
6	650023	4206058	6.62	0.44	110	515	16.3	97.8	17.2	26.4	10	397	22.7	10	0.6	11.9	2.7
7	649541	4205986	6.37	6.89	86.5	488	19	74.7	17.3	27.8	10.2	298	28.9	11.5	0.8	10.8	6.2
8	649491	4205341	6.62	5.1	58.8	831	15.7	159.1	26.5	38.2	10.4	397	180	18.1	0.3	6.8	5.4
9	648508	4205000	6.96	5.45	63.5	660	16.3	97	25.1	28.1	11.2	429	25.2	13.2	0.4	14.2	2.8
10	648277	4204092	7.16	6.73	76.8	766	15.6	145.8	25.8	17.4	12	532	24.3	11	0.2	19.4	4.5
11	646065	4204053	7.11	5.21	59.2	781	14.2	149.3	18.6	20.3	4.5	433	74	26.2	-	42.5	2.6
12	647556	4202944	6.73	3.7	43	1020	16.1	133.5	23.7	41.5	14.9	286	98.9	97.5	0.2	141	4.0
13	647465	4202824	6.81	4.17	48.5	955	16.1	137.9	22.2	39.6	13.7	280	105	90.8	0.2	125	4.9
14	646534	4201751	7.07	2	23.1	1074	15.1	186.8	32.1	51	16	590	141	47.4	-	1.5	1.6
15	646309	4201603	6.57	1.93	23.1	813	17.5	130.2	19.2	41.8	12.8	356	115	28.5	-	7.4	5.5
16	645291	4202219	5.67	1.86	27	701	27.3	166.6	18.6	18.6	16.7	237	299	13.5	-	-	2.5
17	643807	4201583	7.5	7.68	89.9	387	16	59	17.4	11.8	5.4	252	18	9.1	-	13.2	2.5
18	644711	4200896	6.69	1.87	21.2	1472	15.2	344.4	59.1	45.1	17.8	375	698	27.8	-	0.5	6.4
19	644831	4200425	5.87	3.02	37.7	772	19	133.6	23.8	47.1	15.9	239	287	17.3	-	-	3.0
20	644513	4200349	5.92	2	23.4	812	16.3	145	27.2	50.1	17.6	264	280	17.3	-	-	6.2
21	644479	4200348	6.56	3.1	35.5	1147	15.6	205.5	50.1	42.9	18.1	547	287	24.3	-	6.8	3.1
22	644187	4200215	7.19	6.69	77	761	15.5	144	30.8	36.9	10.6	481	82.7	22	-	5.7	5.9
23	643645	4200674	7.48	6.9	83.4	406	15.4	71.3	22	17.4	9.1	287	31.5	10	0.1	5.9	5.7
24	644990	4199332	7.06	4.19	50.8	856	18.6	169.9	27.4	36.4	8.5	629	10.3	22.4	-	3.2	5.5
25	642586	4200304	6.98	6.73	87	437	15.3	89.7	13.5	23.4	7.8	176	160	6.8	-	1.3	2.9

3.3.2 Tarımsal sulama suları bakımından değerlendirme

Tarımsal üretimde kullanılacak suyun kalitesi başta EC, SAR ve %Na değerleri yardımıyla incelenmektedir. Bu amaçla ABD Tuzluluk Laboratuvarı ve Wilcox diyagramları geliştirilmiştir. Sular, ABD Tuzluluk Laboratuvarı Diyagramı'ndaki dağılımlarına göre C2S1 ve C3S1 sınıfında yer almaktadır (Şekil 4). Buna göre, çalışma alanında bulunan yeraltısularının, orta ve yüksek derecede tuz ihtiyacı olan bitkiler ile sodyuma karşı duyarlılığı olmayan tüm bitkilerin üretiminde kullanılması uygundur. Wilcox Diyagramı'na göre ise EC değerlerindeki artışa bağlı olarak çok iyi-iyi kullanılabilir sular sınıfındadır (Şekil 5).



Şekil 4. ABD Tuzluluk Laboratuvarı Diyagramı (Semboller için Şekil 3'ye bakınız)



Şekil 5. Wilcox Diyagramı (Semboller için Şekil 2'e bakınız)

Başta Na⁺, K⁺ ve Mg²⁺ olmak üzere ana iyonların miktarları ve birbirlerine göre zenginleşme dereceleri suların sulama amaçlı kullanıma uygunluklarını etkilemektedir. Bu nedenle sulama sularının bitki gelişimine ve tarım arazilerine etkilerinin değerlendirilebilmesi için çeşitli indisler geliştirilmiş ve sulama suyu kaliteleri bu indisler yardımıyla değerlendirilmiştir (Tablo 2).

Sodyum Adsorbsiyon Oranı (SAR): Sulama sularındaki Na⁺ derişiminin Ca²⁺'a nazaran yüksek olması, Na⁺'un iyon değişimi yoluyla toprakta bollaşmasına neden olacaktır. Böylece toprakta tuzlanma, killeşme gibi sorunlar meydana gelebilecektir [13, 33]. Çalışma alanından derlenen örnekler için Denklem (1) kullanılarak hesaplanan SAR değerleri 0,28-1 arasında değişmektedir (Tablo 2). Buna göre tüm örnekler SAR değerleri bakımından iyi kalite sulama suları olarak sınıflandırılmışlardır (Tablo 3).

$$SAR = \frac{rNa^{+}}{\sqrt{\frac{rCa^{2+} + rMg^{2+}}{2}}}$$
 (meq/l)(1)

T-LL- 1	T 1	1		· 1·	1 ~ 1	
LADIO Z.	Tarimsal	sulama	SIIVII	indis	deger	eri
	1 41 1110 41	0 01 01 11 00				

No	SAR	PI	RSC	MR	%Na	KI	PS	TH
1	0.28	73.95	1.07	19.89	12.49	0.12	0.63	137.74
2	0.58	49.67	-0.09	23.03	17.25	0.17	0.34	290.15
3	0.58	57.06	-0.32	27.18	18.71	0.21	0.50	196.85
4	0.70	43.16	-1.62	28.30	18.46	0.18	1.28	361.95
5	0.60	51.13	-0.02	21.97	17.29	0.18	0.58	277.66
6	0.65	49.51	0.18	22.67	18.17	0.18	0.57	314.90
7	0.75	53.54	-0.29	27.85	22.12	0.23	0.68	257.63
8	0.74	35.62	-3.66	21.73	15.94	0.16	2.48	506.19
9	0.66	47.45	0.09	30.13	17.86	0.18	0.70	345.37
10	0.35	36.38	-0.72	22.78	10.13	0.08	0.62	470.10
11	0.42	35.84	-1.92	17.19	9.97	0.10	1.64	449.25
12	0.87	37.97	-3.96	22.83	20.18	0.21	4.28	430.76
13	0.82	36.92	-4.15	21.15	19.16	0.20	4.12	435.58
14	0.90	37.43	-2.34	22.26	17.95	0.18	3.05	598.37
15	0.90	42.64	-2.27	19.73	20.92	0.22	2.15	404.02
16	0.36	26.01	-5.99	15.69	11.13	0.08	3.56	492.45
17	0.35	51.81	-0.27	32.95	12.90	0.12	0.49	218.84
18	0.59	18.42	-16.00	22.24	9.84	0.09	8.20	1102.87
19	0.98	37.60	-4.75	22.89	22.08	0.24	3.57	431.42
20	1.00	36.41	-5.19	23.82	21.65	0.23	3.49	473.86
21	0.69	29.79	-5.48	28.89	13.88	0.13	3.80	719.04
22	0.73	38.80	-1.88	26.28	16.11	0.16	1.59	486.16
23	0.46	47.53	-0.69	33.96	15.50	0.14	0.66	268.46
24	0.68	38.78	-0.47	21.18	14.31	0.15	0.85	536.85
25	0.61	40.98	-2.72	20.05	17.83	0.18	1.89	279.47

Permeabilite İndisi (PI): Tarım arazilerinde toprağın geçirimliliği bitki gelişimi ve toprağın işlenebilmesi için önem arz etmektedir. Sulama sularındaki Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻ ve Na⁺ derişimleri uzun süreli kullanımda tarımsal arazilerin geçirimliliklerini olumsuz yönde etkilemektedir [34, 43, 44]. Çalışma alanı için Denklem (2) kullanılarak hesaplanan PI değerlerine göre 18 nolu örnek 18,42 PI değeri ile 3. Sınıf (Uygun Değil) kategorisinde yer almakta iken diğer sular 2. Sınıf (İyi) kategorisinde yer almaktadır (Tablo 2 ve 3).

$$PI = \left(\frac{rNa^{+} + \sqrt{rHCO_{3}^{-}}}{rCa^{2+} + rMg^{2+} + rNa^{+}}\right) \times 100 \qquad (\text{meq/l})(2)$$

Kalıntı Sodyum Karbonat (RSC): Suların $CO_3^{2^-}$ ve HCO_3^- derişimlerini Ca^{2+} ve Mg^{2+} derişimlerine göre değerlendiren RSC değerinin artması sularda sodik koşulların egemen olmasına sebep olacak ve olası çökelimler neticesinde toprağın havalanma ve su tutuma kapasitesi olumsuz yönde etkilenebilecektir [13, 45, 46]. Çalışma kapsamında örneklenen suların Denklem (3) kullanılarak RSC değerleri -16-1,07 arasında değişmekte olup suların tamamı güvenli olarak sınıflanmıştır (Tablo 2 ve 3) [47].

$$RSC = (rCO_3^{2^-} + rHCO_3^{-}) - (rCa^{2^+} + rMg^{2^+})$$
(meq/l)(3)

Magnezyum Oranı (MR): Sulama sularındaki Mg⁺² derişiminin diğer katyonlara nazaran yüksek olması da çökelme ve iyon değişimine bağlı olarak toprağın tuzlanmasına ve dolayısıyla bitki gelişiminin olumsuz yönde etkilenmesine sebep olacaktır [35, 46]. İnceleme alanındaki suların Denklem (4) kullanılarak hesaplanan MR değerlerinin tamamı 15,69-33,96 arasında değişen değerleri ile MR bakımından "Uygun" kategorisinde yer almaktadır (Tablo 2 ve 3).

$$MR = \frac{rMg^{2+}}{rCa^{2+} + rMg^{2+}} \times 100$$
 (meq/l)(4)

Sodyum Yüzdesi (%Na): Tarımsal arazilerde toprağın kalitesini olumsuz yönde etkileyen Na'un sulama suyunda diğer katyonlara nazaran değerlendirildiği, Denklem (5) kullanılarak hesaplanan %Na değerleri %9,84-22,11 arasında değişmektedir. Bu durum 5 (8, 12, 15, 19, 20) örnek hariç suların %Na değeri bakımından "Mükemmel" kalitede olduklarını göstermektedir (Tablo 2 ve 3) [34].

$$\% Na = \left(\frac{rNa^{+} + rK^{+}}{rCa^{2+} + rMg^{2+} + rK^{+} + rNa^{+}}\right) \times 100 \quad (\text{meq/l})(5)$$

Kelley İndeksi (KI): Sulama sularındaki Na⁺ iyonunun Ca²⁺ ve Mg²⁺ iyonlarına oranını gösteren Kelly indeksi, iyon değişimi ve çökelim neticesinde Na⁺'un tarım arazilerinde oluşturması muhtemel riskleri tanımlamak üzere geliştirilmiş olup 1'den büyük KI değerleri suların sulama için uygun olmayacağına işaret etmektedir [36]. Niğde alüvyon akiferine ait suların, Denklem (6) ile hesaplanan KI değerleri (0,08-0,23) sulamaya uygun sular olduklarını göstermektedir (Tablo 2 ve 3).

$$KI = \frac{rNa^+}{rCa^{2+} + rMg^{2+}}$$
(meq/l)(6)

 Tablo 3. Tarımsal sulama suyu indislerine göre suların

 sınıflandırılması

Parametre	Sınır Değer	Sulama Suyu Sınıfı		
	<20	Mükemmel		
	20-40	İyi		
SAR [33]	40-60	İzin Verilebilir		
	60-80	Şüpheli Kullanım		
	80<	Kullanıma Uygun Değil		
	<25	3. Sınıf (Uygun Değil)		
PI [34]	25-75	2. Sınıf (iyi)		
	75<	Mükemmel (1. Sınıf)		
	<1.25	Güvenli		
RSC [45]	1.25-2.5	Normal		
	2.5<	Uygun Değil		
MD [25]	<50	Uygun		
MR [35]	50<	Uygun Değil		
	<20	Mükemmel		
	20-40	İyi		
%Na [33]	40-60	İzin Verilebilir		
	60-80	Şüpheli Kullanım		
	80<	Kullanıma Uygun Değil		
	<1	Uygun		
KI [30]	1<	Uygun Değil		
DC [24]	<3	Uygun		
PS [34]	3<	Uygun Değil		
	<60	Yumuşak		
	60-120	Orta Sert		
IH [48]	120-180	Sert		
	180<	Çok Sert		

Potansiyel Tuzluluk (PS): Suların EC değerlerinde önemli etkisi olan Cl⁻ ve SO₄²⁻ derişimlerine bağlı olarak sebep olabilecekleri tuzluluk tehlikesinin değerlendirildiği PS değerlerinin 3'ün üzerinde olması suların sulama için uygun olmadığını göstermektedir [34, 46]. Çalışma kapsamında örneklenen suların Denklem (7) ile hesaplanan PS değerleri 0,33-8,20 arasında değişmekte olup 8 adet numunenin (12-14, 16, 18-21 nolu örnekler) PS bakımından sulamaya uygun sular olmadıkları anlaşılmıştır [34] (Tablo 2 ve 3). Bu numunelerin tamamı (12 nolu örnek hariç) Niğde kent merkezi güney sınırında, önemli bir kısmı (18-21) ise Derdalan Jeotermal Alanı dolayında bulunmaktadır.

$$PS = rCl^{-} + 0.5rSO_{4}^{2-}$$
 (meq/l)(7)

Toplam Sertlik (TH): Sulardaki Ca^{2+} ve Mg^{2+} iyonlarının etkinliğinin bir ifadesi olan Denklem (8) ile hesaplanan TH değeri 137,74-1102,87 arasında değişmekte olup 1 numaralı örnek hariç tüm örnekler çok sert sular sınıfına düşmektedir [33, 48] (Tablo 2 ve 3).

$$TH = (2,497Ca^{2+}) + (4,11Mg^{2+})$$
 (mg/l)(8)

3.3.3 Endüstriyel kullanım amaçlı sular bakımından değerlendirme

Doğal suların hidrokimyasal özellikleri çökelme ya da korozyon yoluyla temasta oldukları, başta kuyu ekipmanları ve iletim hatları olmak üzere temas ettikleri malzemelere zarar verebilmektedir. Bu durum kentsel ve endüstriyel amaçlı yeraltısuyu kullanımından kaynaklı olarak maliyet, zaman ve işgücü kayıplarına sebep olabilmektedir. Bu kapsamda doğal suların endüstriyel ve kentsel amaçlı kullanımları sırasında sebep olabilecekleri korozyon etkisini öngörebilmek amacıyla çeşitli indisler geliştirilmiştir [40, 44-53]. Buna göre suların pH, sıcaklık, toplam çözünmüş madde miktarı, alkalinite ve bazı ana iyon değerleri suların korozitivite özelliklerinde belirleyici olmaktadır. Niğde alüvyon akiferinden derlenen örnekler için hesaplanan korozitivite değerleri Tablo 4'te sunulmuştur.

Langelier Doygunluk İndisi (LSI): Suyun kalsiyum karbonatı çözme ya da çökeltme eğilimini belirlemek için geliştirilen indis, demir veya galvanizli boruların korozyona uğrama ihtimalini değerlendirmek üzere, TDS değeri 10.000 mg/l'den az olan sular için geliştirilmiştir [42-54]. LSI değeri negatif olduğunda su, kalsiyum karbonatı çözme eğilimindeyken; pozitif değerler suyun kalsiyum karbonatı çökeltme eğiliminde olduğunu göstermektedir. Çalışma kapsamında Denklem (9) kullanılarak hesaplanan LSI değerleri hesaplanan 25 örneğin 9 tanesi (3, 10, 11, 14, 17, 18, 22-24 nolu örnekler) kalsiyum çökeltme eğilimindeyken 1 tanesi (9 nolu örnek) nötr olup 14 tanesi kalsiyum karbonatı çözerek korozyona sebep olma eğilimindedir. En yüksek korozyon potansiyelini 19 numaralı örnek (LSI=-1,18) taşımakta iken en yüksek kalsiyum karbonat çöktürme eğilimini 24 nolu örnek (LSI=0,52) taşımaktadır (Tablo 5).

$$LSI = pH - pHs \tag{9}$$

pHs, suyun doygunluk durumundaki pH olup Denklem (10-14) ile hesaplanmaktadır.

$$pHs = (9,3 + A + B) - (C + D)$$
(10)

$$A = \frac{\log(TDS) - 1}{10}$$
(mg/l)(11)

$$B = -130,12 \times \log({}^{0}C + 273) + 34,55$$
(12)

$$C = log(CaCO_3 olarak Ca^{2+})$$
(mg/l)(13)

$D = log(CaCO_3 Alkalinitesi)$ (mg/l)(14)

Tablo 4. Korozyon ve kabuklaşma indis değerleri

Örnek No	LSI	RSI	PSI	LS	AI	CSMR
1	-0.05	8.09	7.73	0.25	11.62	0.21
2	-0.75	8.23	6.39	0.07	10.70	0.62
3	0.45	7.38	7.37	0.17	12.05	0.65
4	-0.69	8.11	6.30	0.38	10.79	0.13
5	-0.64	8.20	6.55	0.13	10.86	0.48
6	-0.35	7.76	6.16	0.12	11.06	0.44
7	-0.80	8.39	6.72	0.19	10.70	0.40
8	-0.19	7.41	5.80	0.65	11.27	0.10
9	0.00	7.07	5.75	0.13	11.40	0.52
10	0.44	6.72	5.47	0.09	11.78	0.45
11	0.29	6.98	5.80	0.32	11.74	0.35
12	-0.32	7.77	6.49	1.63	11.31	0.99
13	-0.22	7.67	6.49	1.03	11.40	0.86
14	0.46	6.55	5.15	0.44	11.79	0.34
15	-0.35	7.69	6.10	0.55	11.14	0.25
16	-1.16	8.34	6.11	1.70	10.34	0.05
17	0.13	7.70	7.27	0.15	11.72	0.51
18	0.12	6.82	5.32	2.49	11.68	0.04
19	-1.18	8.65	6.62	1.65	10.45	0.06
20	-1.10	8.55	6.51	1.46	10.53	0.06
21	-0.04	7.03	5.17	0.74	11.32	0.08
22	0.42	6.79	5.64	0.30	11.80	0.27
23	0.23	7.47	6.94	0.20	11.78	0.32
24	0.52	6.43	4.98	0.08	11.74	2.17
25	-0.38	8.21	7.49	1.22	11.38	0.04

Ryznar Duraylılık İndisi (RSI): İçme suyu şebekelerinde sudan kaynaklı korozyon ve kalsiyum karbonat çökelim ihtimalini değerlendirmek üzere geliştirilmiş olan RSI Denklem (15) ile hesaplanmakta olup korozyon ve çökelim ihtimali 5 sınıfta değerlendirilmiştir [50] (Tablo 5). Çalışma kapsamında incelenen 4 örnek (10, 14, 22, 24) az çökelim ve korozyon potansiyeli, 2 örnek (19 ve 20) çok yüksek korozyon potansiyeli, diğer örnekler ise yüksek korozyon potansiyeli taşımaktadır.

$$RSI = 2pHs - pH \tag{15}$$

Puckorius Kabuklaşma İndisi (PSI): LSI ve RSI indislerine alternatif olarak önerilen PSI, LSI ve RSI indislerinden farklı olarak suyu tamponlama kapasitesini de hesaplamaya dahil etmiş ve suları korozif, nötr ve korozif olmayan şeklinde 3 sınıfta incelemiştir [39]. Denklem (16) kullanılarak elde edilen sonuçlara göre çalışma kapsamında örneklenen yeraltısularının 4 tanesi (1, 3, 17, 25 nolu örnekler) korozif özellik taşırken diğerleri nötr özelliğe sahiptir.

$$PSI = 2(pHs) - pHeq$$
(16)

pHeq denge anındaki pH değeri olup Denklem 17 ile hesaplanmaktadır.

$$1,465 \times log(Alaklinite) + 4,54$$
 (mg/l)(17)

Tablo 5. Korozyon ve kabuklaşma indislerine göre suların

 sınıflandırılması

Parametre	Sınır Değer	Sınıfi			
	<0	Doygun Değil, Korozif			
LSI [42]	0	Doygun, Kabuklaştırıcı Değil			
	0<	Aşırı Doygun, Kabuklaştırıcı			
	<10	Aşırı Korozif			
AI [40]	10-12	Kısmen Korozif			
	12<	Kabuklaştırıcı, Korozif Değil			
	<5.5	Aşırı Kabuklaştırıcı			
	5.5-6.2	Kabuklaştırıcı			
RSI [50]	6.2-6.8	Nötr			
	6.8-8.5	Korozif			
	8.5<	Aşırı Korozif			
	<6	Kabuklaştırıcı			
PSI [39]	6-7	Nötr			
	7<	Kuvvetli Korozif			
	<0.8	Kabuklaştırıcı			
LS [37]	0.8-1.2	Korozif			
	1.2<	Aşırı Korozif			
CSMD [29]	<0.5	Korozif Değil			
CONIK [30]	0.5<	Korozif			

Larson-Skold İndisi (LS): Suların çelik borularda meydana getirebileceği korozif etkinin incelendiği LS indisi kullanılarak klorür ve sülfatın kireç oluşumuna etkileri 3 kategoride değerlendirilmiştir [37] (Tablo 5). Denklem (18) kullanılarak yapılan hesaplamalar neticesinde, LS değeri 1,2'nin üzerinde olan 6 örneğin (12, 16, 18-20, 25 nolu örnekler) yüksek korozyon potansiyeli taşıdığı; LS değeri 0,8-1,2 arasında olan 1 örneğin (13 nolu örnek) yüksek korozif özelliğe sahip olup çözünmüş klorür ve sülfatın kireç oluşumunu engelleyebileceği, diğer örneklerde ise klorür ve sülfatın kireç oluşumunda etkili olmadığı saptanmıştır.

$$LS = \frac{rCl^{-} + rSO_{4}^{2-}}{rHCO_{3}^{-} + CO_{3}^{2-}}$$
(meq/l)(18)

Klorür Sülfat Kütle Oranı (CSMR): Kurşun kullanılarak lehimlenmiş korozyonun borularda galvanik değerlendirildiği CSMR indisi klorürün Ph çözünürlüğündeki pozitif, sülfatın ise negatif etkisinin değerlendirilmesi sonucu önerilmiş olup, 0,5'in üzerindeki CSMR değerleri galvanik korozyonun arttığına işaret etmektedir (Tablo 6) [38]. Denklem (19) kullanılarak yapılan hesaplamalar neticesinde Niğde alüvyon akiferine ait 6 örneğin (2, 3, 9, 12, 13 nolu örnekler) CSMR indisine göre yüksek galvanik korozyon potansiyeli olduğu belirlenmiştir. En yüksek CSMR değeri 2,17 ile 24 nolu örneğe aittir (Tablo 5).

$$CSMR = \frac{Cl^-}{SO_4^{2-}}$$
(mg/l)(19)

Agresiflik İndisi (AI): Asbestli borularda ve beton malzemelerde suyun aşındırıcı etkisini değerlendirmek üzere önerilen indis suyun pH, Ca²⁺ ve alkalinite değerlerini dikkate almaktadır [40]. Çalışma kapsamında Denklem (20) yapılan hesaplamalar sonucu 3 nolu örnek "agresif değil" olarak sınıflanırken diğer tüm örnekler "orta derece agresif" sınıfında yer almıştır (Tablo 5).

$$AI = pH + log[(A)(H)]$$
(20)
Burada,
A: Alkalinite (mg/l);
H: Ca²⁺ (mg/l)

Doygunluk İndisi (SI): Yeraltısuları hidrojeolojik sistemde dolasımları sırasında kayac oluşturan mineralleri çözerek bünyelerine katarlar. Bu etkileşim sonucunda, sular genel hidro(fiziko)kimyasal özellikleri kontrolünde kimi minerallerce zenginleşirler. Söz konusu minerallerle etkileşimin artması sonucunda ise doygunluk dereceleri artarak doygun hale gelebilirler. Bu noktadan sonra su, başta sıcaklık ve basınç değişimi olmak üzere genel hidrokimyasal karakterindeki değişimlere bağlı olarak söz konusu minerali çökeltme eğilimine girecektir. Suların hidrokimyasal karakterlerinden yola çıkılarak yapılan doygunluk indisi hesaplamaları suların mineralleri çözme/çökeltme eğilimleri hakkında bilgi sağlamaktadır [55, 56]. Çalışma kapsamında Niğde alüvyon akiferine ait sularda yapılan kimyasal analizlerden elde edilen veriler yardımıyla suların Anhidrit, Aragonit, Dolomit, Kalsit, Halit ve Jips minerallerine göre doygunluk indisleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre suların 9 tanesinde karbonat minerallerine doygunluk tespit edilmiştir. Tamamı kalsite doygun olan bu suların 6 tanesi aynı zamanda aragonite, 3 tanesi ise kalsit, aragonit ve dolomite göre doygun olup bu mineralleri çökeltme eğilimindedir (Tablo 6). Söz konusu numunelerin tamamı inceleme alanının mansap tarafında bulunan yarısında yer almakta olup, akım yolu boyunca suların iyon yükünün artmasının bu duruma neden olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum kentsel ve endüstriyel kullanım sırasında söz konusu kuyulardan alınan suların başta kalsit olmak üzere karbonat minerali çökeltme ve dolayısıyla boruların tıkanması, veriminin azalması gibi problemlere yol açmasının söz konusu olduğunu göstermektedir.

Tablo 6. Doygunluk indisi değerleri

Örnek No	Anhidrit	Aragonit	Kalsit	Dolomit	Jips	Halit
1	-2.37	-0.96	-0.81	-2.24	-2.12	-8.78
2	-2.70	-0.24	-0.09	-0.69	-2.46	-8.36
3	-2.66	-0.57	-0.42	-1.23	-2.42	-8.27
4	-1.80	-0.23	-0.08	-0.54	-1.56	-8.04
5	-2.41	-0.30	-0.15	-0.85	-2.16	-8.15
6	-2.37	-0.18	-0.03	-0.59	-2.12	-8.15
7	-2.35	-0.36	-0.21	-0.79	-2.11	-8.04
8	-1.39	-0.06	-0.09	-0.37	-1.14	-7.75
9	-2.36	-0.16	-0.01	-0.38	-2.11	-8.01
10	-2.26	0.07	0.22	-0.09	-2.01	-8.10
11	-1.75	-0.04	0.12	-0.48	-1.50	-7.86
12	-1.68	-0.24	-0.09	-0.70	-1.43	-6.96
13	-1.64	-0.23	-0.08	-0.73	-1.39	-7.02
14	-1.46	0.16	0.31	0.06	-1.22	-7.21
15	-1.62	-0.13	0.02	-0.55	-1.37	-7.49
16	-1.14	-0.11	0.03	-0.52	-0.93	-8.19
17	-2.62	-0.56	-0.41	-1.13	-2.37	-8.52
18	-0.69	0.10	0.25	-0.04	-0.44	-7.52
19	-1.26	-0.32	-0.17	-0.82	-1.02	-7.69
20	-1.24	-0.28	-0.13	-0.76	-1.00	-7.66
21	-1.17	0.13	0.29	0.18	-0.92	-7.59
22	-1.74	0.00	0.15	-0.15	-1.50	-7.67
23	-2.33	-0.46	-0.31	-0.90	-2.08	-8.32
24	-2.61	0.24	0.38	0.24	-2.36	-7.69
25	-1.57	-0.61	-0.46	-1.53	-1.32	-8.35

4 Sonuçlar

Su kalitesi doğal ekosistemin, toplum sağlığı ve refahının korunması ve bölgesel sürdürülebilir kalkınmanın sağlanması için kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, yeraltısuyunun en önemli su kaynağı konumunda olduğu Niğde il merkezinde yayılım gösteren alüvyon akifere ait sular içme, insani kullanım, tarımsal sulama, endüstriyel ve kentsel amaçlı kullanıma uygunlukları bakımından değerlendirilmiştir. Çalışma alanının kuzey-kuzeybatısında Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı andezit ve piroklastiklerden oluşan volkanitler, doğu-güneydoğusunda ise Paleozoyik-Mesozoyik yaşlı Aşıgediği Formasyonu'na ait mermerler yüzeylenmektedir. Tüm bu birimler çalışma kapsamında incelenen akifer sistemini oluşturan alüvyon örtü tarafından uyumsuz olarak üzerlenmektedir. Alüvyon örtünün kil, silt boyu taneler içeren ve tüflü seviyelerinin geçirimsiz, kum, çakıl boyutu tanelerden oluştuğu kesimlerinin ise geçirimli özellik taşımaktadır. Bu geçirimli ve geçirimsiz seviyeler arasında serbest ve basınçlı akifer seviyeleri oluşmuştur. Niğde kent merkezi alüvyon akiferini çevreleyen volkanitlerin kırıklı çatlaklı kesimleri ile Niğde Masifi'nin (özellikle mermerlerin) kırıklı çatlaklı ve yer yer karstik kesimleri akifer özelliği taşımakta olup, alüvyon akiferi beslemektedirler. Kuyularda yeraltısuyu derinlikleri 3-20 m arasında; seviyeleri ise 1200-1260 m arasında değişmektedir. Genel yeraltısuyu akım yünü KD'dan GB'ya doğrudur.

Çalışma kapsamında örneklenen yeraltısularının pH değerleri 5,67- 7,84; EC değerleri ise 384-1472 µS/cm gibi geniş bir aralıkta değişmektedir. Sular katyonlar bakımından Ca²⁺, anyonlar bakımından ise HCO₃-'ca baskındır. Bunun yanı sıra katyonlar bakımından Na⁺ ve kısmen de Mg²⁺; Anyonlar bakımından ise 12 ve 13 nolu örneklerde görülen düşük SO42- ve Cl- zenginleşmesinin yanı sıra SO42bakımından belirgin zenginleşmeler söz konusudur. Böylece çalışma alanında Ca-HCO3, Ca-HCO3-SO4, Ca-SO4-HCO3, Ca-Mg-HCO₃, Ca-Mg-HCO₃-SO₄, Ca-Mg-SO₄-HCO₃ ve Ca-HCO₃-Cl tipinde hidrokimyasal fasiyesler ortaya çıkmıştır. Mg2+ ve SO42- zenginleşmeleri Niğde kent merkezinin güney kesiminde maksimuma ulaşmaktadır. Bu alanın Derdalan Jeotermal Alanı'na yakınlığı söz konusu zenginleşmelerin ve dolayısıyla hidrokimyasal karakter değisiminin baslıca jeotermal karısım etkisi ile ortaya çıktığını göstermektedir [20] (Şekil 1). Na⁺ zenginleşmesi ise jeotermal alana yakın örneklerin yanı sıra alüvyonun orta kesiminde görülmektedir. Bu durum, söz konusu zenginleşmelerin jeotermal akışkan etkisi ve/veya alüvyonda killi seviyelerin yoğunlaşmasından kaynaklı olabileceğini göstermektedir.

Suların, alüvyon akiferde gerçekleşen hidrojeokimyasal proseslerden kaynaklı olarak Ca²⁺, Mg²⁺ (18 ve 21 nolu örnekler) ve SO₄²⁻ (16, 18-21 nolu örnekler) bakımından TSE; HCO₃⁻ ve SO₄²⁻ bakımından ise (numune 4 ve 1) WHO tarafından; NO₃⁻ (12 ve 13 nolu örnekler) bakımından ise her iki standartta önerilen değerleri aştığı anlaşılmıştır.

Sular, ABD Tuzluluk Laboratuvarı Diyagramı'ndaki dağılımlarına göre C2S1 ve C3S1 sınıfında, Wilcox Diyagramı'na göre ise EC değerlerindeki artışa bağlı olarak çok iyi-iyi kullanılabilir sular sınıfında yer almaktadır. Buna göre çalışma alanında bulunan yeraltısularının, orta ve yüksek derecede tuz ihtiyacı olan bitkiler ile sodyuma karşı duyarlılığı olmayan tüm bitkilerin üretiminde kullanılması uygundur.

Suların tarımsal sulama suyu kalitesi ve endüstriyel kullanım bakımından değerlendirmelerinde alüvyonun merkez ve özellikle de mansap kısmında (Niğde kent merkezinin güneyi) su kalitesinin tarımsal arazi kullanımı, jeotermal karışım ve su kayaç etkileşimi gibi nedenlerle azaldığı anlaşılmıştır. Özellikle su kayaç etkileşimi ve arazi kullanımı gibi nedenler su kalitesinde lokal bozulmalara sebep olmaktadır. Bunun yanı sıra, alüvyon akiferin heterojen ve anizotrop yapısı farklı derinliklerde açılmış birbirine yakın kuyularda farklı su kalitesi değerlerinin elde edilmesine sebep olmuştur.
Sonuçlar inceleme alanındaki suların önemli bir kısmının sulamaya uygun olduğunu, içme ve kullanma suyu olarak ise kısmında inceleme alanının orta tarımsal arazi kullanımından kaynaklı, mansap kısmına doğru (12, 14, 16, 18-21 nolu numuneler) ise, jeotermal sularla karışım sonucunda EC, SO42- ve Mg2+ konsantrasyonlarında artış seklinde kendini gösteren su kalitesinde azalma saptanmıştır. Yine, akiferin mansap kısmında Niğde kent merkezi güneyinden itibaren Na⁺ zenginleşmeleri saptanmış olup, bu durumun bölgede kalınlığı ve yayılımı artan killi seviyelerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Alüvyon akiferin beslenme bölgesinde iyon yükünün azlığı ve yine jeotermal akışkanın sularla karışımının etkin olduğu bölgede düşük pH ve yüksek iyon yükü nedeniyle yeraltısularının endüstriyel kullanıma uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma FEB2016/14-BAGEP ve MMT2020/1-BAGEP nolu projeler kapsamında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir

Benzerlik oranı: %11

Kaynaklar

- [1] N. Adimalla, Groundwater quality for drinking and irrigation purposes and potential health risks assessment: A case study from semi-arid region of south India, Expo Health, 11 (2), 109–123, 2019. https://doi.org/10.1007/S12403-018-0288-8.
- [2] E. Union, Groundwater protection in Europe: The new groundwater directive: consolidating the EU regulatory framework, 2009. https://doi.org/10.2779/84304.
- [3] P. Li, H. Qian, and J. Wu, Conjunctive use of groundwater and surface water to reduce soil salinization in the Yinchuan Plain, North-West China, Int J Water Resour Dev, 34 (3), 337–353, 2018. https://doi.org/10.1080/07900627.2018.1443059.
- [4] S. Sahu, U. Gogoi, and N. C. Nayak, Groundwater solute chemistry, hydrogeochemical processes and fluoride contamination in phreatic aquifer of Odisha, India, Geoscience Frontiers, vol. 12 (3), 101093, 2021. https://doi.org/10.1016/J.GSF.2020.10.001.
- [5] S. Ghosh and M. K. Jha, Evaluating trends in groundwater quality of coastal alluvial aquifers of Eastern India for sustainable groundwater management, Environmental Science and Pollution Research, 31 (29), 42049–42074, 2024. https://doi.org/ 10.1007/S11356-024-33852-3.
- [6] WHO, Guidelines for drinking-water quality, 2011.
- [7] E. Mazor, Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology. CRC Press, 2003.
- [8] C. A. J. Appelo and D. Postma, Geochemistry, Groundwater and Pollution. CRC Press, 2013.
- [9] J. D. Hem, Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. University Press of the Pacific, 2005.

- [10] S. Varol, A. Davraz, Ş. Şener, E. Şener, F. Aksever, B. Kırkan and A. Tokgözlü, Assessment of groundwater quality and usability of Salda Lake Basin (Burdur/Turkey) and health risk related to arsenic pollution, J Environ Health Sci Eng, 19 (1), 681–706, 2021. https://doi.org/10.1007/S40201-021-00638-5.
- [11] E. D. Sunkari, T. Abangba, A. Ewusi, S. E. K. Tetteh, and E. Ofosu, Hydrogeochemical evolution and assessment of groundwater quality for drinking and irrigation purposes in the Gushegu Municipality and some parts of East Mamprusi District, Ghana, Environ Monit Assess, vol. 195 (1), 1–25, 2023. https://doi. org/10.1007/S10661-022-10731-3.
- [12] Ş. Şener, S. Varol ve E. Şener, Akşehir (Konya) Ovası yeraltısuyu kalitesi ve kullanılabilirliğinin belirlenmesi, Journal of Limnology and Freshwater Fisheries Research, 8 (1), 80–91, 2022. https://doi.org/ 10.17216/LIMNOFISH.871731.
- [13] B. A. Berhe, M. Çelik, and U. E. Dokuz, Investigation of irrigation water quality of surface and groundwater in the Kütahya plain, Turkey, Bulletin of the Mineral Research and Exploration, (150), 2015. https://doi.org/ 10.19111/bmre.95431.
- [14] A. Fırat Ersoy and E. Hatipoğlu Temizel, Karadere Deresi'nin (Araklı-Trabzon) içme ve sulama suyu amaçlı kullanım uygunluğunun incelenmesi, Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 8 (2), 238–249, 2022. https:// doi.org/10.21324/DACD.1005286.
- [15] T. P. Maluleke, S. Dube, E. D. Sunkari, and A. A. Ambushe, Assessment of borehole water quality in Nwadzekudzeku village, Giyani, Limpopo Province, South Africa: Implication for potential human health risks, Journal of Trace Elements and Minerals, 11, 100206, 2025. https://doi.org/10.1016/J.JTEMIN.2024 .100206.
- [16] F. Gültekin, A. Firat Ersoy, E. Hatipoglu, and S. Celep, Quality assessment of surface and groundwater in Solaklı Basin (Trabzon, Turkey), Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 72, (2), 213–224, 2013. https://doi.org/10.1007/s10064-013-04 67-6.
- [17] E. D. Sunkari, M. Abu, P. S. Bayowobie, and U. E. Dokuz, Hydrogeochemical appraisal of groundwater quality in the Ga west municipality, Ghana: Implication for domestic and irrigation purposes, Groundw Sustain Dev, vol. 8, 2019. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.0 2.002.
- [18] A. Lermi and G. Ertan, Hydrochemical and isotopic studies to understand quality problems in groundwater of the Niğde Province, Central Turkey, Environ Earth Sci, 78, (12), 1–32, 2019. https://doi.org/10.1007/S12 665-019-8365-2.
- [19] F. Çiner, E. D. Sunkari, and B. A. Şenbaş, Geochemical and multivariate statistical evaluation of trace elements in groundwater of Niğde Municipality, South-Central Turkey: Implications for arsenic contamination and human health risks assessment, Arch Environ Contam Toxicol, 80 (1), 164–182, 2021. https://doi.org/10.1007/S00244-020-00759-2.

- [20] U. E. Dokuz, S. Yaşar Korkanç, and M. Korkanç, Niğde kent merkezi alüvyon akiferinin yeraltısuyu kalitesini etkileyen doğal ve antropojenik faktörlerin incelenmesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7 (3), 1095–1100, 2018. https://doi.org/10.28948/ngumuh.502263.
- [21] TSE, Türk Standartları Enstitüsü, Türk İçme Suyu Standartları TS 266 sayılı standart. İnsani tüketim amaçlı sular, Ankara, 2005.
- [22] Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü. https://www.mgm.gov.tr.
- [23] F. Ballı, M. Sönmez, and A. Lermi, Niğde GD kesiminin jeolojisi ve Niğde fayına ilişkin yeni bulgular, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7 (3), 1180–1185, 2018. https://doi.org/10.28948/ngumuh.502417.
- [24] M. Sönmez, F. Aydin, A. Lermi, and S. Oğuz Saka, Niğde Volkanik Kompleksi'nin batı kesiminin jeolojisi ve volkanostratigrafisi (Kapadokya, Orta Anadolu): Keçiboyduran Dağı ve yakın çevresi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7 (3), 1170–1174. 2018. https://doi.org/10.28948/ngu muh.502395.
- [25] M. Afşin, Hydrochemical evolution and water quality along the groundwater flow path in the Sandikli plain, Afyon, Turkey, Environmental Geology, 31 (3–4), 221–230, 1997. https://doi.org/10.1007/S0025400501 83.
- [26] G. Tayfur, T. Kirer, and A. Baba, Groundwater quality and hydrogeochemical properties of Torbalı Region, İzmir, Turkey, Environ Monit Assess, 146 (1–3), 157– 169, 2008. https://doi.org/10.1007/S10661-007-0068-6
- [27] A. Baba, G. Yüce, O. Deniz, and D. Y. Uğurluoğlu, Hydrochemical and isotopic composition of Tuzla Geothermal Field (Canakkale-Turkey) and its environmental impacts, Environ Forensics, 10, (2), 144–161, 2009. https://doi.org/10.1080/15275920902 873418.
- [28] M. Brehme, T. Scheytt, M. Çelik, and U. E. Dokuz, Hydrochemical characterisation of ground and surface water at Dörtyol/Hatay/Turkey, Environ Earth Sci, 63, (6), 1395–1408, 2011. https://doi.org/10.1007/S12665 -010-0810-1.
- [29] B. Abadi Berhe, U. E. Dokuz, and M. Çelik, Assessment of hydrogeochemistry and environmental isotopes of surface and groundwaters in the Kütahya Plain, Turkey, Journal of African Earth Sciences, 134, 230–240, 2017. https://doi.org/10.1016/J.JAFREARS CI.2017.06.015.
- [30] G. Okwir, S. Kumar, K. S. Pramod, H. Gao, and K. N. Njau, Conceptualization of groundwater-surface water interaction with evidence from environmental isotopes and hydrogeochemistry in lake Babati Basin in Northern Tanzania, Groundw Sustain Dev, 21, 100940, 2023. https://doi.org/10.1016/J.GSD.2023.100940.
- [31] A. M. Piper, A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses, Eos, Transactions American Geophysical Union, 25 (6), 914–928, 1944, https://doi.org/10.1029/TR025I006P00914.

- [32] H. Schoeller, Geochemie des eause souterraines, Rev. Inst. Fr. Petrol, 10, 230–244, 1955.
- [33] L. W. M. David Keith Todd, Groundwater hydrology. John Wiley and Sons, 2004.
- [34] L. D. Doneen, Water Quality for Irrigated Agriculture In A. Poljakoff-Mayber, J. Gale (eds.) Plants in saline environments, Springer Nature, pp. 56–76, 1975.
- [35] K. V Paliwal, Irrigation with Saline Water, no. 3. Stony Brook Foundation, Inc., 1972.
- [36] W. P. Kelley, Use of Saline irrigation water, Soil Sci, 95, (6), 385-391, 1963. http://doi.org/10.1097/00010 694-196306000-00003.
- [37] T. E. Larson and R. V. Skold, Laboratory studies relating mineral quality of water to corrosion of steel and cast iron, Corrosion, 14 (6), 43–46, 1958. https:// doi.org/10.5006/0010-9312-14.6.43.
- [38] R. Gregory, Galvanic corrosion of lead solder in copper pipework, Water and Environment Journal, 4 (2), -112– 118, 1990. https://doi.org/10.1111/J.1747-6593.1990. TB01566.X.
- [39] P. R. Puckorius and J. M. Brooke, A new practical index for calcium carbonate scale prediction in cooling tower systems, Corrosion, 47 (4), 280–284, 1991. https://doi.org/10.5006/1.3585256.
- [40] AWWA, Standard for asbestos-cement transmission pipe, for water and other liquids, 67 (8), 462-467, 1975.
- [41] J. W. Ryznar, A new index for determining amount of calcium carbonate scale formed by a water, Journal AWWA, 36, (4), 472–483, 1944. https://doi.org/ 10.1002/J.1551-8833.1944.TB20016.X.
- [42] W. F. Langelier, The analytical control of anticorrosion water treatment, J Am Water Works Assoc, 28 (10), 1500–1521, 1936. https://doi.org/10.1002/J.15 51-8833.1936.TB13785.X.
- [43] S. Yıldız and C. B. Karakuş, Estimation of irrigation water quality index with development of an optimum model: a case study, Environ Dev Sustain, 22 (5), 4771–4786, 2020. https://doi.org/10.1007/S10668-01 9-00405-5.
- [44] S. Medhi, R. Choudhury, P. Sharma, and B. B. Sharma, Assessment of groundwater quality for irrigation purpose in aquifers of the Upper Brahmaputra floodplains of Assam, India, Environ Monit Assess, 96 (11), 1023, 2024. https://doi.org/10.1007/S10661-024-13150-8.
- [45] H. M. Ragunath, Ground Water. New Delhi: Wiley Eastern Ltd., 1987.
- [46] A. K. Dandapat, P. K. Panda, S. Sankalp, and M. Jothimani, Integrated assessment of groundwater quality for sustainable irrigation in drought-prone central districts of Odisha, India, Discover Sustainability, 5, (1), 1–19, 2024. https://doi.org/10. 1007/S43621-024-00443-8.
- [47] F. M. Eaton, Significance of carbonates in irrigation waters, Soil Sci, 69 (2), 1950. https://doi.org/10.10 97/00010694-195002000-00004.
- [48] C. N. Durfor, E. Becker, and U. S. G. P. Office, Public Water Supplies of The 100 Largest Cities of the United States, Washington, D.C., 1964.

- [49] W. F. Langelier, The Analytical Control of Anti-Corrosion Water Treatment, J Am Water Works Assoc, 28 (10), 1500–1521, 1936. https://doi.org/10.1002/J. 1551-8833.1936.TB13785.X.
- [50] J. W. Ryznar, A new index for determining amount of calcium carbonate scale formed by a water, J Am Water Works Assoc, 36 (4), 472–483, 1944. https://doi.org /10.1002/J.1551-8833.1944.TB20016.X.
- [51] T. E. Larson and R. V. Skold, Laboratory studies relating mineral quality of water to corrosion of steel and cast iron, Corrosion, 14 (6), 43–46, 1958. https:// doi.org/10.5006/0010-9312-14.6.43.
- [52] C. N. Sawyer, Chemistry for Sanitary Engineers, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1968.
- [53] M. Edwards and S. Triantafyllidou, Chloride-to-sulfate mass ratio and lead leaching to water, J Am Water

Works Assoc, 99 (7), 96–109, 2007. https://doi.org /10.1002/J.1551-8833.2007.TB07984.X.

- [54] P. R. Roberge, Corrosion Inspection and Monitoring, John Wiley and Sons, 2007.
- [55] J. N. Butler, Aquatic chemistry: An introduction emphasizing chemical equilibria in Natural Waters (Stumm, Werner), J Chem Educ, 48 (12), A779, 1971. https://doi.org/10.1021/ED048PA779.1.
- [56] U. E. Dokuz, M. Çelik, Y. Kağan Kadıoğlu, M. Brehme, and H. Engin, Geothermal Evaluation of the Bayramhacılı and Tekgöz-Çiftgöz area, Central Anatolia, Turkey by a New Conceptual Reservoir Model. World Geothermal Congress 2015.





NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 751-759 Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araștırma makalesi / Research article

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



Mixed model assembly line balancing with in-house parts supply considering the supermarket concept: A new mathematical model

Süpermarket konseptini dikkate alarak tesis içi parça tedariki ile karışık modelli montaj hattı dengeleme: Yeni bir matematiksel model

Emel Kızılkaya Aydoğan¹, Yılmaz Delice², Salih Himmetoğlu^{3, *}

¹ Erciyes University, Industrial Engineering Department, 38039, Kayseri, Türkiye ^{2,3} Kayseri University, Industrial Engineering Department, 38280, Kayseri, Türkiye

Abstract

The supermarket concept has become popular recently, especially for in-house part logistics systems, which are suitable for the full-time production philosophy of assembly lines that provide mass and high-volume production. The supermarket location problem (SLP) is to determine the location and number of supermarkets for the part supply from supermarkets to assembly stations. Considering the assembly line balancing problem (ALBP) and SLP together offers an important perspective in the facility planning step. This paper proposes a new mixedinteger linear programming (MILP) model to solve mixedmodel assembly line balancing problem (MMALBP) and SLP together. The aim is to minimize the total cost of workstation installation, supermarket installation, and transportation. To verify the effectiveness of the proposed MILP model, two different model structures that solve MMALBP and SLP, both separately and simultaneously, are considered. Test problems widely used in the ALBP literature are used for computational experiments. The results of computational experiments show that the proposed model performs quite well in terms of both total costs and model execution time.

Keywords: Supermarket concept, MMALBP, Part supply, Supermarket location, MILP

1 Introduction

The basic principles of assembly lines (ALs) are based on the production of products by combining parts in a continuous flow-oriented production system. Although the AL was first used for meat packing operations in Cincinnati and Chicago slaughterhouses in the 19th century, significant development of the AL began with the production system designed by Henry Ford and his engineers for the Model-T automobile in Michigan (see., [1-4]). The production time of a Model-T was reduced from 12.5 hours to only 93 minutes through Henry Ford's ALs [3, 4]. The mass and high-volume production in the ALs led to a major manufacturing revolution all over the world.

There are several requirements and constraints for designing the AL. For example, the precedence

Öz

Süpermarket konsepti, son yıllarda seri ve yüksek hacimli üretim sağlayan montaj hatlarının tam zamanlı üretim felsefesine uygun olan özellikle tesis içi parça lojistik sistemleri için popüler hale gelmiştir. Süpermarket yerleşim problemi (SYP) süpermarketlerden montaj istasyonlarına parça tedariki için süpermarketlerin yerini ve sayısını belirleyen problemdir. Montaj hattı dengeleme problemini (MHDP) ve SYP'vi birlikte ele almak tesis planlama adımında önemli bir bakış açısı sunmaktadır. Bu calısma, karısık modelli montaj hattı dengeleme problemini (KMMHDP) ve SYP'yi birlikte çözmek için yeni bir karma tam sayılı doğrusal programlama (KTDP) modeli önermektedir. Amaç, iş istasyonu kurulumu, süpermarket kurulumu ve nakliye toplam maliyetini en aza indirmektir. Önerilen MILP modelinin etkinliğini doğrulamak için KMMHDP'yi ve SYP'yi hem ayrı hem de birlikte çözen iki farklı model yapısı ele alınmaktadır. Hesaplamalı deneyler için MHDP literatüründe yaygın bir şekilde kullanılan test problemleri kullanılmaktadır. Hesaplamalı deneylere göre önerilen matematiksel model maliyet ve model çalışma süreleri açısından başarılı bir performans sergilemiştir.

Anahtar Kelimeler: Süpermarket konsepti, KMMHDP, Parça tedariki, Süpermarket yerleşimi, KTDP

relationships among tasks for the parts to be assembled should be considered. Moreover, the processing times of the tasks to be performed by workers in the stations should be balanced. The problem that basically addresses these requirements is called the assembly line balancing problem (ALBP).

ALs have tremendously evolved from the past to the present. According to the features of the problem, the ALs can be classified such as product diversity (single model, multi/mixed model), the certainty of the task times (deterministic, stochastic), the shape and layout of the line (straight-shaped, U-shaped), and assembly operations' location (one-sided, two-sided, parallel). There are many review papers that address detailed literature reviews of the ALs (see., [5-15]).

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: salih.himmetoglu@hotmail.com (S. Himmetoğlu) Geliş / Received: 26.03.2025 Kabul / Accepted: 25.04.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngumuh.1577703

In addition to mass and high-volume production on ALs, in recent years, the production concept has changed along with Just-In-Time (JIT) and lean manufacturing philosophies. Accordingly, establishing a well-organized in-house part supply logistic system is a major requirement in order to perform the JIT philosophy [16]. The parts must be delivered to the workstations of the AL on time to hinder part insufficiency or accumulation of the parts in the workstations. Accordingly, decentralized in-house logistics areas, called supermarkets, have recently begun to come to the fore. The supermarkets serve as intermediate stores for parts required by nearby AL stations [17]. According to the JIT philosophy, it is aimed that parts are transported in frequent small-volume (amount or lot). The delivery of parts to the supermarkets is carried out by the tow trains/ tuggers consisting of several wagons. The parts demanded by the workstations are filled/loaded from the supermarket into empty bins in the wagons of the tow train. The partsloaded bins transported by tow train are put into part racks of the related workstation manually or through robotic systems. Then, the tow train that collects the empty bins on the part racks returns to the related supermarket. This process consistently continues without anv failure/disruption. This in-logistic part supply system is called the 'supermarket concept'. The supermarket concept is shown in Figure 1.



Figure 1. Supermarket concept for the MMALs

The supermarket concept includes four major problems from long-term strategy to short-term operation [18]. These are locating (locating and number of supermarkets), routing (number of tow trains), scheduling (number of tours), and loading (type and number of part bins) problems [16]. The location planning problem is the most basic problem of the supermarket concept and is called the supermarket location problem (SLP). However, the number of papers considering SLP on the ALs is quite limited. Battini et al. [19] aimed to optimize stocking policies using supermarket warehouses. Accordingly, they proposed a decision-making procedure (DMP) determining the location and number of supermarkets. Emde and Boysen [17] studied the SLP for the mixed-model assembly lines (MMALs). They proposed a mathematical model and an exact dynamic programming (DP) algorithm to optimize the part transportation and supermarket installation costs. Battini et al. [16] discussed in detail the supermarket concept for in-house logistics in the automotive industry. They focused on the basic structure and assumptions of the SLP and its usage in the automotive industry. Alnahhal and Noche [20] considered the SLP for the part feeding with the supermarket concept.

They presented a mathematical model and a real genetic algorithm (GA) considering minimization transportation and inventory fixed costs. Nourmohammadi et al. [21] presented a mathematical model considering the SLP with stochastic part demands. Fathi et al. [22] proposed a simulated annealing (SA) algorithm to minimize shipment and installation costs in the SLP in terms of manufacturing sustainability through JIT-part supply on the ALs. Nourmohammadi et al. [23] presented a mixed-integer programming model that considered the transport vehicle selection problem along with SLP. In addition, they proposed a GA based on a variable neighborhood search (VNS) algorithm for large-sized problem sets.

The SLP, like the ALBP, is a long-term problem to be solved in the facility planning stage. In fact, SLP's solution is directly dependent on line balance in ALs. In order to solve SLP, AL information, i.e., line type, number of stations, cycle time, and line balance (tasks assigned to stations), must be available. Therefore, SLP should be considered with the ALBP.

The first paper that deals with the supermarket concept and ALs together was presented by Nourmohammadi and Eskandari [24]. They proposed a bi-level mathematical model to solve simple ALBP (SALBP) and SLP together. After they minimized the number of workstations in the upper level, they minimized the supermarket transportation and installation costs in the lower level. They utilized the mathematical model proposed by Alnahhal and Noche [20] for the SLP in the lower level. Finally, they used the wellknown test problems in the ALBP literature to evaluate the performance of the proposed model. Nourmohammadi et al. [25] considered the same perspective in Nourmohammadi and Eskandari [24] for the stochastic nature of the task times and demands. Nourmohammadi et al. [26] proposed a cost-based binary linear programming (BLP) model to minimize the total of the workstations and supermarket installation costs. Chen et al. [27] presented a bi-level perspective to solve the ALBP and SLP together. At the upper level, they aimed to solve the number of workstations and workload smoothness. At the lower level, it is aimed to minimize the number of supermarkets corresponding to the number of workstations and workload smoothness in the upper level. Accordingly, they presented both a mathematical model for small-sized problems and a bi-level multi-objective GA for medium-sized and large-sized problems. Zangaro et al. [28] proposed a MILP model and adaptive large neighborhood search (ALNS) algorithm to jointly solve ALBP and SLP in the multi-manned ALs. They aimed to minimize the AL systems by considering supermarket, transportation, assembly operations, and investment costs.

To the best of the author's knowledge, the only study that considered the SLP and the mixed-model assembly line balancing problem (MMALBP) together was presented by Delice et al. [29]. They proposed a mixed-integer nonlinear programming (MINLP) model due to the complexity of the problem. In addition, they improved the SA algorithm based on ant colony optimization (ACO) for large-sized problems.

Defenences	Product	ALBP SLP Problem Mod		Madal	Analy	sis Data		
References	Model	WSC	PSC	SSC	Concept	Model	IA	CE
[17]	Mixed		✓	\checkmark	0	MINLP		\checkmark
[20]	Mixed		\checkmark	\checkmark	0	MILP		\checkmark
[24]	Single	\checkmark	\checkmark	\checkmark	С	MILP		\checkmark
[21]	Single		\checkmark	\checkmark	0	MILP		\checkmark
[26]	Single	\checkmark		\checkmark	S	BLP	\checkmark	\checkmark
[22]	Single		\checkmark	\checkmark	0	MILP		\checkmark
[23]	Single		\checkmark	\checkmark	S	MILP		\checkmark
[25]	Single	\checkmark	\checkmark	\checkmark		MILP	\checkmark	\checkmark
[27]	Single	\checkmark	\checkmark	\checkmark		MILP		\checkmark
[28]	Single	\checkmark	\checkmark	\checkmark		MILP	\checkmark	\checkmark
[29]	Mixed	\checkmark	\checkmark	\checkmark	S	MINLP		\checkmark
This study	Mixed	✓	✓	✓	S	MILP	✓	✓

Table 1. Comparison of available literature on ALBP and SLP

¹SLP with stochastic demand is considered.

²They also consider transport vehicle selection problem.

³Stochastic ALBP and SLP are considered together.

⁴They also consider multi-manned workstations.

They used constraint programming to solve the proposed MINLP model. While the MINLP model can find solutions with high CPU times for small-sized problems, it cannot find solutions for medium and large-sized ones. A comparison of the studies on ALBP and SLP is presented in Table 1.

This study proposes a MILP model to solve MMALBP and SLP simultaneously. To analyze the effectiveness of the proposed model in terms of both cost and solution time, it is compared with two different models. The first model is the hierarchical MILP model that solves MMALP and SLP sequentially, and the second model is the MINLP model proposed by Delice et al. [29], which solves MMALP and SLP simultaneously. In the hierarchical MILP model, after the MMAL is balanced by minimizing the number of workstations in the line, the SLP is solved to minimize the sum of supermarket installation and part supply costs. The MINLP model of Delice et al. [29] and the proposed MILP model simultaneously consider the sum of workstation installation, supermarket installation, and part supply costs. For the three models, computational experiments are carried out using test problems presented by Delice et al. [29].

The remainder of the paper is organized as follows. The problem definition and the proposed mathematical model are presented in Section 2. Computational test results and analyses are presented in Section 3. Finally, concluding remarks and future research subjects are included in Section 4.

2 Problem definition

2.1 Integrated mixed-model assembly line balancing and supermarket location problems

In this study, a straight MMAL layout is focused on. The related AL type is suitable to produce more than one model (m = 1, ..., M). A set of tasks (i = 1, ..., I) is performed for the manufacture of each model. Each task *i* has a certain processing time (t_i) . There are precedence relationships among the tasks (P(r, s)). The processing O: Only SLP is considered.

C: ALBP and SLP are consecutively considered.

S: ALBP and SLP are simultaneously considered.

IA: Industrial application CE: Computational experiment

time t_i of each task *i* may vary for each model *m*. Not every task has to be performed for every model. For example, assume that two different automobile models are produced on the same line. While one automobile model may have a sunroof, the other model may not have a sunroof. Each task is assigned to the workstations ($k = 1, ..., K_{max}$) according to a predetermined cycle time of each model *m* (CT_m). CT_m is valid for all product models. For example, any task that can be assigned to a station by considering any model may not be assigned to the same station for another model due to the CT_m constraint. Classical assumptions for the MMALBPs are given below:

- The processing time t_{mi} of task *i* on model *m* is deterministic and known beforehand.
- The precedence relationships P(r, s) among the tasks for the models are available and known beforehand.
- Cycle time of each model is deterministic and known beforehand.
- The total processing time of the tasks assigned to the workstation *k* cannot exceed the cycle time.
- Each task *i* on model *m* is assigned to only one workstation.
- All tasks must be included in any workstation.

Some tasks do not require parts supply for workstations, while a certain amount of parts supply may be required to perform some tasks. The part supply of these tasks is provided by supermarkets. Each part required for each task i on model m should be delivered to the related workstation k on time. Each workstation demands parts from a supermarket according to the tasks assigned to it. If the tasks assigned to a workstation change, the number of parts needed by the related workstation also changes. In addition, assigning a task to another workstation affects not only the workstation's part demand but also transportation operations. Each tow train in every supermarket has a certain route. The transportation costs are calculated according to this route. An established supermarket increases the installation costs and reduces the

transportation costs. Therefore, transportation and installation costs are important criteria. The assumptions for the SLPs are given below:

- The part supply of each task *i* on model *m* is provided by only one supermarket. That is, if any workstation is established, it is assigned to only one supermarket.
- The number of parts demanded by each task *i* on model *m* is deterministic and known beforehand.
- Each supermarket should serve a group of consecutive workstations [17]. That is, while workstations 1 and 4 can be served by one supermarket, workstations 2 and 3 cannot be served by another supermarket. Otherwise, transportation costs will be adversely affected.
- Each supermarket has its own tow train(s), and it/they cannot be used by other supermarkets.

The general solution structure of the problem is presented in Figure 2.



Figure 2. General solution structure of MMALBP and SLP

2.2 The proposed MILP model

This section defines the proposed MILP model. The notations in the mathematical formulations are presented in Table 2. The proposed MILP model is modified from the MINLP model of Delice et al. [29]. The proposed MILP model is as follows;

$$min TC = WSC + SSC + PSC \tag{1}$$

$$WSC = \sum_{k=1}^{K_{max}} (\lambda \cdot Z_k)$$
(1.1)

$$SSC = \sum_{n=1}^{N_{max}} (\sigma \cdot S_n) \tag{1.2}$$

$$PSC = \sum_{k=1}^{K_{max}} \sum_{l=1}^{K_{max}} \sum_{n=1}^{N_{max}} t d_{kl} TTC_{kln}$$
(1.3)

Table 2. Notations of the mathematical formulations

Notations	Definitions
Indices:	
i, r, s	Task number
k, l, w	Workstation number
т	Model number
n	Supermarket number
Parameter	·s:
Ι	Number of tasks
Kmax	Potential maximum number of workstations
М	Number of models
Nmax	Potential maximum number of supermarkets
P(r,s)	The precedence relationship between the tasks r and s
CT _m	Cycle time of the model m
d_i	The part demand of the task <i>i</i>
tmi	The processing time of the task <i>i</i> for model m
λ	Workstation installation cost
σ	Supermarket installation cost
td_{ν}	Total rectilinear distance from workstation k to workstation
κι	<i>l</i> for a tow train
lx	The x-axis length of the workstations and supermarkets
dx	<i>x</i> -axis distance among the workstations
dv	y-axis distance between workstations and supermarkets
ĹŇ	A large number
Decision v	ariables:
7	(1, if workstation k is installed;
Z_k	(0, otherwise
v	(1, if task <i>i</i> is assigned to workstation <i>k</i> ;
Λ _{ik}	l0, otherwise
S	(1, if supermarket <i>n</i> is installed;
S_n	(0, otherwise
Υ.	$\int 1$, if supermarket <i>n</i> feeds workstation <i>k</i> ;
• kn	(0, otherwise
Rum	$\begin{bmatrix} 1, \text{ if supermarket } n \text{ feeds workstations between } k \text{ and } l; \end{bmatrix}$
кіп	(0, otherwise
V_{ikm}	$\int 1$, if supermarket <i>n</i> feeds task <i>i</i> assigned to workstations <i>k</i> ;
inn	(0, otherwise
TTC_{klm}	The total transportation cost from workstation k to workstation l
D	for supermarket <i>n</i>
D_n	Total part demand supplied by supermarket n

Subject to:

$$Z_k \ge Z_{k+1} \text{ for } \forall k = 1, \dots, K_{max} - 1$$
(2)

$$\sum_{k=1}^{K_{max}} X_{ik} = 1 \text{ for } \forall i = 1, ..., I$$
(3)

$$\sum_{i=1}^{l} t_{mi} \cdot X_{ik} \leq CT_m \cdot Z_k$$
for $\forall k = 1, ..., K_{max}$ and $\forall m = 1, ..., M$

$$(4)$$

$$\sum_{k=1}^{K_{max}} k \cdot (X_{rk} - X_{sk}) \le 0 \text{ for } \forall (r,s) \in P(r,s)$$
(5)

$$\sum_{n=1}^{N_{max}} Y_{kn} = Z_k \text{ for } \forall k = 1, \dots, K_{max}$$
(6)

$$\sum_{k=1}^{K_{max}} Y_{kn} \le LN \cdot S_n \text{ for } \forall n = 1, \dots, N_{max}$$
(7)

$$\sum_{k=1}^{K_{max}} \sum_{l=1}^{K_{max}} R_{kln} = S_n \text{ for } \forall n = 1, \dots, N_{max} \text{ and } k \le l$$
 (8)

$$\sum_{k=1}^{n} \sum_{l=n}^{K_{max}} R_{kln} = S_n \text{ for } \forall n = 1, \dots, N_{max} \text{ and } k \le l$$
 (9)

$$\sum_{l=1}^{k} \sum_{w=k}^{K_{max}} R_{lwn} = Y_{kn} \text{ for } \forall k = 1, \dots, K_{max}, \qquad (10)$$
$$\forall n = 1, \dots, N_{max} \text{ and } l \le w$$

$$X_{ik} + Y_{kn} - V_{ikn} \le 1 \text{ for } \forall i = 1, ..., I,$$

for $\forall k = 1, ..., K_{max} \text{ and } \forall n = 1, ..., N_{max}$ (11)

$$X_{ik} + Y_{kn} - 2 \cdot V_{ikn} \ge 0 \text{ for } \forall i = 1, ..., I,$$

for $\forall k = 1, ..., K_{max} \text{ and } \forall n = 1, ..., N_{max}$ (12)

$$\sum_{i=1}^{I} \sum_{k=1}^{K_{max}} d_i \cdot V_{ikn} = D_n \text{ for } \forall n = 1, \dots, N_{max}$$
(13)

$$TTC_{kln} \le LN \cdot R_{kln} \text{ for } \forall k, l = 1, \dots, K_{max},$$

for $\forall n = 1, \dots, N_{max} \text{ and } k \le l$ (14)

$$TTC_{kln} \le D_n \text{ for } \forall k, l = 1, \dots, K_{max}, \\ \text{for } \forall n = 1, \dots, N_{max} \text{ and } k \le l$$
(15)

$$TTC_{kln} \ge D_n - LN \cdot (1 - R_{kln})$$

for $\forall k, l = 1, ..., K_{max}, \forall n = 1, ..., N_{max} \text{ and } k \le l$ (16)

$$TTC_{kln} \le LN \text{ for } \forall k, l = 1, ..., K_{max},$$

for $\forall n = 1, ..., N_{max} \text{ and } k \le l$ (17)

$$X_{ik}, Y_{kn}, Z_k, S_n, R_{kln}, V_{ikn} \in \{0, 1\}$$

for $\forall i = 1, ..., I, \forall k = 1, ..., K_{max}$ and
 $\forall n = 1, ..., N_{max}$ (18)

$$TTC_{kln}, D_n \ge 0$$

for $\forall k, l = 1, ..., K_{max}$ and $\forall n = 1, ..., N_{max}$ (19)

The objective function (1) consists of the workstation setup cost (WSC), supermarket setup cost (SSC), and part supply cost (PSC). The aim is to minimize the total cost (TC)by considering both MMALP and SLP simultaneously. Constraint (2) ensures that the next workstation is not established before a workstation is established. Although this constraint limits alternative solutions that can be obtained in a shorter time, it is required to reduce part transportation distances in the AL and supermarket layouts. Equation (3) ensures that each task is assigned to only one workstation. The total times of tasks assigned to workstation k cannot exceed the CT_m with constraint (4). Constraint (5) satisfies all precedence relationships in the set of P(r, s). Equation (6) provides that the part supply of each workstation is ensured through only one supermarket. Constraint (7) ensures that for a

supermarket to be established, at least one workstation must be assigned. Equation (8) satisfies that if any supermarket is established, it must have a single path. Equation (9) provides that if any supermarket is installed, it must provide the part supply to the workstation in front of it. Equation (10) guarantees that a tow train must provide the part supply to the workstations on a supermarket's route. Constraints (11) and (12) ensure that supermarket *n* assigned to workstation *k* meets the parts demand(s) of task *i* assigned to the same workstation. Equation (13) calculates the total part demand met by supermarket *n*. Constraints (14) – (17) consider the total part demand of workstations between *k* and *l* assigned to supermarket *n*. Constraints (18) and (19) restrict the decision variables.

The td_{kln} in the objective function (1) is calculated with equation (20).

$$2 \cdot (l-k) \cdot (dx + lx) + 2 \cdot dy = td_{kl}$$

for $\forall k, l = 1, \dots, K_{max}$ and $k \le l$ (20)

3 Computational experiment results and discussions

Two different mathematical formulations that solve MMALBP and SLP sequentially and simultaneously are considered to verify the performance of the proposed MILP model. The first model is the hierarchical MILP model that solves MMALP and SLP sequentially, and the second model is the MINLP model proposed by Delice et al. [29], which solves MMALP and SLP simultaneously.

The hierarchical MILP model has two main steps: line balancing (top level) and in-house part supply (base level). In the hierarchical MILP model, the MMAL is firstly balanced by minimizing the number of workstations in the line, and then the SLP is solved to minimize the sum of supermarket installation and part supply costs. The number of workstations and the assignment of the tasks to workstations, which are the outputs of the MMALBP, are used as input parameters for the SLP in the part supply step. Here, since the tasks assigned to the workstations are determined at the top level, the total part demand of each station is known in advance at the base level. The outputs of the base level are the number of supermarkets and the part supply cost. Finally, the workstation installation cost, the supermarket installation cost, and the part supply cost are added up. The MINLP model of Delice et al. [29] and the proposed MILP model simultaneously consider the sum of workstation installation, supermarket installation, and the part supply costs. While the hierarchical model solves SLP by considering a single line balance for the MMALBP, the MINLP and proposed MILP models consider the total cost more comprehensively by also considering alternative line balances. For the two and three models, computational experiments are carried out using test problems presented by Delice et al. [29]. Three different test problems are utilized: Mansoor, Mitchell, and Heskia. In addition, a case study is performed using two-model assembly line data obtained from a furniture company. The data of the case study are given in Table 3. The test problems are summarized in Table 4. In MMALBP, not all tasks must be performed in each model type. In addition, some tasks may

not need any part demand. In Table 3, for example, Tasks 4, 14, 28, and 30 are not performed in Model-1, and Tasks 5, 10, 19, and 26 are not performed in Model-2. In addition, Tasks 4, 5, 19, 26, 28, and 30 to be performed in the AL do not require any part demand.

Table 3. Data of the case study

Task	Immediate Successor(s)		Task Time	Amount	
number	Model-1	Model-2	Model-1	Model-2	of part demand
1	2	2	23	19	8
2	3, 6	3,4	2	5	2
3	5	7	10	12	2
4		6		9	
5	7		11		
6	7	7	20	16	4
7	8, 9, 10, 11	8, 9, 11, 16	7	4	3
8	16	16	10	10	1
9	21	21	7	3	4
10	16		17		3
11	12	12	15	9	2
12	13	13	15	19	3
13	15	14	19	25	5
14		15		11	4
15	17	17	19	18	6
16	18	18	13	12	1
17	19	20	7	9	1
18	9	9	15	12	3
19	20		10		
20	21	21	15	16	3
21	22, 23, 24	22, 23, 24	20	19	3
22	25	25	15	11	2
23	32	32	16	18	3
24	32	32	14	12	1
25	26	27	15	12	2
26	27		11		
27	29	28	18	23	3
28		29		24	
29	31	30	16	12	9
30		31		8	
31	32	32	6	6	4
32	-	-	8	8	1

Table 4.	Summary	of computational	test problems
----------	---------	------------------	---------------

Problem Name	Task Size	t _{max}	M
Mansoor	11	45	2, 3
Mitchell	21	13	2,3
Heskia	28	108	2, 3
Case study	32	25	2, 3

Two different CTs are considered for each test problem. In addition, two different supermarket installation costs, 500 and 700 units, are taken into account. The workstation installation cost is assumed as 400 units. The workstation and supermarket lengths are assumed as 10 units. Distances among station locations and among supermarket locations are assumed as 1 unit. Distances between stations and supermarket locations are assumed as 1 unit. In summary, 38 different problem tests are taken into account. The hierarchical MILP and the proposed MILP models are coded by the Linear programming in IBM® ILOG® CPLEX® Optimization Studio V12.8.0. On the other hand, the MINLP model is coded by the Constraint Programming in IBM® ILOG® CPLEX® Optimization Studio V12.8.0 due to its nature. A personal computer with 10th Gen Intel® CoreTM i5, 2.3 GHz processor, and 8.00 GB memory is used. The time limit is 3600 seconds.

The computational results are presented in Table 5. The mark * represents the results obtained in the time limit. Appendix A shows that the proposed MILP model performs better than the hierarchical MILP model. The hierarchical MILP model has lower CPU times than the proposed MILP model. The main reason for this is that although the proposed MILP model simultaneously solves the MMALBP and SLP, the hierarchical MILP model consecutively solves them. The simultaneous model structure enlarges the solution space and increases the complexity of the problem. The MINLP and the proposed MILP models find better solutions than the hierarchical MILP model for the variants of the Mansoor problem. In Mitchell, Heskia, and case study problems, the proposed MILP model can find a better solution than the hierarchical MILP model. However, the MINLP model cannot even find solutions for most problem sets within the time limit. It is also seen that the proposed MILP model outperforms the MINLP model in terms of CPU times in general problem sets.

4 Conclusion

Today, manufacturing companies focus not only on improving their production systems but also on in-house part supply logistics, which increases production efficiency. The supermarket concept is preferable for in-house logistics systems in many sectors that adopt the JIT philosophy, such as the automotive industry. Therefore, considering SLP and ALBP, which are long-term decision-making problems, together provides an important perspective in the design stage. In this study, a new MILP model is presented in order to consider MMALBP and SLP together. In order to verify the effectiveness of the proposed model, the test problems generated by Delice et al. [29] are considered. According to the obtained computational results, the proposed model performs quite well.

ALBP and SLP are long-term strategic decision-making problems. To simultaneously optimize both production costs and in-house part supply costs, decision-makers should address them together. Solving these two problems separately may be misleading in terms of costs. For example, even if the production cost of the current assembly line is low, parts supply and supermarket costs may increase. Addressing the cost relationship between ALBP and SLP together will provide significant benefits for decision-makers in the medium and long term.

Table 5. The comparison of the computational results for the SLP + MMALP considering the central warehouse and decentralized supermarket concept (λ =400)

				Hie	eraro	chical I	MILP		MI	NL	P of D	elice et a	ıl. [29]	Th	e pro	oposed	MILP	
				(Li	near	· progr	amming	g)	<u>(C</u>	onst	raint p	orogram	ming)	(Li	near	· progr	amming	g)
Problem	М	СТ	sigma					CPU					CPU					CPU
				K	N	PSC	ТС	time	K	Ν	PSC	TC	time	K	Ν	PSC	ТС	time
								(sec.)					(sec.)					(sec.)
Mansoor	2	48	500	7	4	754	5554	1.19	7	4	688	5488	261.38	7	4	688	5488	12.56
			700	7	3	1436	6336	1.04	7	3	1370	6270	1085.55	7	3	1370	6270	20.29
		62	500	5	4	402	4402	1.03	5	3	754	4254	19.2	5	3	754	4254	2.32
			700	5	3	908	5008	0.93	5	3	754	4854	22.03	5	3	754	4854	3.85
		94	500	3	3	94	2794	1.02	3	3	94	2794	11.68	3	3	94	2794	1.84
			700	3	2	622	3222	1	3	2	622	3222	10.91	3	2	622	3222	1.85
	3	48	500	7	4	798	5598	1.63	7	4	710	5510	669.57	7	4	710	5510	20.58
			700	7	3	1414	6314	1.58	7	4	710	6310	290.79	7	4	710	6310	20.05
		62	500	5	3	864	4364	1.58	5	3	754	4254	19.5	5	3	754	4254	4.64
			700	5	3	864	4964	1.56	5	3	754	4854	23.03	5	3	754	4854	3.42
		94	500	3	3	94	2794	0.86	3	3	94	2794	12.69	3	3	94	2794	1.75
			700	3	2	622	3222	0.84	3	2	622	3222	16.85	3	2	622	3222	1.59
Mitchell	2	14	500	17	7	2832	13132	1.32	17	8	2194	12994	7200*	17	8	2084	12884	4971.45
			700	17	7	2832	14532	1.23	18	7	2964	15064	7200*	17	7	2810	14510	4490.09
		21	500	9	7	764	7864	1.33	9	7	588	7688	7200*	9	7	588	7688	4369.21
			700	9	5	1798	8898	1.27	9	5	1622	8722	7200*	9	5	1622	8722	7200*
		26	500	7	6	456	6256	1	-	-	-	-	-	7	6	390	6190	399.73
			700	7	5	962	7262	0.95	-	-	-	-	-	7	5	896	7196	516.52
	3	14	500	18	9	2194	13894	2.01	19	8	2612	14212	7200*	18	8	2392	13592	5205.23
			700	18	7	3426	15526	1.94	-	-	-	-	-	18	7	2964	15064	4325.32
		21	500	9	8	324	7924	1.58	-	-	_	-	-	9	7	742	7842	4216.36
			700	9	5	1864	8964	1.6	-	-	_	-	-	9	5	1842	8942	3612.27
		26	500	8	6	808	7008	1.07	-	_	_	-	-	8	6	698	6898	2948.85
		-0	700	8	5	1490	8190	1.01	-	_	_	-	-	8	5	1314	8014	7200*
Heskia	2	138	500	12	10	1112	10912	1.56	-	-	-	-	_	12	10	738	10538	7200*
	_		700	12	7	2696	12396	1.48	_	_	_	_	-	12	7	2498	12198	7200*
		216	500	8	8	298	7498	1.05	-	_	_	_	_	8	7	496	7196	7200*
		-10	700	8	7	980	9080	1.07	-	_	_	_	_	8	6	1046	8446	7200*
		256	500	6	6	298	5698	2.76	-	_	_	_	_	6	6	298	5698	7200*
		200	700	6	6	298	6898	2.76	_	_	_	_	_	6	6	298	6898	7200*
	3	138	500	15	9	2696	13196	2.74	_	_	_	_	_	15	11	1266	12766	7200*
	5	150	700	15	8	3246	1/8/6	2.07		_	_		_	15	8	2872	14472	7200*
		216	500	8	8	208	7/08	2.07	-	-	-	-	-	8	7	672	7372	7200*
		210	700	8	7	290	7490 8070	1.71	-	-	-	-	-	0 0	6	1310	8710	7200*
		256	500	0 7	7	200	6509	1.07	-	-	-	-	-	07	6	594	6294	7200*
		230	700	7	7	270 200	7009	1.11	-	-	-	-	-	7	6	J04 594	7594	7200*
Case	2	26	500	/	6	290	0702	1.00	-	-	-	-	-	/	6	J04 1014	0614	7200*
Case	2	30	300	12	0	1992	9/92	1.04	-	-	-	-	-	12	0	1814	9014 10014	7200*
stuay			/00	- 12	6	1992	10992	1./3	-	-	-	-	-	12	6	1814	10814	/200*

Different limitations can be considered when applying this model in real-life applications. One of these is the zone/area constraints for the locations of supermarkets and stations. The areas, where supermarkets and stations will be placed, can be limited according to the area and size of the facility. In addition, determining supermarket locations in u-type, two-sided, and parallel ALs can be more complex. The mathematical models proposed for these AL layouts can be developed for future studies. Another limitation is the size of the problem. As the size of the problem increases, the mathematical model may be unable to find a solution. Due to the NP-hard nature of the ALBPs, metaheuristic algorithms should be used for large-sized problems. Another issue to be addressed may be the variability of task durations. Accordingly, models addressing stochastic processes, fuzzy logic, gray number theory, or robust optimization can be developed for task processing times with a statistical distribution or a certain range.

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Similarity rate (Ithenticate): %14

References

[1] M. Walsh, The rise of the Midwestern meat packing industry. University Press of Kentucky, 2014.

- [2] S. C. Gordon, From slaughterhouse to soap-boiler: Cincinnati's meat packing industry, changing technologies, and the rise of mass production, 1825-1870, IA. The Journal of the Society for Industrial Archeology, 55-67, 1990. https://www.jstor.org/stable/40968184.
- [3] J. M. Wilson, Henry Ford's just-in-time system. International Journal of Operations & Production Management, 15.12: 59-75, 1995. https://doi.org/10.1108/01443579510104501.
- [4] A. Royston, Henry Ford and the assembly line. The Rosen Publishing Group, Inc, 2015.
- [5] I. Baybars, A survey of exact algorithm for the simple assembly line balancing problem. Management Science, 32, 909-932, 1986. https://doi.org/10.1287/mnsc.32.8.909.
- [6] S. Ghosh and R.J. Gagnon, A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems. International Journal of Production Research, 27, 637-670, 1989. https://doi.org/10.1080/00207548908942574.
- [7] E. Erel and S.C. Sarin, A survey of the assembly line balancing procedures. Production Planning and Control, 9 (5), 414-434, 1998. https://doi.org/10.1080/095372898233902.
- [8] C. Becker and A. Scholl, A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. European Journal of Operational Research, 168(3), 694-715, 2006. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.023.

[9] A. Scholl and C. Becker, State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. European Journal of Operational Research, 168 (3), 666-693, 2006. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.022.

- [10] N. Boysen, M. Fliedner and A. Scholl, A classification of assembly line balancing problems. European Journal of Operational Research, 183, 674693, 2007. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.10.010.
- [11]O. Battaïa and A. Dolgui, A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches. International Journal of Production Economics, 142 (2), 259-277, 2013. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.10.020.
- [12] M. M. Razali, N. H. Kamarudin, M. F. F. A. Rashid and A. N. M. Rose, Recent trend in mixed-model assembly line balancing optimization using soft computing approaches. Engineering Computations, 36(2), 622-645, 2019. https://doi.org/10.1108/EC-05-2018-0205.
- [13] M. Eghtesadifard, M. Khalifeh and M. Khorram, A systematic review of research themes and hot topics in assembly line balancing through the web of science within 1990–2017. Computers and Industrial Engineering, 139, 106182, 2020. https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106182.
- [14] Y. L. Jiao, H. Q. Jin, X. C. Xing, M. J. Li and X. R. Liu, Assembly line balance research methods, literature and development review. Concurrent Engineering,

29(2), 183-194, 2021. https://doi.org/10.1177/1063293X20987910.

[15] N. Boysen, P. Schulze and A. Scholl, Assembly line balancing: What happened in the last fifteen years? European Journal of Operational Research, 301(3), 797-814, 2021.

https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.11.043.

- [16] D. Battini, N. Boysen and S. Emde, Just-in-Time supermarkets for part supply in the automobile industry. Journal of Management Control, 24(2), 209-217, 2013. https://doi.org/10.1007/s00187-012-0154-y.
- [17] S. Emde and N. Boysen, Optimally locating in-house logistics areas to facilitate JIT-supply of mixed-model assembly lines. International Journal of Production Economics, 135(1), 393-402, 2012. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.07.022.
- [18] S. Emde and N. Boysen, Optimally routing and scheduling tow trains for JIT-supply of mixed-model assembly lines. European Journal of Operational Research, 217(2), 287-299, 2012. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.09.013.
- [19] D. Battini, M. Faccio, A. Persona and F. Sgarbossa, Supermarket warehouses: stocking policies optimization in an assembly-to-order environment. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 50(5), 775-788, 2010. https://doi.org/10.1007/s00170-010-2555-0.
- [20] M. Alnahhal and B. Noche, A genetic algorithm for supermarket location problem. Assembly Automation, 35(1), 122-127, 2015. https://doi.org/10.1108/AA-02-2014-018.
- [21] A. Nourmohammadi, H. Eskandari, M. Fathi and M. Aghdasi, A mathematical model for supermarket location problem with stochastic station demands, Procedia CIRP, 72, 444-449, 2018.
- [22] M. Fathi, A. Nourmohammadi, M. Ghobakhloo and M. Yousefi, Production sustainability via supermarket location optimization in assembly lines. Sustainability, 12(11), 4728, 2020. https://doi.org/10.3390/su12114728.
- [23] A. Nourmohammadi, H. Eskandari, M. Fathi, M. and A. H. Ng, Integrated locating in-house logistics areas and transport vehicles selection problem in assembly lines. International Journal of Production Research, 59(2), 598-616, 2021. https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1701207.
- [24] A. Nourmohammadi and H. Eskandari, Assembly line design considering line balancing and part feeding. Assembly Automation, 37(1), 135-143, 2017. https://doi.org/10.1108/AA-09-2016-122.
- [25] A. Nourmohammadi, H. Eskandari and M. Fathi, Design of stochastic assembly lines considering line balancing and part feeding with supermarkets. Engineering Optimization, 51(1), 63-83, 2019. https://doi.org/10.1080/0305215X.2018.1439944.
- [26] A. Nourmohammadi, H. Eskandari, M. Fathi and M. R. Bourani, An integrated model for cost-oriented assembly line balancing and parts feeding with

supermarkets. Procedia CIRP, 72, 381-385, 2018. https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.255.

- [27] J. Chen, X. Jia and Q. He, A novel bi-level multiobjective genetic algorithm for integrated assembly line balancing and part feeding problem. International Journal of Production Research, 61(2), 580-603, 2023. https://doi.org/10.1080/00207543.2021.2011464.
- [28] F. Zangaro, S. Minner and D. Battini, The multimanned joint assembly line balancing and feeding problem. International Journal of Production Research,

61(16), 5543-5565, 2023. https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2103749.

[29] Y. Delice, E. K. Aydoğan, S. Himmetoğlu and U. Özcan, Integrated mixed-model assembly line balancing and parts feeding with supermarkets. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 41, 1-18, 2023. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.12.002



NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 760-774



Niğde Ömer Halisdemir Üni**ver**sitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araștırma makalesi / Research article

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



Jeodezik ağlarda matematiksel model seçiminin dengeleme sonuçlarına etkisi

Effect of mathematical model selection on adjustment results in geodetic networks

Nihal Tekin Ünlütürk^{1*}¹⁰, Uğur Doğan²

¹Erciyes Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 38030, Kayseri, Türkiye ²Yıldız Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, İstanbul, Türkiye

Öz

Bu araştırmanın temel amacı, jeodezik ağlarda farklı matematiksel modellerin kullanımının dengeleme sonuçları üzerindeki etkilerini incelemektir. Bu kapsamda, 13 noktalı, doğrultu ve kenar ölçüleri gerçekleştirilmiş bir yatay kontrol ağı kullanılmıştır. Analizlerde, kenardoğrultu, yalnızca doğrultu ve yalnızca kenar ölçüleri olmak üzere üç farklı ölçü grubu tanımlanmış ve serbest ile dayalı ağ dengeleme yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Çalışmanın bulguları, tüm ölçü grupları için fazla ölçü paylarını, ölçülerde tespit edilebilen hata sınır değerlerini, belirlenemeyen kaba hataların diğer ölçüler üzerindeki etkisini ve nokta konum hatalarıyla hata ve güven elipslerini kapsamlı bir sekilde ortaya koymustur. Elde edilen sonuçlar, jeodezik ağların güvenilirliğinin belirlenmesinde matematiksel (fonksivonel ve stokastik) model seçiminin kritik bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Jeodezik ağlar, Dengeleme yöntemleri, Matematiksel model, Güvenilirlik

1 Giriş

Kullanım amaçlarına uygun olarak tasarlanan jeodezik ağların, önceden belirlenen güvenilirlik ve duyarlılık kriterlerini karşılaması gerekmektedir. Bu kriterlere ulaşabilmek için, hiçbir datum parametresi (dış parametre) sabit kabul edilmeden, ölçülerdeki düzeltmelerini ve koordinat bilinmeyenlerini en aza indiren "En Küçük Kareler Yöntemi" uygulanmaktadır. Bu yöntem, ölçü farklarının kareleri toplamını minimize ederek ağın doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmayı amaçlamaktadır [1-4]. Ancak dolaylı ölçülerde, jeodezik ağların dış parametrelerinin tamamının belirlenmesi mümkün olmayabilir. Örneğin; nivelman ağlarında 1 dış parametre (yükseklik), nirengi ağlarında 4 dış parametre (iki öteleme, bir ölçek, bir dönüklük), üç boyutlu jeodezik ağlarda ise 7 (üç öteleme, üç dönüklük, bir ölçek) dış parametre bulunmaktadır. Bu parametrelerin önceden belirlenmesi durumunda, dayalı dengeleme yöntemi kullanılmaktadır. Ancak, bu parametrelerin hatasız olduğu varsayımı doğru olmadığından, hatalar dengeleme sonuçlarına yansıyabilir. Bu sorunun önüne geçebilmek için, ağın dış parametreleri de

Abstract

The main objective of this study is to explore the impact of various mathematical models on adjustment outcomes in geodetic networks. This was accomplished by using a horizontal control network with 13 stations that included distance and direction measurements. The analyses classified and examined three distinct measurement groups: distance and direction, direction only, and distance only, using free and constrained adjustment approaches. The study's findings provide a comprehensive evaluation of redundancy values for each measurement group, threshold values for detecting measurement errors, the influence of undetected gross errors on other observations, position errors, error ellipses, and confidence ellipses. The results highlight that choosing an appropriate mathematical model, including both functional and stochastic components, is a key factor in ensuring the reliability of geodetic networks.

Keywords: Geodetic networks, Adjustment methods, Mathematical model, Reliability

bilinmeyenler arasına eklenerek, klasik dayalı dengeleme yerine serbest ağ dengelemesi yöntemi uygulanmaktadır [5].

Jeodezik ağların duyarlılık ve güvenilirlik açısından değerlendirilmesine yönelik ilk araştırmalar, Baarda (1968) [6] ve Pope (1976) [7] tarafından uyuşumsuz ölçülerin analizi üzerine yapılmıştır [8,9]. Daha sonraki çalışmalarda, Öztürk [10,11], model hatalarının güvenirlik kriterleriyle değerlendirilmesi, kaba hataların tespitinin yapılması ve uyuşumsuz ölçülerin incelenmesi konularını ele almıştır. Kaba hatalar, ölçü sırasında yapılan belirgin hatalar olup ayıklanabilirken; uyuşumsuz ölçüler, model veya veri ile tutarsızlık gösteren, her zaman kaba hata içermeyen ölçülerdir. Çalışmada bu iki kavram birbirinden ayrılarak ele alınmış ve jeodezik ağların kalitesini belirlemek için duyarlılık ölçütlerinin önemine dikkat çekilmiştir. Papo [12], ağ geometrisinin noktaların konum doğruluğu üzerindeki etkisini inceleyerek, hata ile güven elipsoidi elemanlarının yönü ve büyüklüğünün noktalar arasındaki mesafeye bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Avrıca. serbest ağ dengelemesinde konum doğruluğunun, referans (datum) noktalarının ağ içerisindeki dağılımıyla doğrudan ilişkili olduğunu vurgulamıştır.

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: nihaltekin@erciyes.edu.tr (N. Tekin Ünlütürk) Geliş / Received: 28.02.2025 Kabul / Accepted: 27.03.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngumuh.1648138

Bu bağlamda çalışmada, jeodezik ağlarda farklı matematiksel modellerin dengeleme sonuçları üzerindeki etkileri incelenmiş ve seçilen modelin duyarlılık analizine katkısı değerlendirilmiştir. Dolayısıyla çalışmanın temel amacı, jeodezik ağlar için seçilen fonksiyonel ve stokastik modelin duyarlılık ölçütlerine etkilerini belirlemektir. Ayrıca, bu analizler sonucunda duyarlılık ölçütlerinin farklı parametrelere göre nasıl değiştiği ortaya konulmuştur.

2 Materyal ve metot

2.1 Jeodezik ağ ve veri seti

Çalışmanın amacı, farklı dengeleme yöntemlerinin 2boyutlu jeodezik ağın doğruluğu ve güvenilirliği üzerindeki etkilerini karşılaştırılması sonucu en uygun yöntemin belirlenmesidir. Kullanılan jeodezik ağ, kenar-doğrultu ölçüleri, yalnızca doğrultu ölçüleri (kısa oklar) ya da yalnızca kenar ölçülerini (kısa çizgiler) içermektedir. Şekil 1, çalışma kapsamında kullanılan jeodezik ağ ve noktalarını göstermektedir.



Şekil 1. Jeodezik ağ

Analizlerin tutarlı bir referans sisteminde gerçekleştirilmesi amacıyla veriler 3° dilim genişlikli Gauss-Krüger projeksiyon sistemine dönüştürülmüştür. Bu sistemde, Y_G (sağa) değeri 500.000 çıkarılarak hesaplanmış, X_G (yukarı) değeri ise kuzey yönlü mesafeyi temsil edecek şekilde belirlenmiştir. Toplam 83 ölçünün ilk 54 tanesi doğrultu ölçüsü, 55-83 arasındaki ölçüler ise kenar ölçüsü olup, bu indirgeme işlemi yatay konum hatalarının minimize edilmesi ve jeodezik hesaplamaların ortak bir koordinat sisteminde gerçekleştirilmesi için tercih edilmiştir.

Kullanılan fonksiyonel ve stokastik modelin elde edilen sonuçlara etkisini karşılaştırmak amacıyla dört farklı dengeleme yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemler;

- I nolu yöntem: *Tüm iz minimum*
- II nolu yöntem: Kısmi iz minimum
- III nolu yöntem: Zorlamasız klasik dengeleme
- IV nolu yöntem: Dayalı dengeleme

olup ağın hata dağılımı ve güvenilirliği açısından en uygun modelleme stratejisini belirlemek için seçilmiştir. Tüm doğrultular için aynı doğrultu standart sapması σ_r kullanıldığı için, doğrultu ölçülerinin ağırlıkları 1 olarak kabul edilmiştir. Ağırlıklar, ölçülerin duyarlılığı ile ters orantılı olup, kenar ölçülerinin ağırlıkları alet duyarlılığına bağlı olarak 5 mm + 2 ppm şeklinde hesaplanmıştır. Bu hesaplama yaklaşımı, stokastik modelin oluşturulmasında temel alınmıştır. Ayrıca, I nolu yöntemde kenar-doğrultu ağında stokastik modelin duyarlılık kriterleri üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla birim matris kullanılmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, redündans değerleri ile iç ve dış güvenilirlik kriterleri analiz edilmiştir.

2.2 Jeodezik ölçülerin analizi

Jeodezik hesaplamalarda doğrudan ölçülemeyen büyüklükler, dolaylı ölçüler ile belirlenmektedir. Eğer ölçü sayısı bilinmeyenlerden fazlaysa, *En Küçük Kareler Yöntemi* kullanılarak bilinmeyenlerin en uygun değerleri hesaplanmaktadır. Bu süreçte, noktaların koordinatları (x, y), doğrultu ve uzunluk ölçüleri kullanılarak dolaylı olarak belirlenmekte, sistematik hatalar minimize edilmekte ve güvenilir sonuçlar elde edilmektedir.

Jeodezik ağların dengeleme süreci, matematiksel modellere dayanmakta olup, ölçüler n boyutlu rassal bir vektörün gerçekleşmiş değerleri olarak değerlendirilmektedir. Bu vektörün n boyutlu normal dağılım gösterdiği varsayılmaktadır. Ölçülerin dengelemesinde kullanılan matematiksel model iki temel bileşenden oluşmaktadır: fonksiyonel model ve stokastik model [13].

Jeodezik ağları dengeleme işlemlerinde fonksiyonel model, ölçüler ile bilinmeyen değişkenler arasındaki matematiksel bağıntıları tanımlamaktadır. Bu model, ölçülerin geometrik ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak şekillenmekte olup, genellikle doğrusal olmayan yapıda olduğu için Taylor açılımı ile doğrusal forma getirilmektedir.

$$l + v = Ax \tag{1}$$

Denklem (1)'de, ölçülere uygulanacak düzeltmeleri içeren v vektörü, kesin değerleri elde etmek amacıyla ölçülere getirilecek düzeltmeleri ifade etmektedir. l, küçültülmüş ölçüler vektörü olarak tanımlanırken, Adüzeltme denklemlerine ait katsayılar matrisini, x ise bilinmeyenler vektörünü ifade etmekte olup, fonsiyonel modelin temel bileşenlerini oluşturmaktadır.

Matematiksel modelin ikinci bileşeni olan stokastik model, ölçülerin fiziksel olarak modellenemeyen bilesenlerini, bağımlılıklarını ve duyarlılıklarını tanımlamaktadır. Ölçülerin hata yapısını ve güvenilirliğini belirleyen bu model, varyans-kovaryans matrisi ile ifade edilir ve hata bileşenlerinin etkisini en aza indirerek ölçülerin güvenilirliğini artırmada kritik bir rol oynar. [13,14]. Stokastik modelin temel bileşeni olan ağırlık matrisi P, ölçülerin doğruluk seviyelerini ve hata bileşenlerini yönetmektedir. Fonksiyonel ve stokastik modeller birlikte kullanılarak, sistemin genel matematiksel modeli olusturulmaktadır.

Dengeleme işlemi, ölçü düzeltmelerinin ağırlıklı toplamının minimum olması ($v^T P v = min$) koşulu altında gerçekleştirilmektedir. Bu optimizasyon prensibi doğrultusunda normal denklemler oluşturularak bilinmeyenler kestirilmektedir.

$$Nx - n = 0$$

$$x = N^{-1}n = Q_{xx}n$$
 (2)

Denklem (2)'de:

 $N = A^T P A$: Normal denklem katsayılar matrisi,

 $n = A^T P l$: Yalın terim vektörü ve

 $Q_{xx} = N^{-1}$: Bilinmeyenlere ilişkin kofaktör matrisidir.

Bu eşitliklerde, *P* ağırlık matrisini ifade etmektedir. Bu denklemler, jeodezik ağlarda dolaylı ölçüler dengelemesini gerçekleştirmek için kullanılan temel matematiksel ifadeleri sunmaktadır. Yöntemin hassasiyeti, ölçülerin ağırlıkları, ağın geometrik yapısı ve ölçü duyarlılığı ile doğrudan ilişkilidir.

2.3 Serbest ağ dengelemesi

Serbest ağlar, belirli bir koordinat sistemine doğrudan bağlı olmayan ve ölçülerden bağımsız olarak konumları belirlenemeyen jeodezik ağlardır [1,15-17]. Serbest ağ dengelemesi, minimum maliyetle yeterli doğruluğun sağlanması amacıyla optimizasyon süreçlerini içerir. Bu süreçte, nokta yerleri belirlenir, ölçü doğrulukları analiz edilir ve Gauss-Markoff modeli kullanılarak ağın duyarlılık ve güvenilirlik değerlendirmesi yapılır [18]. Yatay kontrol ağları genellikle sabit ve yöneltme noktalarından oluşur; sabit noktalar referans olarak kullanılırken, yöneltme noktaları ağın yöneltilmesi için tesis edilir, ancak günümüzde pek tercih edilmemektedir. Ağın geometrik yapısı, ölçülerin güvenilirliğini artıracak şekilde planlanmalı ve kaba ölçü hatalarına karşı duyarlı olmalıdır [19]. Sabit noktalardan uzaklaştıkça nokta konum hataları artmakta ve doğruluk seviyesi değişmektedir. Bu nedenle, serbest ağlarda datum seçimi önemli bir unsurdur.

Serbest ağlarda, ağdaki tüm noktalar bilinmeyen kabul edildiğinden normal denklem katsayılar matrisi tekillik göstermektedir. Determinantı sıfır olan bu matrisin rank bozukluğu (defekt sayısı), serbest ağ dengelemesine ait serbest datum parametrelerinin (d) sayısına eşittir. Eğer bilinmeyenlerin sayısı u ile ifade edilirse, normal denklemler katsayılar matrisinin rankı Denklem (3)'te gösterilmiştir.

$$rank(N) = u - d \tag{3}$$

Serbest ağ dengelemesinde oluşan rank bozukluğunu giderebilmek için farklı dengeleme yöntemleri uygulanmaktadır. Bu yöntemler;

- 1. Zorlamasız klasik dengeleme
- 2. Tüm iz minimum yöntemi ile dengeleme
- 3. Kısmi iz minimum yöntemi ile dengeleme

Bu yöntemler, *S* dönüşümü kullanılarak birbirlerine dönüştürülebilir ve farklı modelleme yaklaşımlarına uygun hale getirilebilir. Serbest ağ dengelemesi, jeodezik hesaplamalarda model hassasiyetini artırmak ve ölçü hatalarını minimize etmek için önemli bir yaklaşımdır [1,20]. Bu çerçevede dengeleme yöntemlerini ele almak gerekirse:

1. Zorlamasız Klasik Dengeleme: Normal denklem katsayılar matrisi tam sıralı olduğunda, yani determinantı sıfırdan farklı olduğunda uygulanan bir dengeleme tekniğidir. Bu koşul sağlandığında, dengeleme işlemi ek bir datum kısıtlamasına ihtiyaç duymadan gerçekleştirilebilir. Bu yöntemde, tüm noktalar bilinmeyen kabul edilmektedir. Oluşturulan düzeltme denklemlerinde tüm noktaların bilinmeyen olduğu katsayılar matrisi A_g 'den, defekt sayısı kadar sütunun çıkarılması veya belirli koordinat bilinmeyenlerinin sabit kabul edilmesiyle rank bozukluğu giderilmektedir. Böylece, normal denklem katsayılar matrisi, $N = A^T P A$ ifadesiyle determinantı sıfırdan farklı olan regüler bir matrise dönüştürülür [21].

2. Tüm İz Minimum Yöntemi ile Dengeleme: Bu yöntem, jeodezik ağda tüm noktaların bilinmeyen olarak tanımlanmasını ve ağın datum tanımına katkıda bulunmasını sağlayarak, ölçü duyarlılığını artırmaya yönelik bir yaklaşım sunmaktadır. Yöntemin temel prensibi, tüm noktaları içeren küçültülmüş koordinat bilinmeyenleri ile ağırlık katsayıları matrisinin (kofaktör) izinin en küçük değere ulaşmasını sağlamaktır. Analizlerde, doğrusal fonksiyonel model; düzeltme denklemleri ile koordinat bilinmeyenleri arasındaki ilişkileri tanımlayan koşul denklemlerinden oluşmaktadır.

$$v = A_g x_g - l$$

$$G^T x_g = 0$$
(4)

Denklem (4)'te x_g , koordinat bilinmeyenleri vektörünü ve ağın tüm noktalarını ifade etmektedir. Bu yöntemde ağın datumu, G^T matrisi ile tanımlanmakta ve tüm noktalar datum tanımına dahil edilmektedir. Bu yöntemin çözümü için, ağırlık katsayıları matrisi Q_g normal denklem katsayılar matrisi $N_g = A_g^T P A_g$ üzerinden Denklem (5)'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$Q_g = (N_g + G^T G)^{-1} - G^T (G^T G G^T G)^{-1} G$$
(5)

Elde edilen Q_g kullanılarak koordinat bilinmeyenleri vektörü Denklem (6)'da gösterildiği gibi hesaplanır:

$$x_g = Q_g A_g^T P l \tag{6}$$

Bu yöntemin temel avantajlarından biri, bilinmeyen koordinatların tamamının hata dağılımına eşit şekilde dahil edilmesidir. Özellikle deformasyon analizlerinde güvenilir sonuçların elde edilmesi için önemli bir yaklaşımdır. Bu yöntemde, koordinat bilinmeyenlerinin normu ve ağırlık katsayıları matrisinin izi minimize edilmektedir:

$$iz(Q_g) = min, x_g^T x_g = min \tag{7}$$

Bu özellik sayesinde, toplam koordinat varyanslarının toplamı en küçük değeri almakta ve nokta konum hataları homojen şekilde dağılmaktadır (Denklem 7).

Sonuç olarak, tüm iz minimum yöntemi, bilinmeyen koordinatlar için hata dağılımını homojen hale getiren ve ölçü doğruluğu üzerinde dış etkileri azaltan etkili bir dengeleme yöntemidir.

3. Kısmi İz Minimum Yöntemi ile Dengeleme: Bu dengeleme yöntemi, jeodezik ağdaki tüm noktaların koordinat bilinmeyenlerinin yalnızca bir kısmının datum tanımına katkıda bulunmasını sağlayan bir dengeleme yöntemidir [1]. Bu yöntemde, koordinat bilinmeyenlerinin normu ve ağırlık katsayıları matrisinin ilgili alt matrisinin izi minimize edilmektedir. Böylece, ağın yalnızca belirli noktalarının datum tanımına dahil edilmesiyle, diğer noktalar bağımsız bir şekilde modellenmektedir. Tüm iz minimum yönteminde ağın tamamı datum tanımına dahil edilirken, kısmi iz minimum yönteminde belirli noktalar bu tanıma dahil edilmemektedir. Bu fark, dengeleme sürecinde doğrusallastırılmış fonksiyonel kullanılan modelin yapılandırılmasını değiştirmektedir. Doğrusallaştırılmış model, tüm noktalara ait koordinat bilinmeyenlerini içeren G matrisinden dönüştürülen B matrisinin kullanımıyla oluşturulmaktadır. Bu durumda, datum tanımlamayan noktalar için denklemler sıfır kabul edilerek model sadeleştirilmektedir. Dengeleme modelinde kullanılan temel eşitlikler Denklem (8) ve Denklem (9)'da gösterilmiştir.

$$v = A_g x_i - l$$

$$B_i^T x_i = 0$$
(8)

$$Q_{i} = (N_{g} + B_{i}B_{i}^{T})^{-1} - G(G^{T}B_{i}B_{i}^{T}G)^{-1}G^{T}$$

$$x_{i} = Q_{i}A_{g}^{T}Pl$$
(9)

2.4 Hata ve güven elipsleri

Hata ve güven elipsleri, jeodezik ölçülerde doğruluğun ve güvenilirliğin görsel olarak değerlendirilmesini sağlayan önemli araçlardır (Şekil 2). Hata elipsi, ölçülerin olası hata aralığını iki boyutlu bir düzlemde gösterirken, güven elipsi bu hataların belirli bir güven aralığında meydana gelme olasılığını ifade etmektedir.



Şekil 2. Hata ve güven elipsi [22]

Hata elipsinin dönüklük açısı θ , Denklem (10)'daki gibi

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2Q_{xy}}{Q_{xx} - Q_{yy}}\right) \tag{10}$$

hesaplanmaktadır. Burada, Q_{xx} , Q_{xy} ve Q_{yy} bir noktanın koordinat bileşenlerine ilişkin kofaktör değerleridir. Elipsin eksen uzunluklarını belirlemek için kullanılan büyüklük Wolup, Denklem (11)'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$W = \sqrt{(Q_{xx} - Q_{yy})^2 + 4Q_{xy}^2}$$
(11)

 Q_{xx} matrisinin öz değerleri, Denklem (12)'deki gibi,

$$\lambda_{1} = \frac{Q_{xx} + Q_{yy} + W}{2}$$

$$\lambda_{2} = \frac{Q_{xx} + Q_{yy} - W}{2}$$
(12)

 $s_0 = \sqrt{[Pvv]/f}$ birim ağırlıklı ölçünün standart sapması ise [Pvv] düzeltmelerin ağırlıklı kareleri toplamı ve *f* serbestlik derecesi kullanılarak belirlenir.

$$A = s_0 \sqrt{\lambda_1}, \qquad B = s_0 \sqrt{\lambda_2} \tag{13}$$

Hata elipsinin eksenleri A ve B olarak belirlenirken (Denklem 13), güven elipsinin eksenleri a ve b ise bu değerlere bağlı olarak hesaplanmaktadır.

Güven elipsi, hata elipsinin yarı eksenlerinin anlamlılık düzeyine (α) bağlı olarak yeniden boyutlandırılmasıyla elde edilmektedir. Genellikle $\alpha = 0.05$ veya $\alpha = 0.01$ gibi değerler kullanılmaktadır. Güven elipsinin yarı eksenleri Denklem (14)'teki gibi hesaplanır:

$$a = \gamma A$$
, $b = \gamma B$, $\gamma = \sqrt{F_{2,f,1-\alpha}}$ (14)

Burada, $F_{2,f,1-\alpha}$, F dağılımının belirlenen anlamlılık düzeyi ve serbestlik derecesine bağlı olarak güven sınırını temsil etmektedir. Bu sınır, istatistiksel olarak hipotez testlerinde hata olasılığını kontrol etmek ve güvenilir sonuçlar elde etmek amacıyla kullanılmaktadır. Üç boyutlu ağlarda bu formülde yer alan 2 yerine 3 değeri kullanılmaktadır. Güven elipsleri, ölçü sonuçlarının belirli bir güven aralığında ne kadar güvenilir olduğunu göstermektedir. Bu sayede, jeodezik ağların doğruluğu ve hassasiyeti hakkında daha net bir fikir elde edilmektedir.

2.5 Güvenilirlik ölçütü

Güvenilirlik ölçütü, jeodezik ağlarda ölçü hatalarının denetlenebilirliğini belirleyen önemli bir parametredir. Bu ölçüt, özellikle kaba hataların tespit edilmesine olanak sağlamakta ve bir ölçünün ne kadar kontrol edilebilir olduğunu ortaya koymaktadır. Jeodezik ağ içerisinde, *n* sayıda ölçü için aynı sayıda güvenilirlik ölçütü hesaplanmaktadır (Denklem 15).

$$iz(Q_{vv}P) = iz(E) - iz(\bar{Q}P) = n - u + d = r$$
(15)

Fazla ölçü payları r_i Denklem (16)'da gösterildiği gibi hesaplanır.

$$(Q_{vv}P) = Q_{vv}P_i = 1 - \bar{Q}_{ii}P_i = r_i = n - u + d$$
(16)

Burada *r*, fazla ölçü sayısını (kısmi redündans payı) veya serbestlik derecesini, Q_{vv} düzeltmelerin kofaktör matrisini, $\bar{Q}_{ii} = (AQ_g A^T)_{ii}$ dengeli *i* ölçüsüne ilişkin kofaktör değerini göstermektedir.

Redündans payı, bir ölçünün hatalarının ne ölçüde denetlenebileceğini belirlemektedir. Eğer r_i sıfıra eşit veya çok küçükse, ilgili ölçünün hatası düzeltmelere

yansımamakta ve hata doğrudan ortaya çıkarılamamaktadır. Bu durumda, ölçü güvenilir olmaktan çıkmaktadır. Genel olarak, $r_i < 0.10$ olan ölçüler zayıf kontrollü, $r_i > 0.30$ olanlar ise iyi kontrol edilen ölçülerdir. Fazla ölçü paylarının dengeli ve yüksek olması ideal kabul edilmektedir.

Ayrıca öngörülen test gücüne bağlı olarak hangi büyüklükteki ölçü hatalarının tespit edilebileceği, iç güvenilirlik ölçütüyle değerlendirilirken; tespit edilemeyen hataların dengeleme sonuçlarına olan etkileri dış güvenilirlik ölçütü ile belirlenmektedir. Tüm ölçülerin eşit düzeyde kontrol edilebilmesi, yüksek bir iç güvenilirlik sağlarken, tespit edilemeyen hataların dengeleme sonuçları üzerindeki etkilerinin sınırlı olması ise dış güvenilirliğin güçlü olduğuna işaret etmektedir [1,23,24].

2.6 Uyuşumsuz ölçülerin tespiti

Jeodezik ölçüler sırasında, belirli bir ölçünün güvenilirliği, fazla ölçü payı ile değerlendirilmektedir. Ölçü verilerinde kaba hataların tespit edilmesi ve ayıklanması, dengeleme sonuçlarının doğruluğunu korumak ve ölçü hatalarının olumsuz etkilerini en aza indirmek açısından kritik öneme sahiptir. Bir ölçü kaba hata içeriyorsa, bu hatanın belirlenebilmesi için fazla ölçü payının yüksek olması gerekmektedir. Fazla ölçü payının düşük olması durumunda, ölçüdeki hata düzeltmelere yeterince yansımamakta ve hatalı ölçünün tespiti güçleşmektedir.

Dengeleme sürecinde, ölçülerin değerlendirilmesi yalnızca bilinen parametrelerle sınırlı kalmayıp, diğer ölçüleri etkileyen faktörler de dikkate alınarak gerçekleştirilir. Bu sayede, matematiksel modelin ölçülerin geometrik ve fiziksel özellikleriyle en iyi uyumu sağlaması amaçlanmaktadır. Ancak, ölçüleri etkileyen bazı parametrelerin tam olarak anlaşılamaması veya göz ardı edilmesi model hatalarına yol açabilmektedir. Bu hatalar, dengeleme sonuçlarını doğrudan etkileyerek jeodezik ağda bozulmalara neden olabilir. Bu sebeple, istatistiksel testler kullanılarak modelin doğruluğu değerlendirilmeli ve eğer uyuşumsuz ölçüler tespit edilirse bunlar ayıklanmalıdır [13].

Hatalara karşı ölçülerin kontrol edilebilirliği ve istatistiksel yöntemler ile ortaya çıkarılamayan hataların dengeleme sonuçlarına etkileri, güvenilirlik ölçütleri yardımıyla belirlenmektedir. Bu bağlamda, kaba hataların analizinde, doğrusal hipotez testine dayalı olarak standartlaştırılmış düzeltme \tilde{v}_i kullanılmaktadır. Standartlaştırılmış düzeltme, ölçünün düzeltme değerinin kendi standart sapmasına oranı olarak tanımlanmaktadır (Denklem 17):

$$\tilde{\mathbf{v}}_i = \frac{v_i}{s_{\tilde{\mathbf{v}}_i}} \tag{17}$$

Ölçülerin tutarlılığını değerlendirmek amacıyla çeşitli test yöntemleri uygulanmaktadır. Bu yöntemler arasında Baarda'nın *Data-Snooping testi*, *Pope testi* ve *t-testi* en yaygın kullanılanlar arasındadır. Söz konusu testler, önsel (apriori) ve sonsal (aposteriori) varyans faktörlerine dayalı çeşitli analizleri içermekte olup, aşağıda verilen formüller ile tanımlanmaktadır [13]. *Baarda testi:* σ_0^2 önsel varyans olup, \tilde{v}_i değerlerinin standart normal dağılım N(0,1) koşullarını sağlayıp sağlamadığı değerlendirilir (Denklem 18).

$$\tilde{\mathbf{v}}_i = \frac{\nu_i}{\sigma_0 \sqrt{Q_{\nu_i \nu_i}}} \tag{18}$$

Pope testi: s_0^2 sonsal varyans olup \tilde{v}_i değeri, Tau (τ) dağılımı kullanılarak analiz edilmektedir (Denklem 19).

$$\tilde{\mathbf{v}}_i = \frac{v_i}{s_0 \sqrt{Q_{v_i v_i}}} \tag{19}$$

*t-testi:*İlgili ölçü çıkarıldıktan sonra kalan ölçülerin dengelemesi ile s_{0i}^2 sonsal varyans elde edilir. Bu varyansa bağlı olarak, \tilde{v}_i değerleri *t*-dağılımı temel alınarak istatistiksel olarak incelenmektedir (Denklem 20).

$$\tilde{\mathbf{v}}_i = \frac{v_i}{s_{0i}\sqrt{Q_{v_iv_i}}} \tag{20}$$

Bu testlerin uygulanması sonucunda elde edilen test büyüklükleri Denklem (21)'de gösterilmiştir. Hesaplanan test büyüklükleri, belirlenen anlamlılık düzeyi α_0 ve ilgili serbestlik derecesi *f* kullanılarak elde edilen kritik değerlerle karşılaştırılır. Bu kritik değerler, standart normal dağılım (*u*), Tau dağılımı (τ) ve Student's t-dağılımı (*t*) çizelgelerinden de alınabilir. Bir ölçü hatasının varlığına karar verebilmek için, hesaplanan test büyüklüğünün tablo değerinden büyük olması gerekmektedir [6].

$$\begin{aligned} \tilde{v}_{i_{max,B}} &> u_{1-\alpha_0/2} \\ \tilde{v}_{i_{max,P}} &> \tau_{f,1-\alpha_0/2} \\ \tilde{v}_{i_{max,t}} &> t_{f-1,1-\alpha_0/2} \end{aligned}$$
 (21)

2.7 İç ve dış güvenirlik

Ölçülerde meydana gelebilecek kaba hatalar kesin olarak tespit edilemediğinden, bu hataların dengeleme modelinde doğrudan dikkate alınması mümkün değildir. Ancak, en küçük hata sınır değeri hesaplanarak bu hataların etkileri belirli bir seviyede kontrol altına alınabilmektedir [3-5,25]. İstatistiksel kestirim açısından, standartlaştırılmış düzeltme $v_{i,1}$ yerine istatistiksel kestirim değeri δ_0 kullanıldığında, ∇l_i kaba hatalar belirlenebilir ve $\nabla_0 l_i$ hata sınır değerine dönüşür. Denklem (22)'de r_i büyüklüğü ağın geometrisini tanımlamakta olup, *i*. ölçüdeki kaba hataların v_i düzeltmesi içindeki payını göstermektedir [13]. Burada s_i ölçülerin standart sapmalarını göstermektedir.

$$\nabla l_i = \frac{s_{i*\delta_0}}{\sqrt{r_i}} \tag{22}$$

Dışmerkezlik parametresi δ_0 , α_0 yanılsama olasılığı ve Υ_0 test gücü arasındaki foksiyonel ilişkiyi ifade etmektedir. δ_0 , standart normal dağılımın $u_{1-\alpha_{0/2}}$ ve $u_{1-\Upsilon_0}$ belirli sınır değerleri kullanılarak $\delta_0 = (u_{1-\alpha_{0/2}} - u_{1-\Upsilon_0})$ biçiminde hesaplanabilir [3-5,26]. Örneğin, $\Upsilon_0 = 0.80$ ve $\alpha_0 = 0.01$ için $\delta_0 = 3.42$, aynı Υ_0 değeri ve $\alpha_0 = 0.001$ değeri için $\delta_0 = 4.13$ olur.

İç güvenilirlik, ölçülerin kaba hatalara karşı ne derece kontrol edilebildiğini göstermektedir. İç güvenilirliğin yüksek olması için hata sınırlarının küçük ve ölçülerin hata kontrol edilebilirliğinin eşit olması beklenir. Bu doğrultuda, ölçülerde tespit edilmesi mümkün olan hata sınır değerleri, iç güvenilirlik ölçütleri olarak tanımlanmaktadır.

Ağın dış güvenilirliği, ortaya çıkarılamayan ölçü hatalarının dengeleme sonuçlarına olan etkileri ile tanımlanmakta ve ağın doğruluk ile güvenilirlik açısından değerlendirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Tespit edilemeyen kaba hataların nokta koordinatları veya bunların fonksiyonları üzerindeki etkisi, ağın güvenilirlik seviyesini belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Hata sınır değerinin dengeleme sonuçları üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olması, ağın dış güvenilirliğinin sağlandığını göstermektedir.

Hata sınır değerinin, tüm bilinmeyenler üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Koordinatlar arasındaki en büyük etkiye sahip olan değer, dış güvenilirlik ölçütü olarak değerlendirilir. Hata sınırının büyük olmasına rağmen, etki faktörünün düşük olması, ağın güvenilirliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, dış güvenilirlik analizinde ölçü hatalarının etkisinin en aza indirilmesi ve dengeleme sonuçlarının kararlılığının sağlanması büyük önem taşımaktadır.

$$\bar{\delta}_{0,i} = \sqrt{\frac{1-r_i}{r_i}} \delta_0^* \mathbf{s}_i \tag{23}$$

Denklem (23)'te $\overline{\delta}_{0,i}$, etki faktörü veya dışmerkezlik parametresi olarak adlandırılır ve datumdan bağımsız bir dış güvenirlik ölçütüdür [13]. Güvenilir bir jeodezik ağda, etki faktörünün olabildiğince düşük tutulması amaçlanmaktadır. Böylece, tespit edilemeyen ölçü hatalarının dengeleme sonuçları üzerindeki etkisi en aza indirgenmiş olur.

İç güvenilirlik, belirli bir test gücü çerçevesinde hangi büyüklükteki ölçü hatalarının tespit edilebileceğini ifade ederken, dış güvenilirlik ise tespit edilemeyen hataların dengeleme sonuçlarına olan etkisini değerlendirir. Yüksek iç güvenilirlik, tüm ölçülerin eşit derecede kontrol edilebilmesini sağlarken, yüksek dış güvenilirlik, belirlenemeyen hataların sonuçlar üzerindeki etkisinin minimal olmasını gerektirir [3-5,15,23,24].

3 Bulgular ve tartışma

3.1 I nolu yöntem (Tüm iz minimum)

Bu yaklaşımda, ağdaki tüm noktalar bilinmeyen olarak tanımlanmıştır. Şekil 3'te, Pope test yöntemi kullanılarak kenar-doğrultu ağı, doğrultu ağı ve kenar ağı için uyuşumsuz ölçü araştırması gerçekleştirilmiştir. Pope test yöntemine göre, bir ölçünün uyuşumsuz olarak kabul edilebilmesi için standartlaştırılmış düzeltme değeri \tilde{v}_i , kritik sınır değeri $\tau_{f,1-\alpha_{0/2}}$ 'den büyük olmalıdır. Bu koşul sağlandığında, standartlaştırılmış düzeltme değeri en büyük olan ölçü, uyuşumsuz ölçü olarak değerlendirilir. Buna göre, kenardoğrultu ağı için yapılan analizde, ölçüt değeri $\tau_{f,1-\alpha_{0/2}} =$ 3.27 esas alındığında, herhangi bir uyuşumsuz ölçü tespit edilmemiştir. Doğrultu ağı için yapılan değerlendirmede, ölçüt değeri $\tau_{f,1-\alpha_{0/2}} = 2.97$ 'ye göre uyuşumsuz ölçü tespit edilmemiştir. Kenar ağı için gerçekleştirilen incelemede ise, ölçüt değeri $\tau_{f,1-\alpha_{0/2}} = 2.30$ olup, herhangi bir uyuşumsuz ölçüye rastlanmamıştır. Bu sonuçlar, tüm ağ türleri için ölçülerin istatistiksel olarak tutarlı olduğunu göstermektedir [27].



Şekil 3. I nolu yöntem için uyuşumsuz ölçü testi sonucu

Tablo 1, farklı ağ türlerinde gerçekleştirilen ölçülere ait maksimum, minimum ve ortalama standart sapma değerlerini göstermektedir. Sonuçlar, doğrultu ağının en düşük standart sapma ile en kararlı ölçü hassasiyetine sahip olduğunu, kenar ağının ise en yüksek hata değişkenliği gösterdiğini ortaya koymaktadır. Kenar-doğrultu ağı, maksimum standart sapma değeri yüksek olmasına rağmen, ortalama hata seviyesi açısından daha dengeli bir yapı sergilemektedir.

Tablo 1. I nolu yönteme göre ölçülerin standart sapma değerleri

Ağ Türü	$\sigma_{maks}(\text{cm/mgon})$	$\sigma_{ort}(cm/mgon)$	$\sigma_{min}(cm/mgon)$
Kenar-Doğrultu	6.29	0.50	0.40
Doğrultu	0.16	0.14	0.11
Kenar	4.89	1.95	0.02

Kenar ağına ait düzeltmelerin standart sapmaları incelendiğinde, serbest dengeleme yöntemleri arasında teorik olarak eşit değerler elde edilmesi beklenirken belirli farklılıklar tespit edilmiştir. Şekil 4'te II ve III numaralı yöntemlerle hesaplanan dengeli ölçülerin standart sapma değerleri aynı kalırken, I numaralı yöntemde bu değerler ortalama 0.20 cm daha düşük olarak hesaplanmıştır. Bu durum, tüm iz minimum yönteminin hata yayılımını daha etkin bir şekilde optimize ederek standart sapmaları düşürdüğünü göstermektedir. Diğer yöntemlerde ise, standart sapmaların aynı kalması veya daha yüksek olması, modelin hata kontrol mekanizmasının farklı işleyişinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4. Kenar ağı farklı yöntemler için dengeli ölçülerin standart sapmaları

Serbest dengeleme analizlerinde, kenar-doğrultu ve doğrultu ağı ölçüleri; kenar-doğrultu ve kenar ağına ilişkin redündans değerleri karşılaştırılmıştır (Şekil 5). Kenardoğrultu ağı ve dengeli doğrultu ağı ölçüleri için redündans değerleri, sırasıyla, 0.50-0.90, ve 0.40-0.80 aralığındadır. Kenar-doğrultu ağı ve kenar ağı ölçüleri için redündans değerleri, sırasıyla 0.40-0.80 ve 0.10-0.50 seviyelerine düşmektedir. Bu sonuçlar, kenar ağının daha düşük kontrol edilebilirliğe sahip olduğunu göstermektedir. Bunun yanı sıra, bazı ölçülerin redündans değerlerinin sıfıra yaklaşması, bu ölçülerin kaba hatalara karşı kontrol gücünün düşük olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. Dengeli ölçülerin redündans değerleri

Hata tespit kapasitesi ve hata yayılımı açısından en uygun senaryonun belirlenmesi amacıyla üç farklı dışmerkezlik parametresi senaryosu değerlendirilmiştir. Şekil 6 ve Şekil 7, farklı dışmerkezlik parametrelerine bağlı olarak iç ve dış güvenirlik değerlerindeki değişimi göstererek, hata tespit kapasitesi ve hata yayılımı bakımından en güvenilir senaryonun belirlenmesine katkı sağlamaktadır. 4.27 değeri, hata tespit kapasitesini artıran ve hata yayılımını optimize eden en uygun dışmerkezlik parametresi olarak belirlenmiş olup, literatürde yaygın olarak kullanılan Υ_0 ve α_0 değerleri doğrultusunda hesaplanmıştır. Yapılan analizler, bu değerin ağın iç ve dış güvenirlik performansını en iyi şekilde sağladığını göstermektedir.

İç güvenirlik açısından, 4.27 senaryosu en yüksek hata tespit edilebilirliğini sağlarken, 3.42 senaryosu daha düşük güvenirlik sergilemektedir. Özellikle 60-80 numaralı ölçüler arasında iç güvenirlik değerlerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Dış güvenirlik analizinde ise, 4.27 senaryosu hata yayılımı açısından en yüksek değerlere sahip olup, 40 numaralı ölçüden itibaren dış güvenirlikte belirgin bir artış görülmektedir. Buna karşın 3.42 senaryosu, hata yayılımını daha az etkileyerek daha düşük dış güvenirlik değerleri sergilemektedir.

Genel olarak, 4.27 senaryosu hem iç hem de dış güvenirlik açısından en güvenilir seçenek olarak öne çıkmakta olup, hata tespit kapasitesini artırmak ve hata yayılımını kontrol altına almak amacıyla detaylı analizlerin yapılması gerekmektedir. Ayrıca, çalışmanın geri kalanındaki analizler 4.27 etki faktörüne dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Bu değerin tercih edilme nedeni, ağın hatalara karşı duyarlılığını en iyi şekilde yansıtmasıdır. Yapılan analizler, bu etki faktörünün iç ve dış güvenirlik değerlerini optimize ettiğini ve hata tespit kapasitesini en uygun seviyeye getirdiğini ortaya koymaktadır.

Şekil 8'de, I numaralı yönteme ait her bir ölçü grubunun x-y koordinat düzlemindeki nokta konum hataları görselleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, kenar-doğrultu ölçüleri kullanıldığında hata miktarı ortalama 3.40 cm, doğrultu ölçüleri kullanıldığında ortalama 2 cm, kenar ölçüleri kullanıldığında ise ortalama 6.40 cm olarak hesaplanmıştır. Doğrultu ölçülerinin hata miktarının daha düşük olması, bu ölçü grubunun daha yüksek duyarlılığa sahip olduğunu ve ölçü hassasiyetinin arttığını göstermektedir.

Noktalara ait hata ile güven elipsleri, seçilen datum noktalarına bağlı olarak belirlenmiştir. Hata ve güven elipslerine ilişkin eksen uzunluklarının değerlendirilmesi amacıyla Tablo 2 ve Tablo 3'te farklı parametreler sunulmuştur.

Tablo 2'de, hata ve güven elipslerine ait maksimum eksen uzunlukları verilmiştir. Bu kapsamda, max(A) ve max(B), hata elipslerinin sırasıyla büyük ve küçük eksenlerindeki maksimum hata değerlerini ifade etmekte olup, ölçü hatalarının en büyük olduğu yönleri göstermektedir. Benzer şekilde, max(a) ve max(b) parametreleri, güven elipslerinin büyük ve küçük eksenlerindeki maksimum güvenlik değerlerini temsil etmekte ve ölçülerin en az doğruluk gösterdiği durumları yansıtmaktadır.

Tablo 3'te ise hata ve güven elipslerine ilişkin minimum eksen uzunlukları sunulmuştur. min(A) ve min(B), hata elipslerinin büyük ve küçük eksenlerindeki minimum hata değerlerini ifade ederek, hata dağılımının en düşük olduğu yönleri göstermektedir. min(a) ve min(b) ise güven elipslerinin büyük ve küçük eksenlerine ait minimum güvenlik değerleri olup, ölçülerin en yüksek doğruluk seviyesine ulaştığı durumları belirlemektedir. Elde edilen sonuçlar, doğrultu ağının hata elipsi eksen uzunluklarını minimize ederek hata dağılımını en aza indirdiğini ve güven elipslerinde daha düşük eksen uzunlukları sağlayarak ölçülerde en yüksek doğruluk seviyesinin elde edilmesine katkı sunduğunu ortaya koymaktadır. Buna karşın, kenar ağı, hata elipslerinde en büyük eksen uzunluklarını sergileyerek hata dağılımının daha geniş olduğunu göstermekte ve güven elipslerinde daha düşük hassasiyet sunarak ölçü doğruluğunun görece düşük seviyelerde gerçekleştiğini işaret etmektedir.



Şekil 6. Kenar-doğrultu ağına ait üç farklı etki yöntemiyle iç güvenilirlik karşılaştırması



Şekil 7. Kenar-doğrultu ağına ait üç farklı etki yöntemiyle dış güvenilirlik karşılaştırması



Şekil 8. I nolu yöntem nokta konum hataları

Tablo 2. I nolu yönteme göre maksimum eksen değerleri

Ağ Türü	maxA(cm)	maxB(cm)	maxa(cm)	maxb(cm)
Kenar-doğrultu	3.75	3.21	9.48	8.12
Doğrultu	2.49	1.62	6.60	4.31
Kenar	8.19	4.52	26.28	14.49

Tablo 3. I nolu yönteme göre minimum eksen değerleri

Ağ Türü	minA(cm)	minB(cm)	mina(cm)	minb(cm)
Kenar-doğrultu	1.79	3.21	4.52	3.74
Doğrultu	1.07	1.62	2.84	1.68
Kenar	4.02	4.52	12.90	8.79

Ölçülerin güvenilirliğini belirleyen ağırlık matrisi, hata seviyelerine bağlı olarak oluşturulmaktadır. I nolu yöntemde, tüm doğrultular için aynı σ_r değeri esas alınarak doğrultu ölçülerinin ağırlıkları 1 olarak kabul edilmiş, kenar ölçülerinin ağırlıkları ise alet duyarlılığı doğrultusunda 5 mm + 2 ppm olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışmada farklı stokastik modellerin güvenilirlik ölçütleri üzerindeki etkisi, kenar-doğrultu ağı kullanılarak incelenmiştir. İncelemede *P* matrisi ağırlık matrisini, *E* matrisi ise birim matrisi temsil etmektedir. Bu kapsamda gerçekleştirilen analizlerin sonuçları Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11'de detaylı olarak sunulmuştur.



Şekil 9. Farklı stokastik modellere göre redündans değerleri

Şekil 9 incelendiğinde, stokastik model olarak birim matris kullanıldığında, doğrultu ölçülerinin redündanslarının bire yakın, kenar ölçülerinin ise sıfıra yakın olduğu belirlenmiştir. Redündans değerlerinin bu dağılımı, stokastik model seçiminin güvenilirlik analizleri ve hata tespit edilebilirliği üzerindeki doğrudan etkisini ortaya koymaktadır.



Şekil 10. Farklı stokastik modellere göre iç güvenilirlik değerleri

Sekil 10'da iç güvenilirlik açısından, P matrisi kullanıldığında doğrultu ölçülerinin iç güvenilirlik değerlerinin genel olarak daha yüksek olduğu, P = Edurumunda ise değerlerin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle kenar ölçülerinde, P = E matrisi kullanıldığında iç güvenilirlik değerlerinde daha belirgin bir azalma görülmektedir. Şekil 11'de ise dış güvenilirlik analiz sonuçları sunulmuştur. P matrisi kullanıldığında kenar ölcülerinde dış güvenilirlik değerlerinin daha yüksek olduğu, P = E durumunda ise dış güvenilirlik değerlerinin genel olarak daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, stokastik modelin hata yayılımı üzerindeki etkisini göstermekte ve ağırlık matrisinin kullanılması durumunda hata tespit kapasitesinin arttığını ortaya koymaktadır.



Şekil 11. Farklı stokastik modellere göre dış güvenilirlik değerleri

3.2 II nolu yöntem (Kısmi iz minimum)

Kısmi iz minimum yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen dengeleme işlemlerinde, 53, 62, 147 ve 149 numaralı noktalar datum noktalarıdır. Bu seçim, ağın geometrik stabilitesini korumak, hata yayılımını minimize etmek ve güvenilir bir referans sistemi oluşturmak amacıyla yapılmıştır. Seçilen noktalar, ağın belirli bölgelerinde stratejik olarak konumlandırılmış olup, dengeleme sürecinde hata dağılımını optimize etmeye ve ağın stabilitesini artırmaya katkı sağlamaktadır.

II numaralı yöntem kapsamında, her bir ölçü grubuna ait noktalara ilişkin nokta konum hataları Şekil 12'de görselleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, doğrultu ağı, ortalama 2.20 cm ile en düşük nokta konum hatasına sahipken, kenar ağında bu değer ortalama 7.60 cm'ye ulaşarak en yüksek seviyeye çıkmıştır. Bu durum, II numaralı yöntemde kenar ağının model entegrasyonu sırasında hata oranlarının daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, kenar ve doğrultu ölçülerinin birlikte kullanıldığı ağ yapısında hata değerleri ortalama 3.60 cm olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular, doğrultu ölçülerinin konum hassasiyetine katkı sağladığını ve model entegrasyonu açısından daha güvenilir sonuçlar sunduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 12. II nolu yöntem nokta konum hataları

Dört noktanın datum tanımına katkı sağladığı II numaralı yöntem en düşük hata oranını sağlamış, ancak tüm iz minimum yöntemi ile karşılaştırıldığında daha büyük hata değerleri elde edilmiştir. Analiz sonuçları, doğrultu ağının kullanıldığı durumlarda hata ve güven elipslerinin eksen uzunluklarının daha küçük olduğunu, dolayısıyla hata dağılımının minimize edildiğini göstermektedir. Buna karşılık, kenar ağında hata ve güven elipsi eksen uzunluklarının diğer iki ağ türüne kıyasla daha büyük olduğu belirlenmiştir. Bu durum, kenar ağının modelleme sürecinde oranlarının hata görece daha yüksek olmasıyla ilişkilendirilmektedir (Tablo 4 ve Tablo 5).

Tablo 4. II nolu yönteme göre maksimum eksen değerleri

Ağ Türü	maxA(cm)	maxB(cm)	maxa(cm)	maxb(cm)
Kenar-doğrultu	4.50	3.55	11.39	8.99
Doğrultu	3.29	1.88	8.74	4.99
Kenar	12.28	5.45	41.77	18.53

Tablo 5. II nolu yönteme	göre	minimum	eksen	değerleri
--------------------------	------	---------	-------	-----------

Ağ Türü	minA(cm)	minB(cm)	mina(cm)	minb(cm)
Kenar-doğrultu	1.88	3.55	4.76	3.71
Doğrultu	1.23	0.02	3.26	0.06
Kenar	3.61	5.45	12.27	10.29

3.3 III nolu yöntem (Zorlamasız dengeleme)

Zorlamasız klasik dengeleme yöntemi kapsamında gerçekleştirilen analizlerde, ağın stabilizasyonunu sağlamak ve çözüm tekilliğini önlemek amacıyla belirli noktalar datum olarak tanımlanmıştır. Doğrultu ağı için yapılan analizlerde, toplam 4 datum parametresi kullanılmış olup, 54 ve 62 numaralı noktalar datum olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda, 54 ve 62 numaralı noktaların hem x hem de y koordinat bileşenleri datum olarak kullanılmıştır. Kenar ve doğrultukenar ağları için yapılan analizlerde ise datum parametre sayısı 3 olarak belirlenmiş, bu kapsamda 54 numaralı noktanın x ve y koordinat bileşenleri datum olarak tanımlanmış, 62 numaralı noktanın ise yalnızca x koordinat bileşeni datum olarak kullanılmıştır. Bu yaklaşım, ağın serbestlik derecesinin korunmasını sağlarken, minimum kısıtlama ile optimum stabilitenin elde edilmesine olanak tanımaktadır.

Şekil 13, doğrultu ağında nokta konum hatalarının en düşük seviyede olduğunu, kenar ağında ise en yüksek değere ulaştığını göstermektedir. Kenar ve doğrultu ölçülerinin birlikte kullanıldığı ağ yapısında ise hata değerleri ortalama 5.70 cm olarak hesaplanmıştır. Dengelenme işlemi sonucunda, noktalar arasındaki konum hatalarındaki farklılıkların, sabit kabul edilen nokta seçimi ve koordinat sistemine bağlı olarak değişim gösterdiği tespit edilmiştir. Klasik dengeleme yönteminde, yalnızca iki noktanın datum tanımına katkı sağladığı zorlama durumu altında hata ve güven elipslerinde maksimum eksen değerlerine ulaşılmıştır. Bu durum, sınırlı datum tanımının ağ güvenilirliği üzerindeki olumsuz etkisini ortaya koymaktadır.



Şekil 13. III nolu yöntem nokta konum hataları

Bu yöntemde elde edilen hata ve güven elipslerine ilişkin minimum ve maksimum eksen uzunlukları Tablo 6 ve Tablo 7'de sunulmaktadır. Yapılan analizler, doğrultu ağının kullanıldığı durumlarda hata elipsi eksen uzunluklarının daha küçük olduğunu ve hata dağılımının daha homojen bir yapı sergilediğini ortaya koymaktadır. Özellikle doğrultu ağı, hata elipsi büyüklükleri açısından en düşük değerlere sahip olup, ölçü duyarlılığı açısından en avantajlı ağ türü olarak öne çıkmaktadır. Buna karşın, kenar ağında hata elipsi değerlerinin diğer iki ağ türüne kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, kenar ağının modelleme sürecinde hata oranlarının görece daha yüksek olması ve ölçü duyarlılığının doğrultu ölçülerine kıyasla daha düşük olması ile ilişkilendirilmektedir.

Elde edilen bulgular, stokastik modelin seçiminden datum tanımına kadar birçok faktörün hata ve güven elipsleri üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Bu doğrultuda, optimum güvenilirlik düzeyine ulaşmak için ağ tasarımında hem ölçü kombinasyonlarının hem de datum seçim stratejilerinin dikkatle belirlenmesi gerekmektedir.

Tablo 6. III nolu yönteme göre maksimum eksen değerleri

Ağ Türü	maxA(cm)	maxB(cm)	maxa(cm)	maxb(cm)
Kenar-doğrultu	8.12	5.32	20.51	13.45
Doğrultu	6.42	3.19	17.04	8.47
Kenar	19.56	7.80	66.53	26.52

Tablo 7. III nolu yönteme göre minimum eksen değerleri

Ağ Türü	minA(cm)	minB(cm)	mina(cm)	minb(cm)
Kenar-doğrultu	3.10	5.32	7.84	2.07
Doğrultu	1.67	3.19	4.44	2.08
Kenar	6.01	7.80	20.46	3.93

3.4 IV Nolu Yöntem (Dayalı dengeleme)

Dayalı dengeleme, belirli noktaların sabit kabul edildiği veya ölçü parametrelerine kısıtların uygulandığı bir dengeleme yöntemidir. Jeodezik ağlarda, mühendislik projelerinde ve Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS) tabanlı ölçülerde, belirli datum noktalarının sabit tutulması ile ölçülerin mutlak doğruluğu artırılmakta ve hata yayılımı kontrol edilmektedir. Serbest dengeleme ile karşılaştırıldığında, dayalı dengelemede sabit noktalar belirlenerek güvenilirlik artırılır, ancak hata dağılımı bu sabit noktalara bağlı olarak değişebilir.

 Tablo 8. IV nolu yönteme göre ölçülerin standart sapma değerleri

Ağ Türü	$\sigma_{maks}(cm/mgon)$	$\sigma_{ort}(cm/mgon)$	$\sigma_{\min}(cm/mgon)$
Kenar-Doğrultu	7.63	2.13	0.38
Doğrultu	0.31	0.27	0.23
Kenar	11.30	4.28	0.03

Dayalı dengeleme yöntemiyle gerçekleştirilen değerlendirmeler sonucunda elde edilen dengeli ölçülerin standart sapmaları Tablo 8'de sunulmuştur. Buna göre doğrultu ağı, en düşük hata seviyesine sahip ağ türü olarak belirlenmiştir. Minimum ve maksimum hata değerlerinin birbirine oldukça yakın olması, hata dağılımının homojen olduğunu ve ölçülerin güvenilirliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, kenar-doğrultu ağı, ortalama hata seviyesi açısından kabul edilebilir bir seviyede olup, hata dağılımı dengeli bir yapı sergilemektedir. Maksimum hata seviyesi bazı ölçülerde hata seviyelerinin arttığını gösterse de, genel hata kontrolü sağlanmıştır. Kenar ağı ise en yüksek hata seviyesine sahip ağ türüdür. Maksimum hata değeri bazı ölçülerin güvenilirlik açısından daha düşük olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, IV. yöntemin doğrultu ağı için daha stabil sonuçlar ürettiğini, ancak kenar ağı ölçülerinde hata seviyelerinin daha değişken ve yüksek olduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil 14'te, farklı ölçü kombinasyonlarının redündans değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. İlk grafikte, kenar-doğrultu ölcüleri kullanıldığında doğrultular için redündans değeri 0.60-0.90, yalnızca doğrultu ölçüleri kullanıldığında ise 0.40-0.70 arasında değiştiği tespit edilmistir. İkinci grafikte, kenar-doğrultu ölcüleri kullanıldığında kenarlar için redündans değeri 0.40-0.80, yalnızca kenar ölçüleri kullanıldığında ise 0-0.30 arasında değişmiş ve kontrol edilebilirlik açısından daha düşük bir değer gözlenmiştir. Ayrıca, bazı ölçülerin redündans değerlerinin sıfıra yaklaşması, bu ölçülerin, kaba hata tespiti açısından zayıf bir performans sergilediğini göstermektedir.



Şekil 14. Dengeli ölçülerin redündans değerleri

Şekil 15'te, IV nolu yöntem için iç güvenilirlik değerlerinin, ölçü türüne göre farklılık gösterdiği belirlenmiştir. İlk grafikte, kenar-doğrultu ölçüleri kullanıldığında dengeli doğrultu ölçüleri için iç güvenilirlik değeri 0.70-0.90 cm/mgon, yalnızca doğrultu ölçüleri için ise 0.75-1.00 mgon arasında değişmiştir. İkinci grafikte, yalnızca kenar ölçüleri için iç güvenirlik değerleri ortalama 14 cm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 15. Dengeli ölçülerin iç güvenirlik değerleri

Şekil 16'ya göre, kullanılan ağ türüne bağlı olarak dış güvenilirlik değerlerinde farklılık gözlemlenmiştir. İlk grafikte, kenar-doğrultu ağında dengeli doğrultuların dış güvenilirlik değeri 0.20-0.60 cm/mgon, yalnızca doğrultu ağında ise 0.34-0.75 mgon aralığındadır. İkinci grafikte, kenar-doğrultu ağında dengeli kenarların dış güvenilirlikleri ortalama 3.73 cm, yalnızca kenar ağında ise bu değer ortalama 11.75 cm'ye yükselmektedir.



Şekil 16. Dengeli ölçülerin dış güvenirlik değerleri

IV numaralı yöntem için farklı ölçü gruplarına ait nokta konum hataları Şekil 17'de görselleştirilmiştir. Yapılan analizler, doğrultu ağında ortalama 4.30 cm ile en düşük, kenar ağında ise ortalama 14.25 cm ile en yüksek konum hatalarının meydana geldiğini göstermektedir. Kenar ve doğrultu ölçülerinin birlikte kullanıldığı ağ yapısında ise hata değerleri ortalama 4.57 cm olarak hesaplanmıştır. Dengeleme işlemi sonucunda, konum hatalarındaki farklılıkların, sabit nokta seçimine bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir.



Şekil 17. IV nolu yöntem nokta konum hataları

Hata ve güven elipsleri üzerinde yapılan analizler, kenar ağının en yüksek hata ve güven elipsi eksen uzunluklarına sahip olduğunu, doğrultu ağının ise en düşük değerlere ulaştığını göstermektedir. Tablo 9 ve Tablo 10'daki maksimum ve minimum eksen uzunlukları incelendiğinde, doğrultu ağının hata ve güven elipsleri açısından en küçük değerlere sahip olduğu, buna karşın kenar ağının en büyük hata ve güven elipsi eksen uzunlukları ile karakterize edildiği belirlenmiştir. Bu durum, doğrultu ağının hata dağılımını minimize etmede ve ölçü doğruluğunu artırmada daha avantajlı olduğunu, kenar ağının ise modelleme sürecinde hata oranlarının görece daha yüksek olması nedeniyle daha az güvenilir sonuçlar ürettiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 9. IV nolu yönteme göre maksimum eksen değerleri

Ağ Türü	maxA(cm)	maxB(cm)	maxa(cm)	maxb(cm)
Kenar-doğrultu	7.17	4.43	18.08	11.17
Doğrultu	7.55	5.00	19.89	13.17
Kenar	21.86	11.08	63.78	32.32

Tablo 10. IV nolu yönteme göre minimum eksen değerleri

Ağ Türü	minA(cm)	minB(cm)	mina(cm)	minb(cm)
Kenar-doğrultu	2.07	1.96	5.23	4.95
Doğrultu	1.57	1.31	4.15	3.46
Kenar	6.05	4.36	17.64	12.73

3.5 Sonuçların karşılaştırılması

Tablo 11'de, farklı dengeleme yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve yöntemlerin hata yayılımı ile güvenilirlik üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Sunulan veriler, her yöntemin farklı ağ türleri üzerindeki performansını ortaya koymaktadır. I nolu yöntem, en düşük hata yayılımını sağlayarak en güvenilir sonuçları sunmuştur. Bu yöntemde iz(Q) değerleri diğer yöntemlere kıyasla en düşük seviyede olup, özellikle kenar-doğrultu ağı için 523.47 olarak belirlenmiştir. Birim ağırlıklı ölçünün standart sapması açısından da bu yöntem, doğrultu ağında en düşük hata seviyesine ulaşmıştır. II nolu yöntem, hata seviyelerini artırmadan stabil bir dengeleme sağlamıştır. iz(Q) değerleri bir miktar artmış, ancak hata kontrolü açısından dengenin korunduğu görülmüştür. III nolu yöntem, hata yayılımını önemli ölçüde artırmış ve güvenilirliği düşürmüştür. iz(Q)değerleri belirgin bir şekilde artarak, doğrultu ağında 4714.28, kenar ağında ise 5205.04 seviyesine ulaşmıştır. IV nolu yöntem, en yüksek hata seviyelerine sahip olup, ağın en az güvenilir olduğu yöntemi göstermektedir. PVV ve s₀ değerleri diğer yöntemlere kıyasla en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Sonuç olarak, en güvenilir ve stabil yöntem, hata seviyede en düşük tutarak yayılımını ölcülerin güvenilirliğini artıran I nolu yöntem olarak belirlenmiştir. Bu yöntemin, ağın genel stabilitesini koruduğu ve optimum dengeleme sağladığı görülmektedir.

Gerçekleştirilen analizlerde I, II, III ve IV numaralı yöntemlere ait nokta konum hataları, dengeli ölçülerin standart sapma değerleri, redündans oranları ve iç-dış güvenilirlik analizleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Şekil 18'de, ilk sırada kenar-doğrultu ağı, ikinci sırada doğrultu ağı ve son sırada kenar ağına ait nokta konum hataları görselleştirilmiştir. Kenar-doğrultu ağına ait analizlerde, en yüksek nokta konum hatasının III numaralı yöntemde, 150 numaralı noktada 9.70 cm olarak, en düşük konum hatasının ise I numaralı yöntemde, 152 numaralı noktada 2.41 cm olarak tespit edildiği belirlenmiştir. Bu farklılıklar, kullanılan yöntemlerin ağ yapılandırmasına ve hata yayılımına olan etkisini ortaya koymaktadır. Doğrultu ağı için yapılan değerlendirmelerde, IV numaralı yöntemde 150 numaralı noktada 9.06 cm ile en yüksek, II numaralı yöntemde ise 148 numaralı noktada 1.23 cm ile en düşük konum hatası belirlenmiştir. Kenar ağı analizlerinde ise, IV numaralı yöntemde 54 numaralı noktada 23.22 cm ile en yüksek, II numaralı yöntemde 149 numaralı noktada 4.71 cm ile en düşük hata değerleri elde edilmiştir.

Tablo 11. Dengeleme sonuçları

I nolu yöntem				
Ağ Türü	Kenar-Doğrultu	Doğrultu	Kenar	
PVV	14.06	0.63	1.56	
s ₀ (cm)	0.55	0.18	0.51	
$iz(Q)(cm^2)$	523.47	1658.63	2132.36	
	II nolu yönten	n		
Ağ Türü	Kenar-Doğrultu	Doğrultu	Kenar	
PVV	14.06	0.63	1.56	
s ₀ (cm)	0.55	0.18	0.51	
$iz(Q)(cm^2)$	628.72	2213.66	2713.69	
III nolu yöntem				
Ağ Türü	Kenar-Doğrultu	Doğrultu	Kenar	
PVV	14.06	0.63	1.56	
s ₀ (cm)	0.55	0.18	0.51	
$iz(Q)(cm^2)$	1418.52	4714.28	5205.04	
IV nolu yöntem				
Ağ Türü	Kenar-Doğrultu	Doğrultu	Kenar	
PVV	18.65	2.45	4.29	
s ₀ (cm)	0.61	0.34	0.85	
iz(Q)(cm ²)	634.58 1939.75 3246		3246.40	

Bu sonuçlar, farklı yöntemlerin ağ türlerine göre konum hatası dağılımlarında belirgin farklılıklar oluşturduğunu göstermektedir. Özellikle, IV numaralı yöntemin kenar ağında en yüksek hata değerlerine sahip olması, bu yöntemin hata yayılımına daha duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. II numaralı yöntemin hem doğrultu hem de kenar ağında en düşük hata değerlerini sağlaması ise, bu yöntemin stokastik modelleme sürecindeki etkinliğini ve ağ yapılandırmasına olumlu katkısını göstermektedir. Sonuçlar, yöntem ve ağ türü seçiminin konum doğruluğu üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle, farklı ağ yapılarına uygun yöntemlerin titizlikle değerlendirilmesi ve konum hata analizlerinin yöntem bazında ayrıntılı olarak incelenmesi gerekmektedir.

Şekil 19'da, I ve IV numaralı yöntemlere ait dengeleme sonrası elde edilen standart sapma değerleri karşılaştırılmıştır. Standart sapma değerleri kenar-doğrultu ağı için I numaralı yöntemde 0.40-0.52 cm, IV numaralı yöntemde ise 0.38-0.58 cm arasında değişmektedir. Kenar ağı için ise I numaralı yöntemde 2.66-6.29 cm, IV numaralı yöntemde 3.00-7.63 cm aralığında değerler elde edilmiştir. Bu sonuçlar, I ve IV numaralı yöntemlerin ölçü duyarlılığı üzerindeki etkilerini ortaya koymakta olup, IV numaralı yöntemin kenar ağı üzerindeki hata yayılımına daha duyarlı olduğunu göstermektedir. Analizlerin daha net yorumlanabilmesi amacıyla tüm yöntemler yerine I ve IV numaralı yöntemlerin karşılaştırılması tercih edilmiştir.



Şekil 18. Nokta konum hataları



Şekil 19. Kenar-doğrultu ağı I-IV nolu yöntemlerin standart sapmalarının karşılaştırması

Şekil 20'de, I ve IV numaralı yöntemlere ait redündans değerleri karşılaştırılmıştır. Kenar-doğrultu ağı için, doğrultu ölçülerinin redündans değerleri I numaralı yöntemde 0.52-0.90, IV numaralı yöntemde ise 0.39-0.91 arasında bir değişim göstermektedir. Bu değerler incelendiğinde, IV numaralı yöntemde doğrultu ölçülerinin redündans değerlerinin daha geniş bir aralıkta dağıldığı, dolayısıyla daha fazla varyasyon sergilediği görülmektedir. Kenar ölçülerinde ise I numaralı yöntemin redündans değerleri 0.43-0.83, IV numaralı yöntemin ise 0.49-0.88 aralığında hesaplanmış olup, bu iki yöntem arasında belirgin bir varyasyon farkı gözlenmemektedir. Bu analiz, farklı yöntemlerin ağ yapılarına göre redündans değerlerinde nasıl bir değişim gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Şekil 21, I ve IV numaralı yöntemlerin iç güvenilirlik değerlerinin dağılımını göstermektedir. Doğrultu ölçülerinde, I numaralı yöntemde değerler 0.78-2.23 cm/mgon, IV numaralı yöntemde ise 0.82-2.41 cm/mgon aralığında değişim göstermiştir. Bu değerler incelendiğinde, doğrultu ölçülerinde her iki yöntemin benzer bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Kenar ölçülerinde, I numaralı yöntemde değerler 9.72-22.97 cm/mgon, IV numaralı yöntemde ise 0.48-0.85 cm/mgon aralığında değişime sahiptir. IV numaralı yöntemin kenar ölçülerinde iç güvenilirlik değerlerini önemli ölçüde azalttığı (yani güvenilirliği artırdığı), doğrultu ölçülerinde ise I numaralı yöntemle benzer bir dağılım gösterdiği görülmektedir.

Şekil 22'de, I ve IV numaralı yöntemlere ait dış güvenilirlik değerleri karşılaştırılmıştır. Dış güvenirlik değerleri doğrultu ölçülerinde, I numaralı yöntemde 0.25-1.54 cm/mgon, IV numaralı yöntemde ise 0.25-1.63 cm/mgon aralığındadır. Kenar ölçülerinde ise, I numaralı yöntemde 4.44-15.14 cm/mgon, IV numaralı yöntemde ise 0.21-0.53 cm/mgon aralığındadır. IV numaralı yöntemin kenar ölçülerindeki dış güvenilirlik değerleri oldukça düşük olup, büyük hataların tespit edilme ihtimalinin daha sınırlı olduğunu göstermektedir. Bu durum, ağın belirli ölçüler için hata tespit kapasitesinin zayıflamasına neden olabilir.



Şekil 20. Kenar-doğrultu ağı I-V nolu yöntemlerin redündanslarının karşılaştırılması



Şekil 21. Kenar-doğrultu ağı I-IV nolu yöntemlerin iç güvenirliklerinin karşılaştırılması



Şekil 22. Kenar-doğrultu ağı I-IV nolu yöntemlerin dış güvenilirliklerinin karşılaştırılması

4 Sonuçlar

Bu çalışma, jeodezik ağlarda kullanılan farklı matematiksel modellerin dengeleme sonuçlarına etkilerini karşılaştırmalı bir yaklaşımla analiz etmektedir. Çalışmada, doğrultu ve kenar ölçülerinden oluşan bir jeodezik ağ, serbest ve dayalı dengeleme yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sürecinde, doğrultu ve kenar ölçüleri hem tek tek hem de birlikte değerlendirilerek farklı dengeleme yaklaşımlarının etkileri incelenmiştir. Dengeleme sonrası elde edilen güvenilirlik ve duyarlılık ölçütleri, hata ve güven elipsleri ile nokta konum hataları karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları, ağların dengeleme süreçlerinde kullanılan fonksiyonel ve stokastik modellerin, duyarlılık ve güvenilirlik değerleri üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir.

Jeodezik ağların güvenilirliğini değerlendirmede yalnızca dengeleme sonuçları ve doğruluk ölçütleri yeterli olmayıp, fazla ölçü paylarının (redündans) ve matematiksel modelin doğruluğunun da dikkate alınması gerekmektedir. Redündans değerinin artmasıyla birlikte, iç ve dış güvenilirlik ölçütlerinin azaldığı belirlenmiştir. Bu bağlamda, belirlenen test gücüne bağlı olarak hangi büyüklükteki ölçü hatalarının tespit edilebileceği (iç güvenilirlik) ve tespit edilemeyen hataların dengeleme sonuçlarına etkisinin ne düzeyde olacağı (dış güvenilirlik) analiz edilmelidir. Bu bulgular, jeodezik ağların güvenilirliğinin artırılması için redündans seviyesinin, datum noktalarının konumlandırılmasının ve istatistiksel test yöntemleriyle model hatalarının belirlenmesinin büyük önem taşıdığını göstermektedir.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen farklı dengeleme yöntemlerinin karşılaştırılması sonucunda, kenar ve doğrultu ölçülerinin birlikte kullanıldığı ağ modelinin yüksek duyarlıklı bir sonuç verdiği belirlenmiştir. Tek başına kenar ölçülerinin kullanıldığı modellerde hata ve güvenilirlik ölçütlerinin olumsuz yönde etkilendiği, doğrultu ölçülerinin eklenmesiyle birlikte ağın genel güvenilirlik seviyesinin arttığı tespit edilmiştir. Jeodezik ağların güvenilirlik açısından optimize edilmesi için kullanılan matematiksel modelleme yaklaşımlarının büyük önem taşıdığı ortaya konulmuştur. Bu kapsamda, en uygun dengeleme yönteminin seçilmesi, ölçülerde hataların minimize edilmesi güvenilirlik detaylı ve analizlerinin bir şekilde gerekmektedir. Çalışma bulguları, gerçekleştirilmesi farklı modelleme stratejilerinin ağ jeodezik ağlarda güvenilirliği üzerindeki etkilerini anlamada önemli bir katkı sağlamaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] H Konak, Yer merkezli üç boyutlu jeodezik ağlarda datum sorunu. Harita Dergisi, 116:55-61, 1996.
- [2] C. Aydın, N. Arslan ve H. Demirel, Deformasyon analizinde duyarlılık. Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi, 90:12-18, 2004.
- [3] C. Aydın, N. Arslan ve H. Demirel, Kanıtlanamayan kaba hataların deformasyon analizine etkisi. TUJK Scientific Assembly, Zonguldak, Türkiye, 14-16 Ekim 2004.
- [4] M. Yalçınkaya, K. Teke ve T. Bayrak, GPS ile ölçülen jeodezik ağlarda duyarlılık ve güven optimizasyonu. Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Jeodezik Ağlar Çalıştayı, Kony, Türkiye, 24-26 Eylül 2003.

- [5] W.A. Baarda, Testing procedure for use in geodetic networks. Publication on Geodesy, New Series 2, no.5., Netherlands Geodetic Commission, Delft, 1968.
- [6] H. Demirel, Dengeleme hesabı. YTÜ, İstanbul, 2009.
- [7] A.J. Pope, The Statistics of residuals and the detection of outliers. NOAA Technical Report, NOS 65, NGS 1, Rockville, MD, 1976.
- [8] P. Küreç, H. Konak, A priori sensitivity analysis for densification GPS networks and their capacities of crustal deformation monitoring: A real GPS network application. Natural Hazards and Earth System Sciences, 14:1299-1308, 2014. DOI:10.5194/NHESS-14-1299-2014.
- [9] B. Erdogan, An outlier detection method in geodetic networks based on the original observations. Boletim de Ciencias Geodesicas, 20:578-589, 2014. https://doi.org/10.1590/S1982-21702014000300033.
- [10] E. Öztürk, Jeodezik ağlarda güven ölçütleri ve ölçme planının optimizasyonu. KTÜ Yayınları, 87-92, Trabzon, 1982.
- [11] E. Öztürk, Jeodezik ağlarda duyarlık ve güven ölçütleri. Türkiye I. Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 641-671, Ankara, Türkiye, 1987.
- [12] H.B. Papo, Datum accuracy and its dependence on network geometry. International Scientific And Technical Conference, 4-9, 1999.
- [13] H. Demirel, Nirengi ağlarının dengelenmesi ve sonuçlarının test edilmesi. Harita Dergisi, 98: 22-33, 1987.
- [14] C. Demir, EDM aletlerindeki ölçek uyuşumsuzluğunun değişik lineer hipotez testlerle irdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1990.
- [15] B. Erdoğan, Statik deformasyon analizinin güvenilirliğinin yatay kontrol ağlarında araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
- [16] M. Bak, Jeodezik çalışmalarla İzmit Körfezi ve yakın çevresi kabuk deformasyonlarının belirlenmesi.

Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014.

- [17] T. Bayrak, Dengeleme hesabi-II jeodezik ağların dengelenmesi. ISBN:978-605-61712-1-5, Gümüşhane, 2011.
- [18] T. Ayan, Bağıl güven elipsleri ile deformasyon analizi. Harita Dergisi, Sayı 91, 1983.
- [19] W.S. Caspary, Concepts of network and deformation analysis, University of New South Wales. School of Surveying, 1987.
- [20] T. Ayan, Jeodezik ağlarda deformasyon analizine genel bakış. İTÜ. Dergisi, Sayı I, 1982.
- [21] H. Demirel, S-Transformasyonu ve deformasyon analizi. Türkiye I. Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 1987.
- [22] N. Tekin, Jeodezik ağlarda farklı matematiksel modellerin dengeleme sonuçlarına etkilerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2016.
- [23] S. Bülbül, Yatay yöndeki deformasyonların belirlenmesinde bağıl güven elipsleri ve Cholesky çarpanlarına ayırma yönteminin kullanılabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2013.
- [24] G. Even-Tzur, Datum definition and its influence on the sensitivity of geodetic monitoring networks. 12th FIG Symposium, Baden, 22-24 May 2006.
- [25] S. Doğanalp, Kinematik modelde kalman filtreleme yöntemi ile deformasyon analizi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2005.
- [26] U. Dogan, G. Lachapelle, L. Fortes, and S. Ergin, A study of the tectonically active Marmara Region, Turkey, using a Global Positioning System (GPS). Canadian Journal of Earth Sciences, 40:1191-1202, 2003. https://doi.org/10.1139/e03-041.
- [27] https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchan ge/3435-taucv, Accessed 6 January 2025.





NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 775-790 Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araștırma makalesi / Research article

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



Provincial-level analysis of land use changes following the 2023 Kahramanmaraş earthquakes using sentinel-2 land use/land cover time series data

Sentinel-2 arazi kullanımı/arazi örtüsü zaman serisi verileri kullanılarak 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrası arazi kullanımındaki değişimlerin il düzeyinde analizi

Ceren Yağcı¹, Münevver Gizem Gümüş^{2,*}

¹ Osmaniye Korkut Ata University, Geomatics Engineering Department, 80000, Osmaniye, Türkiye
 ² Niğde Ömer Halisdemir University, Geomatics Engineering Department, 51240, Niğde, Türkiye

Abstract

Natural disasters significantly impact human settlements and land use. The February 6, 2023, Kahramanmaraş earthquakes caused extensive changes in land use and land cover (LULC) across 11 provinces in Turkey. This study analyzes these changes using Sentinel-2 LULC time series data from 2022 to 2023. The study area includes Adana, Adıyaman, Diyarbakır, Gaziantep, Hatay, Kahramanmaraş, Kilis, Malatya, Osmaniye, Şanlıurfa, and Elazığ. LULC classifications-agriculture, settlement, bare ground, trees, and water-were analyzed using ArcGIS to assess annual change rates. Results indicate that settlements expanded, especially in Hatay, Gaziantep, and Osmaniye (3-4%), due to post-earthquake reconstruction. Agricultural land increased in Sanlıurfa and Kilis but declined in Elazığ and Adıyaman. Bare ground areas decreased, suggesting erosion control and afforestation efforts. Small increases in water bodies were observed, indicating potential environmental benefits. These findings highlight the importance of sustainable land management and post-disaster planning to mitigate future risks.

Keywords: Disaster management, GIS, LULC, Remote sensing, Sentinel-2

1 Introduction

Natural disasters have long been a major challenge for human settlements, and earthquakes are among the most destructive [1]. One of the most severe earthquakes in recent years struck Turkey on February 6, 2023, with two major shocks originating in Kahramanmaraş. The first earthquake (Mw 7.8) occurred in Pazarcık District and the second (Mw 7.7) in Elbistan District, causing widespread destruction in 11 provinces, including Adana, Adıyaman, Diyarbakır, Gaziantep, Hatay, Kahramanmaraş, Kilis, Malatya, Osmaniye, Şanlıurfa, and Elazığ [2,3]. By 6 March 2023, 1 month after the devastating earthquakes occurred, 1 712 182

Öz

Doğal afetler, insan yerleşimleri ve arazi kullanımı üzerinde önemli değişimlere yol açmaktadır. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri, Türkiye'deki 11 ilde arazi kullanımı ve arazi örtüsünde (LULC) büyük değişimlere neden olmuştur. Bu çalışmada, Sentinel-2 LULC zaman serisi verileri kullanılarak 2022-2023 yılları arasındaki değişimler analiz edilmiştir. Çalışma alanı Adana, Adıyaman, Diyarbakır, Gaziantep, Hatay, Kahramanmaraş, Kilis, Malatya, Osmaniye, Şanlıurfa ve Elazığ illerini kapsamaktadır. Tarım, yerleşim, çıplak arazi, ağaçlık alanlar ve su kaynakları gibi LULC sınıfları ArcGIS yazılımı kullanılarak yıllık değişim oranları açısından değerlendirilmiştir. Sonuçlar, yerleşim alanlarının genişlediğini, özellikle Hatay, Gaziantep ve Osmaniye'de %3-4 oranında arttığını ve bunun yeniden yapılandırma sürecinden kaynaklandığını göstermektedir. Tarım arazileri, Şanlıurfa ve Kilis'te artarken, Elazığ ve Adıyaman'da azalmıştır. Çıplak arazi alanlarının azalması, erozyon kontrolü ve ağaçlandırma çalışmalarına işaret etmektedir. Su kaynaklarındaki küçük artışlar, çevresel sürdürülebilirlik açısından olumlu bir gelişme olarak değerlendirilmiştir. Bu bulgular, sürdürülebilir arazi yönetimi ve afet sonrası planlamanın önemini vurgulamaktadır.

Anahtar kelimeler: Afet yönetimi, CBS, AÖAK, Uzaktan algılama, Sentinel-2

buildings in the 11 affected provinces were checked by the authorities. In total, 35 355 buildings collapsed, 17 491 had to be demolished immediately, 179 786 were seriously damaged, 40 228 were moderately damaged, and 431 421 were slightly damaged [4]. These earthquakes claimed the lives of more than 53 000 people and resulted in the destruction or damage of 1 929 313 residential or rural dwellings in the affected provinces [5].

Uncontrolled land use and unplanned urbanization have played an important role in increasing the risks associated with natural disasters. This situation exacerbates the effects of disasters such as earthquakes and floods, which are frequently experienced in Turkey [6]. The phenomenon of

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: gizemkisaaga@ohu.edu.tr (M. G. Gümüş) Geliş / Received: 08.03.2025 Kabul / Accepted: 27.03.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngumuh.1653751

urbanization in Turkey has been extensively analyzed in the context of natural disaster risks, with studies highlighting how unplanned urbanization exacerbates these risks [7,8].

These studies show that uncontrolled land use and unplanned urbanization are critical factors in increasing the devastating impacts of natural disasters. The rapid expansion of urban areas often takes place at the expense of agricultural land, converting it into residential and industrial zones, while coastal areas are increasingly occupied by seasonal housing developments. Historical evidence from the 1966 Varto, 1967 Adapazarı, 1970 Gediz, and 1999 Marmara earthquakes shows that inappropriate land use is a primary factor in the extent of earthquake-induced damages [3,5]. Similarly, the catastrophic effects of the earthquakes centered in Kahramanmaraş on 6 February 2023 further highlight the consequences of inappropriate site selection for settlements, emphasizing the need for sustainable land use planning and disaster-resilient urban development strategies.

LULC change analysis has emerged as a critical component of post-disaster assessment, providing valuable insights into the spatial dynamics of affected regions. Preand post-earthquake analyses of LULC play a critical role not only in determining physical damage but also in ensuring social, economic, and ecological sustainability [9]. Researchers and land managers can evaluate the impacts of human activities on land use, monitor deforestation or urban expansion, and analyze the effectiveness of land management strategies for socio-economic and environmental development [10]. Such studies not only provide an understanding of a region's ecology and vegetation cover but also enable the assessment of changes, such as the increase in built-up areas, which affect hydrological processes like surface runoff, peak flow characteristics, water quality, and flow patterns [11-13]. For example, post-earthquake LULC assessments have been used to evaluate reconstruction efforts, monitor the expansion of built-up areas, and assess environmental degradation [14,15]. In particular, LULC changes are closely associated with land degradation, loss of agricultural productivity, deforestation, water cycle disruption, and urban sprawl [16,17]. Moreover, the dynamics of LULC influence key ecological functions and socio-economic parameters, such as food security, water availability, and vulnerability to hazards [18,19]. Studies also demonstrate that the characterization of LULC transformations can help evaluate resilience and adaptive capacity in disaster-prone areas. For instance, in the context of the 2005 Kashmir earthquake and the 2015 Nepal earthquake, post-disaster LULC analyses were instrumental in tracking settlement shifts, evaluating environmental impacts, and guiding policy for sustainable reconstruction [20,21]. These examples highlight that LULC change analysis is not only a tool for quantifying physical alterations but also a framework for long-term planning and disaster risk reduction.

The use of remote sensing technologies, especially preand post-earthquake satellite data, to analyze post-disaster land use changes is of great importance in monitoring environmental changes. These technologies provide important insights not only into the extent of physical damage but also into post-disaster regional sustainability and recovery processes [22-26].

In recent years, the high-resolution imagery and frequent transit capabilities of Sentinel-2 satellite data have enabled rapid detection and mapping of environmental changes in disaster areas. In the aftermath of the Lone Pine (California) earthquakes in 2020, the Thessaly (Greece) earthquakes in 2021, and the major earthquakes in Turkev on February 6. 2023, Sentinel-2 satellite data were effectively used, and their rapid analysis capabilities in disaster monitoring processes were emphasized [27]. At the same time, while addressing land use changes in Hatay, one of the provinces most affected by the February 6, 2023, earthquakes in Turkey, another study examined and analyzed post-disaster land use changes in Adana, Mersin, Gaziantep, Hatay, and Kahramanmaraş provinces more comprehensively with Sentinel-2 satellite data [28,29]. Although these studies clearly show how Sentinel-2 satellite data is an effective and important tool in disaster monitoring and assessment processes, post-disaster land use changes in a large geographical area covering 11 provinces have not been addressed in a holistic manner.

This study aims to make a comprehensive assessment of post-disaster settlement reconstruction and regional recovery processes using Sentinel-2 satellite data. In this context, the present study provides a significant and original contribution to the literature through comprehensive LULC change analyses conducted over a broad geographical area encompassing 11 provinces affected by the February 6, 2023 earthquakes. While existing studies are often confined to limited spatial extents, this research distinguishes itself both in terms of its extensive spatial coverage and the adoption of more advanced and innovative methodologies compared to traditional approaches. Specifically, the use of highresolution (10 m) Sentinel-2 satellite imagery, combined with artificial intelligence-based classification algorithms, enables more precise, rapid, and reliable detection of postdisaster environmental changes. This approach facilitates the identification of physical destruction and supports the monitoring of reconstruction processes, the assessment of ecosystem responses, and the analysis of regional sustainability in the aftermath of the disaster. Consequently, the study offers decision-makers a high-accuracy, datadriven, and holistic evaluation framework, which is critical for disaster management, spatial planning, and sustainable development strategies. In this regard, the research aims to make tangible contributions both to the scientific literature and to practical disaster planning and policy-making processes.

2 Material and methods

This study employs an integrated approach combining Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing technologies to detect and analyze LULC changes caused by the 6 February 2023 Türkiye earthquakes. The methodology comprises data acquisition, reclassified, and temporal analysis for change detection is performed. The LULC classification results for the pre- and post-earthquake years are compared. In addition to the percentage change formula, spatial distribution maps are created to examine the effects at different scales. Dynamic maps and thematic layers are generated to visualize the results. Comparisons of changes, both spatial and class-based, are supported by maps and graphs. The Methodology of the study is shown in Figure 1.



Figure 1. Workflow diagram

2.1 Study area

The study area covers 11 provinces in the southern and southeastern regions of Turkey that were affected by two major earthquakes centred in Kahramanmaraş on February 6, 2023. These provinces are Adana, Adıyaman, Diyarbakır, Gaziantep, Hatay, Kahramanmaraş, Kilis, Malatya, Osmaniye, Şanlıurfa, and Elazığ (Figure 2). These regions are of critical importance both in terms of their vulnerability to natural disasters and the changes in land use dynamics due to intensive human activities. The study area is diverse in terms of both physical geography and social structure, providing a unique opportunity to analyze land use changes.

The study area is in the Mediterranean, Eastern Anatolia, and Southeastern Anatolia regions and exhibits different geographical and climatic characteristics. For example, coastal areas such as Adana and Hatay have a Mediterranean climate, while inland areas such as Malatya, Elazığ, and Diyarbakır have continental climates. These climatic differences have a direct impact on land use diversity; there are various land types, such as agricultural areas, areas with trees., rangelands, and residential areas, in the region.

These regions are also areas with a high concentration of active fault lines, which increases the extent of physical and environmental changes that occur after earthquakes. It has been observed that settlements have rapidly expanded, agricultural areas have shrunk, and bare land has increased. Initial assessments after the earthquakes reveal that these land use changes may affect social and economic sustainability in the region and should be considered in disaster management strategies.

2.2 Data collection and processing

In this study, high-resolution Sentinel-2 satellite imagery was used to analyse the effects of the 2023 Kahramanmaraş earthquakes on LULC in 11 provinces. Sentinel-2 is an Earth observation mission developed by the European Space Agency (ESA) under the Copernicus Programme and is designed to monitor changes in the land surface [30].

Sentinel-2 has an instrument called the MultiSpectral Imager (MSI) and collects data in 13 spectral bands in the visible, near infrared, and shortwave infrared spectra. The following table details the band characteristics of Sentinel-2 (Table 1):



Figure 2. 11 Cities affected after the Kahramanmaraş earthquake: spatial distribution of the study area

Bands	Band Name	Wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	Resolution (m)
B1	Coastal Aerosol	442.7	21	60
B2	Blue	492.4	66	10
B3	Green	559.8	36	10
B4	Red	664.6	31	10
B5	Red Edge 1	704.1	15	20
B6	Red Edge 2	740.5	15	20
B7	Red Edge 3 Near	782.8	20	20
B8	Infrared (NIR)	832.8	106	10
B8A	Narrow NIR	864.7	21	20
B9	Water Vapor	945.1	20	60
B10	Cirrus Shortwave	1373.5	31	60
B11	Infrared (SWIR) 1 Shortwave	1613.7	91	20
B12	Infrared (SWIR) 2	2202.4	175	20

 Table 1. Sentinel-2 spectral band characteristics [30]

The data were obtained through the 'Sentinel-2 10m Land Use/Land Cover Time Series' dataset available through ArcGIS Living Atlas of the World [31]. This dataset is derived from ESA Sentinel-2 imagery and provides global land use and land cover classifications at 10-meter resolution. The dataset is updated annually as of 2017 and produced by automatic classification methods using cloud computing platforms. The classified maps include Version 003 of the global Sentinel-2 land use/land cover data product. They are produced by a deep learning model trained using over five billion hand-labeled Sentinel-2 pixels sampled from more than 20,000 locations. In this way, it allows monitoring changes in land use. The class definitions of this dataset are given in Table 2.

In the study, the relevant dataset was analysed in detail through ArcGIS Living Atlas. The dataset contains land use/cover classifications provided by Sentinel-2 at 10 m spatial resolution. Considering the relevant provincial borders (Adana, Adıyaman, Diyarbakır, Gaziantep, Hatay, Kahramanmaraş, Kilis, Malatya, Osmaniye, Şanlıurfa, Elazığ), the data were downloaded in GeoTIFF format. The downloaded raster data were transferred to ArcGIS 10.8 environment. The data were georeferenced using a standard coordinate system (WGS 1984 UTM Zone 37N). The study area was cut to be within the administrative boundaries of 11 provinces using the Extract by Mask tool and only the data belonging to the study area were obtained.

The main reason for using classified data from the Atlas Living platform in the study is that the changes in land use before and after the disaster can be detected in detail thanks to the high spatial and spectral resolution specified in the technical specifications. The 10 m resolution classified images used made it possible to make detailed classifications, especially in urban and agricultural areas. The land use/cover classifications in the dataset were converted into nine main categories (water, trees, flood vegetation, crops, built area, bare ground, snow/ice, and clouds) in accordance with the scope of the research. In 2022 and 2023, reclassification was performed to correct minor classification inconsistencies in the data. The 12-bit radiometric depth of Sentinel-2 data ensured high data quality and level of detail. In addition, ground control using ArcGIS 10.8 software was supplemented with recent high-resolution imagery from Google Earth Pro to confirm the accuracy of the classifications in the dataset.

 Table 2. Sentinel-2 10m Land Use/Land Cover Time Series

 class definitions [31]

Value	Name	Description
		Predominantly water-covered areas,
1	Water	including rivers, lakes, oceans, and
		flooded salt plains.
		Dense, tall vegetation (~15+ feet),
2	Trees	including wooded areas, plantations, and
		mangroves.
	Floodad	Seasonally flooded areas with mixed
4	Vegetation	vegetation; includes rice paddies and
	vegetation	emergent wetlands.
		Human-planted cereals and crops (not
5	Crops	trees); includes corn, wheat, soy, and
		fallow fields.
		Human-made structures and
7	Built Area	infrastructure, including roads, cities, and
		paved surfaces.
8	Bara Ground	Areas with little to no vegetation, such as
0	Bale Glound	deserts, exposed rock, and dry salt flats.
		Permanent snow or ice, typically in
9	Snow/Ice	mountains or polar regions (e.g., glaciers,
		snowfields).
10	Clouds	Areas without land cover data due to
10	Clouds	persistent cloud cover.
		Open grasslands with sparse vegetation,
11	Rangeland	including natural meadows, pastures, and
	-	savannas

2.3 Change detection analysis

To detect and quantify LULC changes for each class at the district level, the following formula can be used. This example focuses on various LULC classes such as water, trees, submerged vegetation, agricultural areas, built-up areas, bare ground, snow/ice, clouds, etc. LULC Percentage Change Formula is presented Equation (1) [32]:

$$Percentage \ Change = \frac{Area \ final - Area \ initial}{Area \ initial} * 100$$
(1)

Where "Area_initial" refers to the total area of a specific LULC class at the beginning of the observation period, and "Area_final" denotes the same at the end. This formula provides a robust framework for detecting and quantifying shifts in land use and cover over time.By employing Sentinel-2 data, spatial changes induced by the earthquakes were identified and quantified at macro and micro scales. While macro-scale analysis provided an overarching view of regional dynamics, micro-scale assessments revealed localized impacts that were less discernible at larger scales. Dynamic maps and statistical outputs highlighted changes in key areas, including urban zones, agricultural lands, and natural habitats.

This methodological approach offers significant insights into the spatial and temporal dynamics of LULC changes in disaster-affected areas. The findings contribute to sustainable urban planning, disaster recovery, and land management strategies by revealing critical patterns and trends in land use changes triggered by the earthquakes.

In the study, the differences between the 2022 and 2023 LULC maps were calculated using the Raster Calculator tool, thus determining the changes in land cover. Zonal statistics analysis was performed to calculate the size (in km²) of the changing areas for each province. Finally, for visualisation purposes, choropleth maps and graphs were created, highlighting in particular urban expansion, agricultural changes, and deforestation trends. For each category, the changing areas are shown.

3 Results and discussions

In this study, the LULC changes in 11 provinces in the south and southeast of Turkey due to the February 6, 2023, Kahramanmaras earthquakes were examined in detail. It has revealed important findings for understanding post-earthquake land use dynamics and developing sustainable disaster management strategies. Using Sentinel-2 satellite imagery and GIS, this analysis aims to provide critical data for post-disaster land use planning by revealing the magnitude and distribution of both spatial and temporal changes. In particular, the research focused on identifying the regional characteristics of changes such as decreasing agricultural land, expanding settlements, and increasing

proportions of bare land. Figure 5 showing land use and land cover changes and Figure 3 and Figure 4, which present the percentage distribution for the years 2022 and 2023, clearly show that settlements have expanded after the earthquake, while agricultural and natural areas have decreased.











Figure 5. LULC change map for 11 provinces between 2022-2023

3.1 Water class changes and maps in post-earthquake land use

Post-earthquake land use changes in water class have varied due to various factors such as regional environmental conditions, infrastructure status, and management policies. When these changes are analysed on a provincial basis, it is observed that there are both increasing and decreasing trends.

In Elazığ, an increase of 0.6% was observed in water areas (Figure 6). This increase is associated with the postearthquake environmental recovery process and more effective management of water resources. The measures taken by local governments to protect natural resources after the earthquake can be considered one of the main reasons for this increase. This shows that water resources in Elazığ were successfully protected and managed during the postearthquake recovery process. Small increases in water surfaces were also recorded in Diyarbakır, Adıyaman, Malatya, and Hatay. These increases are considered a result of ongoing efforts to protect natural water resources and environmental sustainability policies. The rebalancing of ecosystems after the earthquake and the impact of local climatic conditions are among the factors supporting the expansion of water surfaces in these regions. In Adana, Osmaniye, Kahramanmaraş, and Hatay, there has been no significant change in water areas. The fact that existing water resources remain stable indicates that ecosystem balance is maintained, and environmental degradation is limited in these regions. The preservation of agricultural water resources, especially in regions such as Adana and Hatay, indicates stability in water management. This indicates that the existing infrastructure in the region is functioning effectively, and water management policies are properly

implemented. In Gaziantep and Kilis, a 0.1% decrease in water area was observed. This decrease indicates that pressure on water resources is increasing and local environmental conditions need to be carefully monitored. Resettlement processes in the region, partial damage to infrastructure, and increasing agricultural needs are among the possible reasons for these decreases. Protection of water resources and implementation of sustainable policies are crucial to mitigate the impacts of these reductions and ensure long-term water security. The percentage changes in water surfaces across the 11 provinces between 2022 and 2023 are presented in detail in Figure 3 and 4.

Overall, the analysis of post-earthquake water class changes shows that the environmental and infrastructural dynamics of each province are influential. Increases in water areas in and around Elazig are considered a positive indicator of environmental recovery, while decreases in Gaziantep reveal the measures that need to be taken in terms of water management and environmental sustainability (Figure 7). In provinces such as Adana, Osmaniye, and Hatay, no change in water areas was observed, indicating that the existing ecosystem balance was maintained. These findings provide important data for shaping post-disaster water resources management and environmental sustainability policies. Specific plans should be developed for the water resources management of each province, and these plans should be adapted according to post-disaster needs. Such analyses provide a scientific basis for protecting water resources and ensuring sustainable development.

The increase in the amount of water in the Palu district of Elazığ after the earthquake and the decrease in the amount of water in Gaziantep after the earthquake are clearly demonstrated visually on the maps (Figure 7).



Figure 6. Percentage change in water coverage (2022-2023) across 11 provinces



Figure 7. Post-earthquake water class changes and spatial reflections in Elazığ / Gaziantep

3.2 Change of trees class in post-earthquake land use

Post-earthquake changes in the tree class varied between 2022 and 2023 in line with local environmental conditions and land use dynamics. Changes in wooded areas were shaped by various factors such as ecosystem balance, environmental sustainability practices, and reconstruction processes in each province. The analysis of these changes was evaluated on a spatial and percentage basis, and the findings are visualized in Figure 8. Small increases in wooded areas were observed in Adıyaman, Diyarbakır, Elazığ, Gaziantep, and Kilis. Especially in Gaziantep and Kilis provinces, an increase of 0.3% was recorded, which is considered a positive development in terms of environmental sustainability. This can be attributed to the local governments' implementation of policies focused on environmental protection and the realization of restructuring processes in line with the principle of protecting natural resources. Moreover, these increases indicate that the natural ecosystems in the regions have experienced positive impacts during the post-earthquake recovery process. In Malatya and Şanlıurfa provinces, there was no significant change in wooded areas. This indicates that the ecosystem balance in the region is maintained, and environmental conditions are stable. The fact that wooded areas have remained stable indicates that strategies for the conservation of natural resources are effectively implemented in these provinces. In Adana, Hatay, Kahramanmaras, and Osmaniye, on the other hand, declines in wooded areas were observed.1.5% decrease was recorded in Hatay and a 1.4% decrease in Adana. These reductions indicate that post-earthquake reconstruction processes were carried out in a way that could lead to the conversion of in areas with trees into residential or agricultural areas. Moreover, these reductions are directly linked to local environmental impacts and land use dynamics. Increasing settlement and infrastructure needs after the earthquake is one of the main factors contributing to the decline in areas with trees. Overall, the assessment of changes in tree class shows how regional differences have an impact on the management of natural resources. While small increases in wooded areas in provinces such as Gaziantep and Kilis reveal the positive effects of sustainable practices, decreases in provinces such as Hatay and Adana emphasize the need to protect natural resources and increase afforestation efforts. These findings suggest that postdisaster land use policies should be reshaped in line with the principles of maintaining ecosystem balance and sustainable management of natural resources. Woodland conservation is critical for regional ecological sustainability and natural resource management.

After the earthquake, the decrease in tree class in Adana and the increase in Kilis (Figure 9) were spatially revealed through maps.



Figure 8. Percentage change in tree coverage (2022-2023) across 11 provinces



Figure 9. Post-Earthquake tree class changes and spatial reflections in Adana/Kilis

3.3 Change of crops class in land use after earthquake

In the one year following the earthquake, it was observed that agricultural activities in the 11 affected provinces accelerated in some regions, while agricultural areas shrank in others due to local dynamics and reconstruction processes. The agricultural sector is critical for economic and social recovery, especially in rural areas. Therefore, it is important to assess the changes in agricultural land not only in terms of percentages but also in terms of long-term impacts and regional economic dynamics.

Agricultural areas increased in Şanlıurfa, Kilis, Diyarbakır, Gaziantep, and Malatya. This increase was particularly remarkable in Şanlıurfa (8.5%) and Kilis (5.2%) (Figure 10). This shows that regional agricultural policies are being implemented effectively and economic mobility in rural areas continues. In provinces with large agricultural production potential, such as Şanlıurfa, the increase in agricultural area contributes positively to both economic recovery and regional food security. Similarly, the increase in Kilis can be considered an important development in terms of rural development and economic sustainability. Smaller increases were also observed in Diyarbakır, Gaziantep, and Malatya, emphasizing the importance of agricultural activities in rural areas in the recovery process. Adana and Hatay provinces did not experience a significant change in agricultural areas. This indicates that agricultural production in these provinces is maintained in a balanced manner and ecosystem balance is preserved. The fact that agricultural areas have remained stable indicates that the existing agricultural infrastructure in the region is robust, and agricultural activities have continued without interruption in the post-earthquake period. On the other hand, a decrease in agricultural areas was observed in Kahramanmaraş, Elazığ, Adıyaman, and Osmaniye provinces. A decrease of 1.4% was recorded in Elâzığ and 1.5% in Adıyaman. These decreases are attributed to factors such as restructuring processes, urban transformation activities, and the conversion of agricultural areas into residential areas. This once again shows how critical it is for rural development to protect and support agricultural areas. During the restructuring process, ensuring the sustainability of agricultural production and increasing investments in agricultural infrastructure should be a strategic priority for economic recovery in these regions.



Figure 10. Percentage of 2022-2023 Crops in 11 Provinces



Figure 11. Changes in agriculture class and spatial reflections after the earthquake in Elazig/Şanlıurfa
Overall, changes in agricultural areas provide important data for assessing the effectiveness of agricultural sustainability and post-disaster recovery policies. In regions where agricultural areas are expanding, it is important to maintain existing policies and make these increases permanent. On the other hand, in regions with decreasing agricultural areas, it is necessary to reorganize land use policies, take strategic steps to encourage agricultural production, and adopt sustainable development policies. These analyses shed light on future planning to protect and strengthen agricultural areas.

The increase in agricultural areas and decrease in rangelands in Şanlıurfa after the earthquake, and the decrease in agricultural areas and increase in residential areas in Elazığ after the earthquake are shown spatially on the maps (Figure 11).

3.4 Change of built area class in land use after earthquake

Post-earthquake changes in the "built area" class in 11 provinces reflect the expansion of settlement areas and reconstruction processes. These changes varied depending on the demographic and economic dynamics of the provinces, infrastructure requirements, and post-disaster recovery processes. While increases in settlement areas were evident in regions where reconstruction efforts were intensified and urbanization pressure increased, some provinces experienced contraction or conversion of existing settlement areas to different land use types.

Hatay province recorded an increase of 4%. This reflects the rapid reconstruction activities in the region and the expansion of residential areas to respond to the growing housing need. The reconstruction of heavily damaged buildings after the earthquake and the creation of new residential areas are among the main reasons for this increase. Increases of 3% in Gaziantep and Osmaniye indicate that urbanization pressures continue, and new residential areas are being created to meet the housing, and infrastructure demands in these provinces. These increases are important in terms of showing how urbanization dynamics are combined with restructuring processes. In Adıyaman, Adana, Elazığ, and Diyarbakır, an increase of 1% was recorded. These rates reveal that settlements in these provinces have expanded at a more limited scale, and urban growth has continued at local scales. Lower rates of increase in these provinces may indicate that restructuring processes are still in their early stages or that urbanization pressure remains at a lower level. On the other hand, Sanliurfa and Kilis provinces experienced a 1% decrease in settlements. This reduction may be associated with the conversion of existing settlements to other land use types or population shifts to different regions in resettlement processes. Moreover, these decreases may indicate that reconstruction and urbanization processes in some regions have progressed more slowly than expected.

In general, these changes observed in the post-earthquake "built areas" class clearly reveal that post-disaster reconstruction processes and urbanization dynamics differ across provinces. While the expansion in settlement areas can be considered an indicator of reconstruction processes, planning this expansion in a sustainable manner is critical in terms of infrastructure management and control of environmental impacts. On the other hand, in regions with shrinking settlement areas, analyzing the causes of this situation and making the necessary policy adjustments are important for the success of post-disaster development and reconstruction processes. A detailed analysis of these changes provides a valuable source of information for future disaster management and urban planning processes. Postearthquake changes in settlement areas have revealed the rates of expansion and contraction in 11 provinces between 2022-2023, and these data are presented in detail in Figure 12.

The 4% increase in the settlement class in Hatay and the 3% increase in Gaziantep indicate the expansion and reconstruction processes in the settlement areas in both provinces, and these changes are clearly monitored spatially through the maps (Figure 13).



Figure 12. Percentage 2022-2023 built areas in 11 provinces



Figure 13. Post-Earthquake settlement class changes and spatial reflections in Hatay/Gaziantep

3.5 Changes in bare ground class in post-earthquake land use

In the post-earthquake period, the changes observed in bare ground areas in 11 provinces were shaped by natural processes and anthropogenic interventions. The decrease in bare ground areas in some regions can be considered an indicator of environmental improvement efforts and increased agricultural activities. These changes are presented in detail in Figure 14 in terms of percentages between 2022 and 2023.

In Hatay, Osmaniye, Adana, and Sanlıurfa, there has been no significant change in bare ground areas. This indicates that a balanced structure of land use is maintained in these provinces and natural processes remain stable. The steady state in these regions indicates that environmental factors have not changed and current use continues in a sustainable manner. In the provinces of Kahramanmaraş, Gaziantep, Malatya, and Diyarbakır, there has been a decrease in bare ground areas. These decreases are associated with the expansion of settlements, restructuring processes, and increased agricultural activities. Restructuring processes seem to be effective in reducing bare ground areas in these regions. This change reflects the impact of both natural and social processes on land use. Elazığ and Adıyaman stand out as the provinces with the most significant decrease in bare ground areas. A 3% decrease was recorded in Elazığ and a 2% decrease in

Adıyaman. These decreases can be explained by the impact of environmental improvement activities such as erosion control and afforestation work and increased agricultural activities. Such activities in the region contribute to both the conservation of natural ecosystems and the sustainable development of local economic activities.

In general, the changes in bare ground areas show that post-disaster recovery processes are different in different regions. In provinces that experienced a decrease, environmental remediation efforts and reconstruction were effective, while in regions that experienced an increase, agricultural activities and expansion of settlement areas were prominent. This clearly demonstrates how post-disaster reconstruction processes and urban growth interact with environmental factors. These findings emphasize the importance of planning local land management policies in line with environmental sustainability principles.

The post-earthquake reduction of wastelands in Elazığ and Adıyaman has manifested itself in the conversion to rangeland areas, especially around water sources. This change is associated with environmental regulations supporting erosion control and animal husbandry and is considered a positive development for sustainable land use (Figure 15).



Figure 14. Percentage of bare ground in 11 provinces (2022-2023)



Figure 15. Changes in Bare Ground class and spatial reflections after the earthquake in Adıyaman/Elâzığ

3.6 Change of Rangeland Class in Land Use After Earthquake

In the post-earthquake period, rangeland areas in 11 provinces experienced various changes because of different dynamics. These changes were shaped by urbanization, agricultural activities, and sustainable land management policies. The percentage distribution of changes in rangeland areas is presented in detail in Figure 16. There was a 4% increase in rangeland areas in Elazığ and a 3% increase in Kahramanmaraş. These increases are considered positive

developments that support sustainable land management and livestock breeding activities. Similarly, increases of 1.7% were observed in Osmaniye and 1.1% in Hatay. These increases reflect efforts to maintain environmental balance and strengthen agricultural activities. There has been no significant change in rangeland areas in Adıyaman, indicating the stability of existing rangeland areas and the preservation of natural ecosystems. On the other hand, a small decrease of 0.8% in rangeland areas was recorded in Adana. Significant decreases of 8.4% were observed in Şanlıurfa and 5.4% in Kilis. These decreases are mainly attributed to the conversion of rangelands to agricultural land. The 3.4% decrease in Gaziantep is an indication of the transformation of settlements and urban growth pressures. Malatya and Diyarbakır experienced more limited decreases of 1.2%, indicating a slight pressure on natural ecosystems. Overall, changes in rangeland areas reveal regional differences in post-disaster reconstruction processes. In regions where rangeland areas have expanded, sustainable land management and livestock breeding activities seem to have yielded positive results. On the other hand, agricultural activities and urbanization pressures have negative impacts on natural areas in regions with decreasing rangelands. These findings emphasize that post-disaster land management and planning should be balanced with the protection of natural areas and sustainable economic activities. Figure 16 provides a critical dataset for spatial and quantitative analysis of these changes.

The post-earthquake decreases in rangeland areas and increase in crops in Şanlıurfa, and the post-earthquake decrease in rangeland areas and increase in crops in Kilis can be explained by the conversion of rangelands to agriculture and the increasing need for agriculture (Figure 17).



Figure 16. Percentage 2022-2023 range land in 11 provinces



Figure 17. Rangeland Class Changes and Spatial Reflections after Kilis / Şanlıurfa Earthquake

3.7 Change of other classes in land use after the earthquake

The changes observed in other land use classes in the post-earthquake period provide a limited but meaningful assessment. No significant change was recorded in the flooded vegetation class in both years. This suggests that areas falling into this category are either absent or have not changed in all the provinces surveyed. Similarly, no change was observed in the snow/ice and clouds classes (0.0%). This implies that these categories do not have a significant presence in the studied regions and therefore do not have a significant impact on land use.

4 Discussion

The earthquakes that occurred on February 6, 2023, centered in Kahramanmaraş, caused extensive destruction, particularly in the provinces of Hatay, Gaziantep, and Kahramanmaraş, and significantly accelerated urbanization and reconstruction processes across the affected regions. In Gaziantep and Hatay, rapid urban expansion was observed, likely driven by their strong economic infrastructures. In contrast, Şanlıurfa and Kilis exhibited notable increases in agricultural land use, indicating the persistence of economic activity in rural settings. In Elazığ, a substantial rise in water bodies was detected, while in both Elazığ and Adıyaman, reductions in barren land were accompanied by conversions to rangeland, particularly in areas surrounding water bodies. This transition can be interpreted as a positive development in terms of natural resource recovery and environmental sustainability. Other provinces exhibited more limited land use changes; however, a general trend of increasing urbanization was apparent, often counterbalanced by decreases in rangeland areas.

Notably, some regions showed agricultural expansion and environmental improvements, which had beneficial impacts in the post-disaster context. The preservation and enhancement of agricultural and rangeland areas, particularly in provinces with less urbanization pressure, present a promising trend with respect to long-term environmental sustainability. The integration of spatial and quantitative tools-specifically, change detection maps and bar charts-enabled a comprehensive analysis of LULC transformations. While maps effectively visualized the spatial extent and intensity of these changes, graphs provided deeper insight into the proportional distribution of land use transitions. This combined approach offers a robust dataset that is critical for informed spatial planning and sustainable land management in the aftermath of large-scale natural disasters.

Beyond the findings of this study, the broader literature underscores that natural disasters—particularly earthquakes, floods, and wildfires—induce both short- and long-term changes in land use patterns, thereby influencing ecosystem transitions and post-disaster recovery trajectories. The magnitude of change is largely shaped by the severity of the disaster and the geographical context, whereas post-disaster planning plays a pivotal role in promoting environmental sustainability and long-term resilience. For instance, the 1999 Marmara Earthquake in Turkey led to accelerated urbanization and the expansion of industrial zones, consequently exacerbating environmental risks [33]. Similarly, the 2001 Bhuj Earthquake in India resulted in significant loss of agricultural lands, although rural development initiatives and infrastructure improvements contributed to economic recovery [14]. The 2011 Tōhoku Earthquake and Tsunami in Japan caused massive urban reconstruction, yet the destruction of agricultural areas posed serious threats to environmental sustainability [34]. The 2008 Wenchuan Earthquake in China severely damaged agricultural and forested areas, but large-scale ecological restoration and disaster management policies subsequently accelerated environmental rehabilitation [35].

The 2023 Kahramanmaraş earthquakes exhibited similar dynamics. Post-disaster processes led to a rapid expansion of residential zones, particularly in urban areas, resulting in the loss of agricultural lands and posing significant challenges to the conservation of natural resources. These shifts entail not only economic losses but also serious risks for long-term environmental sustainability. Changes in land use following disasters often have interconnected social, economic, and ecological consequences that are critical to achieving sustainable development goals. The agricultural sector, along with key industries such as textiles and steel, suffered significant production disruptions, supply chain failures, and raw material shortages, all of which negatively affected the national economy. As noted by Sabırsız and Şöhret [36], the transformation of agricultural lands resulted in a decline in production and employment, with potentially adverse implications for long-term economic growth. Given that the earthquake-affected provinces represent a significant share of Turkey's gross domestic product-especially in the agricultural and industrial sectors-the Kahramanmaraş earthquakes triggered both regional and national economic disruptions. Although financial support provided by the Ministry of Agriculture and Forestry played a vital role in short-term economic recovery, more comprehensive and long-term strategies are required to mitigate the multifaceted impacts of such disasters.

In conclusion, the findings of this study not only provide empirical evidence of post-earthquake LULC changes in southeastern Türkiye but also highlight the importance of integrating geospatial technologies with socio-economic and environmental considerations. Future research should continue to explore the complex interrelationships between disaster dynamics, land use change, and sustainable recovery, particularly in regions prone to high seismic risk.

5 Conclusions

This study provides a comprehensive analysis of land use changes following the February 6, 2023 Kahramanmaraş earthquakes, highlighting their social, economic, and environmental impacts. The findings offer valuable insights for planning post-disaster reconstruction processes in a more sustainable and resilient manner. Uncontrolled expansion of settlement areas and the reduction of agricultural lands pose significant long-term risks, such as environmental degradation and economic losses. Therefore, protecting agricultural areas and planning settlements based on scientific risk assessments and active fault line analysis are critical steps for sustainable land use in disaster-affected regions.

The observed increase in bare soil areas raises concerns about heightened risks of erosion and environmental degradation. Ecosystem-based approaches should be prioritized for rehabilitating natural areas, including afforestation and re-vegetation efforts to enhance environmental recovery. Strengthening agricultural infrastructure and promoting sustainable agricultural practices are also crucial to preventing production losses and maintaining the ecological and economic value of agricultural lands.

The use of Sentinel-2 satellite imagery in this study demonstrated the effectiveness of remote sensing technologies in analysing large-scale changes rapidly and in detail. High-resolution satellite data enhances spatial accuracy and enables the detection of fine-scale changes, providing critical data for informed decision-making in disaster management. Such technologies are indispensable for both immediate response efforts and long-term urban planning.

In conclusion, this study offers a spatial and quantitative foundation for improving disaster management and sustainable development strategies. The effective integration of remote sensing and GIS can lead to more efficient disaster management processes while contributing to the conservation of natural resources and the development of resilient cities. These findings underscore the importance of data-driven approaches in planning and implementing postdisaster recovery efforts.

Acknowledgment

The authors gratefully acknowledge the United States Geological Survey (USGS) for providing open-access Sentinel-2 imagery and ESRI for offering AI-based Land Use/Land Cover (LULC) time series data via the Living Atlas of the World. These datasets significantly supported the spatial analyses in this study.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 11%

References

- [1] H.E. Huppert and Sparks R.S.J., Extreme natural hazards: Population growth, globalization and environmental change, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 364(1845), 1875–1888, 2006. https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1803
- [2] USGS (United States Geological Survey), Earthquake hazards program: Earthquake map. https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/9, Accessed 12 December 2024.
- [3] AFAD, Human-induced disasters. Republic of Turkey Ministry of Interior Disaster and Emergency

Management Authority, Disaster and Emergency Training Center. https://www.afad.gov.tr/afadem/insan -kaynakli-afetler. Accessed 12 December 2024.

- [4] M. Marangoz and Ç. İzci, Doğal afetlerin ekonomik, sosyal ve çevresel etkilerinin 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş merkezli depremler bağlamında girişimciler açısından değerlendirilmesi. Sosyal ve Beşeri Bilimler Araştırmaları Dergisi, 24(52), 1-30, 2023.
- [5] Türkiye Recovery and Reconstruction Assessment (TERRA), Türkiye earthquakes recovery and reconstruction assessment. Report with the support of the United Nations and the European Union, with select inputs from World Bank staff. <u>https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/03/T</u> <u>urkiye-Recovery-and-Reconstruction-Assessment.pdf</u> Accessed 13 January 2025.
- [6] İ. Tapan, The impacts of the Kahramanmaraş-centered earthquakes (February 6, 2023) on settlements in the Malatya Plain. Electronic Turkish Studies, 19(3), 2024.
- [7] K. Alğın Demir and N. Karataş, Temporal and spatial evaluation of the disaster phenomenon in urban planning: The case of Torbalı district. Turkish Earthquake Research Journal, 6(1), 98–122, 2024. https://doi.org/10.46464/tdad.1405733
- [8] F.N. Genç, Türkiye'de doğal afet riskleri ve kentleşme. Proceedings of the TMMOB Disaster Symposium, pp. 381–406, Ankara, Türkiye, Aralık 2007.
- [9] K.A.M. Al-Zangana, Determining land use and land cover changes using GIS and remote sensing: The case of Kalar region. Master Thesis, Aksaray University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Aksaray, Turkey, 2017. https://acikerisim.aksaray.edu. tr/xmlui/handle/20.500.12451/1958.
- [10] A. Bag, A. Sharma, and S. Pal, Studying urbanization pattern in Sambalpur City during 1992-2042 using CA-ANN, and Markov-Chain model. International Journal of Engineering and Geosciences, 9(3), 356-367, 2024.
- [11] E.D. Ashaolu, J.F. Olorunfemi and I.P. Ifabiyi, Assessing the spatio-temporal pattern of land use and land cover changes in Osun drainage basin, Nigeria. Journal of Environmental Geography, 12(1-2), 41-50, 2019.
- [12] U.E. Msovu, D.M. Mulungu, J.K. Nobert and H. Mahoo, Land use/cover change and their impacts on streamflow in Kikuletwa Catchment of Pangani River Basin, Tanzania. Tanzania Journal of Engineering and Technology, 38(2), 171-192, 2019.
- [13] M. Kamaraj and S. Rangarajan, Predicting the future land use and land cover changes for Bhavani basin, Tamil Nadu, India, using QGIS MOLUSCE plugin. Environmental Science and Pollution Research, 29(57), 86337-86348, 2022. https://doi.org/10.1007/s11356-021-17904-6
- [14] G. Balamurugan and M.J.D.A. Aravind, Land use land cover changes in pre-and post-earthquake affected area using Geoinformatics–Western Coast of Gujarat, India. Disaster Advances, 8(4), 1–14, 2015.

- [15] O. Satir, S. Kemec, O. Yeler et al., Simulating the impact of natural disasters on urban development in a sample of earthquake. Natural Hazards, 116, 3839–3855, 2023. https://doi.org/10.1007/s11069-023-05838-w
- [16] E. Purswani, B. Pathak, D. Kumar, and S. Verma, Land-use change as a disturbance regime. In: Environmental Concerns and Sustainable Development: Volume 2: Biodiversity, Soil and Waste Management,127–144, 2020. https://doi.org/10.10 07/978-981-13-6358-0_6
- [17] Y.H. Mir, S. Mir, M.A. Ganie, J.A. Bhat, A.M. Shah, M. Mushtaq, and I. Irshad, Overview of land use and land cover change and its impacts on natural resources. In: Ecologically Mediated Development: Promoting Biodiversity Conservation and Food Security, pp. 101– 130, Springer Nature Singapore, Singapore, 2025. https://doi.org/10.1007/978-981-96-2413-3_5
- [18] E. Garedew, Land-use and land-cover dynamics and rural livelihood perspectives, in the semi-arid areas of Central Rift Valley of Ethiopia. Doctoral Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, No. 2010:7, 2010.
- [19] S. Yousafzai, R. Saeed, G. Rahman, and S. Farish, Spatio-temporal assessment of land use dynamics and urbanization: Linking with environmental aspects and DPSIR framework approach. Environmental Science and Pollution Research, 29(54), 81337–81350, 2022. https://doi.org/10.1007/s11356-022-21393-6
- [20] B. Rimal, L. Zhang, D. Fu, R. Kunwar, and Y. Zhai, Monitoring urban growth and the Nepal earthquake 2015 for sustainability of Kathmandu Valley, Nepal. Land, 6(2), 42, 2017. https://doi.org/10.3390/land6020 042
- [21] M.F. Iqbal and I.A. Khan, Spatiotemporal land use land cover change analysis and erosion risk mapping of Azad Jammu and Kashmir, Pakistan. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 17(2), 209–229, 2014. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2014.09. 004P.
- [22] Cui, Y.M. Lin and C. Chen, Destruction of vegetation due to geo-hazards and its environmental impacts in the Wenchuan earthquake areas. Ecological Engineering, 44, 61–69, 2012. https://doi.org/10.1016/ j.ecoleng.2012.03.012
- [23] B. Nath, Z. Niu and R.P. Singh, Land use and land cover changes, and environment and risk evaluation of Dujiangyan city (SW China) using remote sensing and GIS techniques Sustainability, 10, 4631, 2018. https://doi.org/10.3390/su10124631
- [24] G. Balamurugan and M. Aravind, Land use land cover changes in pre-and post-earthquake affected area using geoinformatics–Western coast of Gujarat, India. Disaster Advances, 2015.
- [25] C. Zhong, C. Li, P. Gao and H. Li, Discovering vegetation recovery and landslide activities in the Wenchuan earthquake area with Landsat imagery.

Sensors. 21(15), 5243, 2021. https://doi.org/10. 3390/s21155243

- [26] J. Kang, Z. Wang, H. Cheng, J. Wang and X. Liu, Remote sensing land use evolution in earthquakestricken regions of Wenchuan County, China. Sustainability, 14(15), 9721, 2022. https://doi.org/10. 3390/su14159721
- [27] M. Taftsoglou, S. Valkaniotis, G. Papathanassiou and E. Karantanellis, Satellite imagery for rapid detection of liquefaction surface manifestations: The case study of Türkiye–Syria 2023 earthquakes. Remote Sensing, 15(17),4190, 2023. https://doi.org/10.3390/rs15174190
- [28] O. Aksu and A. Karlıkanovaıte-Balıkcı, Earthquakes in Kahramanmaraş; Assessment of affected areas and recommendations for settlement regeneration. The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics, 26, 404–415, 2023. https://doi.org/10.55549/epstem.1411039
- [29] N. Civelek, M. İnalpulat and L. Genç, Evaluation of earthquake impacts on land use and land cover (LU/LC) using Google Earth Engine (GEE), Sentinel-2 imageries, and machine learning: Case study of Antakya. Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences, 8(4), 642–650, 2023. https://doi.org/ 10.35229/jaes.1349826
- [30] European Space Agency (ESA), Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for land monitoring. European Space Agency. https://www.esa.int, Accessed 17 December 2024.
- [31] ESRI, Living atlas of the world. ArcGIS Online. https://livingatlas.arcgis.com, Accessed 14 December 2024.
- [32] G.N. Vivekananda, R. Swathi and A.V.L.N. Sujith, Retracted article: Multi-temporal image analysis for LULC classification and change detection. European Journal of Remote Sensing, 54(sup2), 189–199, 2021. https://doi.org/10.1080/22797254.2020.1771215
- [33] C. Aydöner and D. Maktav, The role of the integration of remote sensing and GIS in land use/land cover analysis after an earthquake. International Journal of Remote Sensing, 30(7), 1697–1717, 2009. https://doi.org/10.1080/01431160802642289
- [34] M. Ishihara and T. Tadono, Land cover changes induced by the Great East Japan Earthquake in 2011. Scientific Reports, 7, 45769, 2017. https://doi.org/10.1038/srep45769
- [35] J. Kang, Z. Wang, H. Cheng, J. Wang, and X. Liu, Remote sensing land use evolution in earthquakestricken regions of Wenchuan County, China. Sustainability, 14(15), 9721, 2022. https://doi.org/10.3390/su14159721
- [36] E. Sabırsız and M. Şöhret, 6 Şubat depremlerinin Türkiye ekonomisi üzerindeki makroekonomik, sosyal ve çevresel etkileri. Akademik Yaklaşımlar Dergisi, 15(1-Deprem Özel Sayısı), 571–597, 2023. https://doi.org/10.54688/ayd.1390984





NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 791-802 Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araștırma makalesi / Research article

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



Sismik yükler altında yapı-kazık-zemin etkileşimi kapsamında kinematik ve eylemsizlik etkileşim analizlerinin Plaxis-3D sonlu elemanlar programıyla modellenmesi-Bir vaka analizi

Modeling of kinematic and inertial interaction analyses within the scope of structure-pile-soil interaction under seismic loads using plaxis-3d finite element program- A case study

Fatih Çelik^{1,*}🝺

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

Öz

Kazıklı radye temel sistemleri yardımıyla üst yapıdan gelen yükler güvenle sağlam zeminlere aktarılmaktadır. Deprem kuvvetleri altında kazıklı radye tasarımları Yapı-Kazık-Zemin etkileşimi (YKZE) analizleriyle yapılmaktadır. Bu çözüm yaklaşımı çeşitli yazılım ve bilgisayar donanım imkânlarına bağlı olarak yarı sonsuz modelleyen yaklaşımlarla çözülebilmektedir. Bu yaklaşımlar zemin ortamı ile yapının birlikte modellendiği ortak sistem modeli veya zemin temel sistemi ile yapının ayrı ayrı çözülerek entegre edildiği alt sistem modelidir. Zemin modelinin daha gerçekçi tanımlanabildiği bir sayısal ortamda kinematik ve eylemsizlik analizlerinin yapılması yeni bir yaklaşım olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmada bu durum amaçlanarak bir vaka analizi olarak Gaziantep ilinde yapılması planlanan toplam 13 katlı yapının kazıklı radye temel sistemi TBDY-2018 (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği) kapsamında Alt sistem Yöntem-III durumu dikkate alınarak tasarlanmış ve gerek kinematik analiz gerekse de eylemsizlik analizi gelişmiş bir sonlu elemanlar analiz programı olan Plaxis-3D yazılımıyla yapılarak alternatif bir hesap yöntemi sunulmuştur. Bu çalışma ile rjitlik farkı çok yüksek olmayan zemin profilleri arasında kinematik etkileşimin etkin olmayacağı gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Yapı-Kazık-Zemin etkileşimi, Kinematik etkileşim, Eylemsizlik etkileşim, Kazıklı radye, Alt sistem yöntemi

1 Giriş

Üst yapıdan gelen yüklerin yüzeysel temeller vasıtasıyla zemin profillerine aktarılmasında zemin ortamının stabilite, deformasyon ve sıvılaşma problemleri açısından yetersiz kaldığı durumlarda derin temel sistemlerinden olan kazıklı radye temeller geoteknik mühendisleri tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. Kazıklı radye temel sistemleri yardımıyla üst yapıdan gelen yükler statik şartlar altında güvenle sağlam zeminlere aktarılmaktadır. Buna ek olarak kazıklı radye temel sistemleri olası tekrarlı deprem yükleri altında yapının hasar görmesini sınırlar ya da önemli ölçüde engeller [1]. Bu sebeple kazıklı radye temel sistemlerin

Abstract

With the help of piled raft foundation systems, the loads coming from the superstructure are transferred safely to rigid soil profiles. Piled raft designs under dynamic earthquake forces are made by Structure-Pile-Soil Interaction (SPSI) analyses. This solution approach can be solved with semi-infinite modeling approaches depending on various software and computer hardware possibilities. These approaches are the direct system model in which the soil and the structure are modeled together, or the subsystem model in which the soil-foundation system and the structure are solved separately and integrated. It is believed that performing kinematic and inertial analyses in a numerical analysis where the soil model can be defined more realistically will yield more reliable results. In this study, aiming at this situation, the piled raft foundation system of a total of 13-storey building planned to be built in Gaziantep province was designed as a case study by taking into account the Subsystem Method-III situation within the scope of TBEC-2018 (Turkish Building Earthquake Code) and an alternative calculation method was presented by performing both kinematic analysis and inertial analysis with Plaxis-3D software, an advanced finite element analysis program.

Keywords: Structure-Pile-Soil interaction, Kinematic interaction, Inertial interaction, Piled raft, Sub-System method

tasarımı özellikle sismik etkilere maruz kalan yapıların dayanıklılığı kapsamında önemli yer tutmaktadır. Bu temel sistemlerinin tasarımı her ne kadar geoteknik mühendislerinin sorumluluğunda olsa da disiplinler arası bir çalışmayı zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda geoteknik mühendisliğinin yanı sıra deprem mühendisliği ve yapı mühendisliği gibi alt disiplinlerinde bu tip temel sistemlerin Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi tasarımında (YKZE) açısından katkıları kaçınılmazdır [2].

Deprem kuvvetleri altında, YKZE analizlerinde zemin ve kazık davranışını inceleyen çok sayıda analitik çözüm yaklaşımı literatürde yer almaktadır [3]. Bu çözüm

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: fatihcelik@ohu.edu.tr (F. Çelik) Geliş / Received: 10.03.2025 Kabul / Accepted: 07.04.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngmuh.1654961

yaklaşımlarına bağlı YKZE problemleri, çeşitli yazılım ve bilgisayar donanım imkânlarına bağlı olarak yarı sonsuz modelleyen yaklaşımlarla çözülebilmektedir. Bu yaklaşımlar zemin ortamı ile yapının birlikte modellendiği ortak sistem modeli veya zemin temel sistemi ile yapının ayrı ayrı çözülerek entegre edildiği alt sistem modelidir [4]. Bu modellerden alt sistem vöntemi üc asamadan olusan bir vaklasımla cözülmektedir [5]. Bu asamalar sırasıvla; (1) kinematik etkileşim analizi, (2) eylemsizlik etkileşim analizi ve (3) YKZE analizi kapsamında bu iki etkilesim analiz sonuçlarının birleştirilmesi şeklinde sıralanır. Alt sistem yöntemi analizinin en büyük avantajı, her aşamanın birbirinden bağımsız olarak analiz edilmesidir [6]. Son zamanlarda YKZE ile ilgili yapılmış çalışmalardan bu konunun önemi anlaşılmaktadır [7]. Araştırmacılar daha çok bu çalışmalarda alt sistem yönteminin tasarımcılar açısından esnekliğe sahip olmasının avantajları üzerine değinmişlerdir [8]. Ayrıca başka bir çalışmada, bu yöntem kapsamında dikkate alınan sadece doğrusal zemin ve yapı davranışı için geçerli olan süper pozisyon ilkesinin, doğrusal olmayan modeller doğrusal olmayan zemin yaklaşımında da kullanılabileceği önerilmiştir [9]. Bir diğer deyişle, alt sistem yöntemi prensip olarak doğrusal davranışı esas alır fakat mühendislik pratiğinde doğrusal olmayan davranış için de uygulanabilir. Ortak sistem yöntemi ise; yapı, zemin ve kazıklı temel modellerinin tek bir model altında bütün sistemin sayısal analiz ortamında idealleştirilmesi ve ana kaya olarak tanımlanan taban kayasında etkitilen deprem kavıtlarının YKZE kapsamında tüm sisteme etkitilerek zaman-tanım alanında analiz edilmesi olarak tanımlanmaktadır [3,4]. Bu yöntemde zemin ortamı, deprem altında zeminde oluşabilecek etkileri yansımaları engellemek için geçirgen sınır koşulları temsil eden "iletken sınırlar" (transmitting boundaries) adı verilen yapay sınır koşullarıyla sınırlandırılır. Yapı-zemin-kazık elemanları sayısal ortamda eş zamanlı olarak tek bütün bir modelle tanımlanır ve deprem yer hareketi taban kayası olarak tanımlanan mostra da etkitilir. Alt sistem yönteminde kullanılan süper pozisyon yaklaşımı ortak sistem yönteminde kullanılmadığı için bu yöntemle daha gerçekçi analizlerin yapılabileceği ve daha geçerli sonuçlar elde edilebileceği yaygın olarak kabul görür [10-13]. Ancak ortak sistem yöntemi her ne kadar alt sistem yöntemine göre daha gerçekçi bir analiz modeli oluştursa da analizlerin tamamlanma sürelerinin çok uzun olması ve güçlü bilgisayar donanımları gerektirmesi sebebiyle zorunlu kalınmadıkça tasarımcılar tarafından çok tercih edilmemektedir. Ortak sistem vönteminde analizler cok savıda deprem kaydı kullanılarak doğrusal olmayan yaklasımla zaman-tanım alanında yapıldığından analizlerin tamamlanması çok uzun süreler alabilmektedir. Bu durum bu yöntemin en dikkat çeken dezavantajlarından biri olarak görülmektedir. Daha esnek bir analiz yaklaşımına sahip olan ve ortak sistem yöntemine göre çok daha kısa sürelerde analiz edilebilen alt sistem modeli bu yönüyle tercih edilen bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Alt sistem yönteminde yapı elemanları çubuk eleman, perde ve temel kabuk eleman ve zemin profili ise doğrusal olmayan yaylarla [14-16] (p-y, t-z ve Q-z yayları) modellenmektedir. Bu yöntemde yapının eylemsizlik davranışının dikkate alınmadığı kinematik etkileşim ve titreşen yapıdan kazık-zemin ortamına geri dönen deprem dalgalarından ötürü oluşan etkilerin değerlendirildiği eylemsizlik etkileşim durumları analiz edilir [4]. Kinematik etkileşimde en az farklı 11 deprem kaydı ile yapılan sahaya özel deprem analiz sonuclarından elde edilen zemin tabakaları boyunca oluşan yatay deplasmanlar, radye-kazık modeli üzerinde çubuk eleman olarak tanımlanan kazıkların üzerinde farklı aralıklarla tanımlanmış doğrusal olmayan yaylara uygulanarak kazık elemanında oluşan zorlanmalar ve iç tesir değerleri belirlenir. Daha sonra eylemsizlik analizi kapsamında sahaya özel deprem analizi ile taban kayasından temel altı zemin yüzeyine kadar taşınan 11 deprem kaydının dönüştürülmüş ortalama spektrum eğrisi ile analiz edilmiş yapı modelinin temel seviyesinde oluşturduğu taban kesme kuvveti yine radye-kazık modeli üzerinde etkitilerek kazıklarda oluşan zorlanmalar ve iç tesir değerleri belirlenir. Son olarak süper pozisyon yöntemiyle kinematik ve eylemsizlik analiz sonuçlarında elde edilen sonuçlar birleştirilir ve YKZE analizi tamamlanarak kazıkların yapısal tasarımı tamamlanır. Bu hesap yaklaşımı dünyada yaygın olarak kullanılan bir hesap yöntemi olarak kabul edilmekte olup sahada yapılan tasarımlar genellikle bu yöntemle yapılır [4]. Bu yöntem her ne kadar genel kabul gören bir yaklaşım olsa da zemin modelinin yaylar yardımıyla temsil edilmesi gerçekçi bir çözümü birebir vansıtmamaktadır. Zemin modelinin daha gerçekçi tanımlanabildiği bir savısal ortamda kinematik ve eylemsizlik analizlerinin yapılması daha güvenilir sonuçlar verebileceği kanaatini olusturmaktadır. Bu calısmada bu durum amaçlanarak bir vaka analizi olarak Gaziantep ilinde yapılması planlanan Bodrum + Zemin + 11 normal kattan oluşan toplam 13 katlı yapının kazıklı radye temel sistemi TBDY-2018 [17] (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği) kapsamında Alt sistem Yöntem-III durumu dikkate alınarak tasarlanmış ve gerek kinematik analiz gerekse de eylemsizlik analizi dünyada yaygın olarak kabul gören gelişmiş bir sonlu elemanlar analiz programı olan lisanslı Plaxis-3D Ultimate versiyon-2025 yazılımıyla yapılarak alternatif bir hesap yöntemi sunulmuştur.

2 Projenin tanıtılması ve geoteknik karakterizasyon

Bu çalışmada bir vaka analizi kapsamında tasarlanmış kazıklı radye temel sistemine sahip bir yapının alt sistem yöntemi kullanılarak kinematik ve eylemsizlik analizleri ile YKZE analizleri sunulmuştur. Bahse konu bu analizler dünyada yaygın olarak kabul gören gelişmiş bir sonlu elemanlar analiz programı olan lisanslı Plaxis-3D Ultimate versiyon-2025 yazılımıyla yapılmıştır. Çalışmaya ait oluşturulmuş yapı-kazık-zemin modeli, tasarım metodolojisi ve kullanılan yazılım ve detaylar bu bölümde alt başlıklar halinde sunulmuştur.

Gaziantep ilinde yapılması planlanan yapı 11.655,52 m²'lik bir alanda yapılacak olup 13 katlı (B+Z+11 katlı) tasarlanmış ve konut amaçlı olarak inşa edilecektir. Toplam yapı yüksekliği 42.7 metredir. Çalışma alanında 10 adet 20 metre derinliğinde zemin incelemeleri için sondaj kuyuları açılmıştır. İnceleme alanında açılan SK-1, SK-3, SK-4 SK-5

kuyularında 14.0 metreden sonra geçilen birim kireçtaşıdır. SK-2 SK-7, SK-9 ve SK-10 nolu kuyuda 14.50 m'den sonra Kireçtaşı birime rastlanmıştır. SK-6 ve SK-8 nolu kuyularda ise 15.0 m den sonra kireçtaşı birimine girilmiştir. İnceleme alanı zemin formasyonu olarak Gaziantep Formasyonu olarak adlandırılan killi kireçtaşı birimden oluşmaktadır. İnceleme alanındaki dolgu vasıfsız olup insaat atıkları, cöp, demir moloz atıklarından ibaret heterojen yapıdadır. Zaman içerisinde sıkışmış ve orta sıkı-sıkı olarak değerlendirilecek bir yapıdadır. Dolgu birimdeki kayma dalga hızları incelendiğinde orta sıkı-sıkı bir zemin profilinin varlığı görülmektedir. İnceleme alanındaki gözlemler ve yapılan sondaj çalışmalarından alınan numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler sonucunda, çalışma alanı litolojisi killi kireçtaşı olarak görülmüştür. Sondajlar esnasında geçilen en üst birim dolgu olup dolgu altı ise Kireçtaşı birimi olarak tanımlanmıştır. Parsel genel olarak dolgu ile kaplı olup 14.0-15.0 m lik dolgu altındaki Kireçtaşı birim varlığı gözlenmiştir.

Kireçtaşı birim için Roc-Lab programı yardımıyla Hoek-Brown kriterleri dikkate alınarak Mohr-Coulomb parametreleri belirlenmiştir. RQD değeri ortalama %24 olup; "Çok Kötü Kaliteli" olarak sınıflandırılmıştır. Hoek-Brown sınıflaması kapsamında girdi parametreleri; Ortalama tek eksenli basınç dayanımı σ_c = 20.0 MPa, GSI=40, mi=10 ve Ei=16000 MPa olarak alınmıştır. Bu kapsamda Hoek-Brown kriterleri; mb=0.370, s=0.0002 ve a=0.511 olarak belirlenmistir. Bu değerlere göre Mohr-Coulomb parametreleri; c=108 kPa ve içsel sürtünme açısı ϕ =38° değerlendirilmistir. MASW olarak uygulaması ile hesaplanan yüzey kayma dalga hızları (Vs) ve bu değerlere göre hesaplanmış Vs30 değerlerinin 450-500 m/sn aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu değerlere göre ilgili çalışma alanın Yerel Zemin Sınıfının TBDY-2018 yönetmeliği uyarınca "ZC" olarak değerlendirilebileceği anlaşılmıştır.

Dinamik modüllerden statik modüllere geçmek için Alpan (1970) [18] tarafından önerilen ilişki kullanılmıştır (bkz Şekil 1). Statik yüklerde teğet (başlangıç) elastisite modülü (E_o) ile sekant elastisite modülü (E_{50}) arasında $E_o/E_{50}=3.0$ ilişkisi kullanılmıştır. Bununla birlikte, kayma modülü ve elastisite modülü referans gerilme değerine (p'ref) bağımlıdır. Referans gerilme, arazide sismik deneylerinden elde edilen ve modül hesaplarında dikkate alınan Vs değerinin ölçüldüğü noktadaki ortalama efektif gerilme değeridir. P'ref değerleri bu çalışmada 100 kPa alınmıştır. Drenajsız yükleme şartlarına ait gerilme-deformasyon analizlerinde permeabilite katsayıları önemlidir. Bu problem için seçilen karakteristik permeabilite değeri için zemin profili geçirimsiz kabul edilmiştir. Zemin tabakaları için tanımlanan Vs değerleri ile hesaplanan G_{o,ref} değerleri ve tasarıma esas geoteknik parametreler Tablo 1 ve Tablo 2'de sunulmuştur.



Şekil 1. Dinamik elastisite modülü (E_d) ve statik elastisite modülü (E_s) arasındaki ilişki [18]

3 Deprem kayıt takımlarının belirlenmesi ve kayıtların ölçeklendirilmesi

Tasarım spektrumları belirlenirken Türkiye Deprem Tehlike Haritalarının (TDTH) kullanılması TBDY-2018'de yer alan en önemli yeniliklerden biri olarak görülmektedir. Deprem yer hareketi spektrumu, Spektral İvme Katsayısı ve Tasarım Spektral İvme Katsayısı adı verilen iki kavramla ifade edilmektedir.

Deprem yer hareketi spektrumları %5 sönüm oranı için belirli bir deprem yer hareketi düzeyinde harita spektral ivme ve yerel zemin etki katsayıları dikkate alınarak belirlenir. TDTH, Türkiye anakarası ve civarında olmuş aletsel dönem öncesi ve sonrası birçok depremin ve buna benzer birçok deprem kataloğunun olasılıksal analiz edilmesiyle elde edilmiş sismik tehlike analizleri kapsamında hazırlanmıştır. Boyutsuz kısa periyot harita spektral ivme katsayısı, S_s ve 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı S₁ değerleri Vs₃₀ = 760 m/s olan yüzeydeki jenerik kaya (mostra) için TDTH'tan ((https://tdth.afad.gov.tr/) faydalanılarak dört farklı yer hareketi düzeyiyle ilişkili olarak elde edilecektir.

Tablo 1. Vs ile hesap edilen kayma modülü (Go,ref) ve sekant elastisite modülü (E50,ref) değerleri

	r		(=0,				,ici)			
Dinamik Parametreler					Statik Parametreler					
Birim	Vs	v	γ	G _{0,ref}	E _{ur,ref}	Seçilen	E _{0,s}	$E_{ur,ref}$	E_{ur}/E_{50}	E _{50,ref}
	(m/sn)		(kN/m^3)	(MPa)	(MPa)	E_d/E_s	(MPa)	(MPa)		(MPa)
Dolgu	350	0.20	19.0	233	559	3.5	160	160	3	53
Kireçtaşı-Kaya	600	0.20	22.0	792	1901	4.5	422	422	3	141

Tablo 2. Sahadaki zemin pro	ofilleri için geoteknik	tasarım parametreleri
-----------------------------	-------------------------	-----------------------

				Toplam Gerilme				Efektif Gerilme			
Birim	γ	k	Ko	p' _{ref}	E _{50,ref}	с	Φ	p' _{ref}	E'50,ref	c'	Φ'
	(kN/m ³)	(m/gün)		(kPa)	(MPa)	(kPa)	(°)	(kPa)	(MPa)	(kPa)	(°)
Dolgu	19.0	0.6	0.50	100	53	20	38	100	53	20	38
Kireçtaşı-Kaya	22.0	Geçirimsiz	0.50	100	141	108	38	100	141	108	38

Deprem yer hareketi düzeyi belirlendikten sonra TDTH verileri oluşturabilir. Bu çalışmada Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2), bir diğer deyişle 50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi dikkate alınmıştır.

Bu çalışma kapsamında ilgili inceleme sahasında 30 metre derinliği temsil eden ortalama yüzey kayma dalga hızı (Vs₃₀) temel tabanı alt kotundan itibaren 582 m/s olarak tanımlanmıştır. TBDY-2018 yönetmeliği kapsamında inşaat sahasının yerel zemin sınıfı bu değere göre ZC olarak belirlenmiştir. Buradan kısa periyot ve 1.0 saniye periyoduna ait harita spektral ivme katsayıları TDTH yardımıyla S_S=0.410 ve S₁=0.144 olarak tanımlanmıştır. DD-2 durum için PGA=0.174 g. ve PGV= 12.493 cm/sn belirlenmiştir. Çalışma bölgesinde yapılmış saha incelemeleri ve araştırmalara göre jenerik mühendislik kayasının yüzeyden 15 metre derinde olduğu görülmüştür. Bu sebeple yüzeyden 40 metre derinlikteki ZB olduğu değerlendirilen tabakaya etkitilen deprem kayıtları zemin yüzeyine taşınarak serbest zemin analizleri yapılmıştır.

Yerel zemin etki katsayıları F_S = 1.300 ve F_1 = 1.500 olarak belirlenmiştir. Bu değerler kullanılarak kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı $S_{DS}=S_s*F_s=$ 0.533 olurken 1.0 saniye periyodu tasarım spektral ivme katsayısı $S_{D1}=S_1*F_1=$ 0.216 bulunmuştur. Bu değerlere bağlı köşe periyotları T_A ve T_B (0.081, 0.405) tanımlanmıştır.

Taban kayasına etkitilen deprem kayıtlarının zemin profillerini geçerek zemin yüzeyine taşınması TBDY-2018 sahaya özel deprem analizi kapsamında olarak tanımlanmaktadır. Genel bir yargı olarak yapı temel tabanın eğimli olmadığı ve zemin profillerinin yatay seyrettiği kabulüne göre sahaya özel deprem analizleri bir boyutlu serbest zemin model durumu ile analiz edilebilmektedir. Eğer bu durumlar oluşmuyorsa iki ya da üç boyutlu zemin davranış analizleri ile sistemin çözülmesi gerekmektedir. TBDY-2018 yönetmeliğine göre tasarımcının inisiyatifinde ZF yerel zemin dışındaki zeminlerde de sahaya özel deprem analizleri yapılabileceği bahsedilmistir. Ancak böyle bir durumda analizler sonucunda belirlenen tasarım

spektrumunun ordinatlarının TBDY tasarım spektrumunun ordinatlarından düşük olamayacağı vurgulanmıştır.

Sahaya özel zemin davranış analizlerinde kullanılacak en az on bir deprem kaydının Vs30=760 m/s için TDTH'den seçilen tasarım ivme spektrumuna benzeşmesi gereklidir. TBDY-2018'de deprem kayıtlarının nasıl belirleneceği ve belirlenen kavıtların basit ölceklendirme vöntemi kullanılarak nasıl ölçeklendirileceği tüm detaylarıyla bahsedilmistir. Bu durumda analizler için en az on bir deprem kaydı seçilecek ve aynı depremden seçilen kayıt ya da kayıt takımlarının üçü aşmaması zorunluluk arz etmektedir. Deprem kayıtları seçilirken çalışma bölgesi için tanımlanmış deprem yer hareketi düzeyi, deprem büyüklüğü, fay mesafeleri, deprem kaynak mekanizması ve yerel zemin sınıfı ile uyumlu olmalıdır. Öncelikli olarak bahse konu yapının bulunduğu sahaya yakın tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu geçmiş deprem kayıtları, bulunmuyorsa eğer başka bölgelerden alınacak uyumlu deprem kayıtları kullanılacaktır. Yerel zemin sınıfı, deprem kayıtlarının belirlenmesinde önemli olan parametrelerden bir diğeridir. Bu kapsamda Vs30 değeri referans alınarak kayıtlar aranmalıdır. Gaziantep ili ve yakın çevresinde irili ufaklı değişik karakterlerde birçok fay sistemi bulunmaktadır. Çalışma alanımız bu fay hatlarına en yakın uzaklığı 27- 60 km'dir. İnceleme alanına çok yakınlık arz eden etkin bir yakın fay durumu gözlemlenmediğinden herhangi bir yakın fay düzeltmesi yapılması gerekli görülmemiştir.

Bölgenin depremselliği değerlendirildiğinde bölgeye yakın diri faylar sebebiyle; 4 adet kayıt takımının belirlenen özellikteki depremlere uyumlu olarak 0-30 km aralığında ve Mw=6.0-7.7 deprem büyüklüğü aralığında, diğer 4 adet kayıt takımının 30-60 km aralığında ve Mw=6.5-7.7 deprem büyüklüğü aralığında ve son olarak 3 adet kayıt takımının ise yaklaşık olarak 60-150 km aralığında ve Mw=6.5-7.5 deprem büyüklüğü aralığında seçilmesi uygun görülmüştür. Çalışma bölgesinde yapılmış saha incelemeleri ve araştırmalara göre jenerik mühendislik kayasının yüzeyden 40 metre derinde olduğu tahmin edilmiştir.

Tablo 3. DD2-ZB durumu için analizlerde kullanılmak için seçilmiş deprem kayıtları ve özellikleri

Deprem No	Kayıt No	Deprem Adı	Yıl	Büyüklük M _w	Fay Tipi	R _{jb} (km)	R _{rub} (km)	(Vs) ₃₀ (m/s)	Ölçek Katsayısı
E01	1613	Duzce, Turkey	1999	7.14	SS	25.78	25.88	782	1.339
E02	809	Loma Prieta	1989	6.93	R-O	12.15	18.51	714	0.657
E03	989	Northridge-01	1994	6.69	R	9.87	20.45	740	0.508
E04	4064	Parkfield-02, CA	2004	6.00	SS	4.25	4.93	657	0.742
E05	1256	Chi-Chi, Taiwan	1999	7.62	R-O	53.30	56.93	789	1.062
E06	1795	Hector Mine	1999	7.13	SS	50.42	50.42	686	1.165
E07	1626	Sitka, Alaska	1972	7.68	SS	34.61	34.61	650	1.132
E08	6963	Darfield, New Zealand	2010	7.00	SS	57.37	57.65	639	1.739
E09	3938	Tottori, Japan	2000	6.61	SS	72.4	72.4	627	1.606
E10	4892	Chuetsu-oki, Japan	2007	6.80	R	77.51	78.94	656	1.161
E11	1117	Kobe, Japan	1995	6.90	SS	119.64	119.64	609	1.321

Bu sebeple belirlenmiş 11 adet deprem kaydının belirlenmesinde ZB yerel zemin sınırlarında Vs30 değeri olarak 780-990 m/sn aralığı değerlendirilmiştir. Deprem yönetmeliğinde TBDY-2018 kayıtları belirlenirken tanımlanmış koşullar olan deprem yer hareketi düzeyi, deprem büyüklüğü, fay uzaklığı, kaynak mekanizması ve verel zemin sınıfı dikkate alınmıştır. Secilmis deprem kayıtlarının tamamı PEER Yer Hareketi Veritabanı (Pacific Earthquake Engineering Research) ait https://ngawest2.berkeley.edu sitesinde sunulmuş kayıtlardan taranmıştır ve TBDY-2018 yönetmeliğinin önerdiği gibi tasarım spektrumuyla uyumlu depremler arasından belirlenmişlerdir.

İlk aşamada çalışma sahası olan Gaziantep şehri ve civarında vuku bulmuş deprem kayıtları aranmış ve sonra ülkemiz genelindeki uygun kriterlere sahip deprem kayıtları taranmıştır. Analizlerde kullanılmak üzere on bir deprem kaydının tamamı PEER deprem veri tabanından elde edilmiştir. En fazla aynı depremden 3 farklı deprem kaydı yönetmelikteki kriterler dikkate alınarak seçilmiştir. Tablo 3'te görüldüğü üzere PEER veri sisteminde DD-2 deprem düzeyi için deprem kayıtları aranırken depremlerin moment büyüklükleri (M_w), kayıtların temin edildiği istasyona ait bilgiler, bu istasyonun ilgili faya olan mesafesi (R_{rup}) ve istasyonun konumlandığı zemin profilinin Vs₃₀ değeri gibi temel parametreler göz alınarak filtreleme yapılmıştır. Basit ölçeklendirme aşamasında kayıtlar filtrelenirken ölçek oranı olarak 0.5-2.0 aralığı uygun görülmüştür.

TBDY-2018 yönetmeliğinde, sahaya özel deprem analizi seçilmiş deprem kayıtlarının tümünün ivme icin spektrumlarının ortalaması elastik tasarım spektrumu ile basit ölçeklendirme yapılarak Seismomatch (2022) yazılımı kullanılarak ölçeklendirilmiş ve tüm periyot aralıklarında ortalama ivme spektrum eğrisinin ordinatlarının tasarım spektrumu ordinatlarından düşük olmadığı gösterilmiştir. Ölçeklendirme analizinde tolerans 0.1, ölçek faktörü 1.0, minimum periyot 0.05 s, maksimum periyot ise 8 saniye olarak sınırlandırılmıştır. Şekil 2'de ölçeklendirme sonunda elde edilmiş ve DD-2 ZB yerel zemin için orijinal deprem kayıtlarına tepki spektrum eğrisi, ortalama spektrum eğrisi ve tasarıma esas spektrum eğrisi karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Ölçeklendirilmiş kayıtlarda kalıcı deplasman tespit edilmemiştir. Ölçeklendirilmiş kayıtlara aynı zamanda

SeismoSignal V.4 yazılımıyla "base line correction" uygulanmıştır.

Yapılması planlanan yapı toplam 13 katlıdır. Yapı periyodu (T_p) kat sayıları değerlendirildiğinde ortalama 1.3 sn olarak değerlendirilmiştir. $0.2T_p = 0.26$ sn ve $1.5T_p = 1.95$ sn olarak hesaplanır. TBDY-2018 yönetmeliğinde "2.5.2.1 "(b) Üc boyutlu hesap icin secilen her bir deprem kaydı takımının iki yatay bileşenine ait spektrumların kareleri toplamının karekökü alınarak bileşke yatay spektrum elde edilecektir. Seçilen tüm kayıtlara ait bileşke spektrumların ortalamasının 0.2T_p ve 1.5T_p periyotları arasındaki genliklerinin, 2.3.4 veya 2.4.1'e göre tanımlanan tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerine oranının 1.3'ten daha küçük olmaması kuralına göre deprem yer hareketi bileşenlerinin genlikleri ölçeklendirilecektir" denmektedir. Şekil 2b'de ölçeklendirilmiş 11 deprem kaydının ortalamalarından elde edilen spektrum eğrisi değerlendirildiğinde 0.2Tp ve 1.5Tp değerleri arasında ortalama spektrum eğrisinin ordinatlarının hedef tasarım spektrumu ordinatlarının üzerinde olduğu görülmektedir. Bu sebeple yönetmeliğin önerdiği şart sağlanmıştır.

4 Sahaya özel deprem analizi

4.1 Kullanılan zemin modeli ve zaman tanım alanında yapılan analiz

Bu çalışmada zaman tanım alanında sahaya özel zemin tepki analizleri Deepsoil-V7.0 programı yardımıyla yapılmıştır. Dinamik zemin modeli tanımlamalarında General Quadratic-Hiperbolik Model'den faydalanılmıştır. Bu model kayma gerilmesi ile kayma şekil değiştirmesi arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Kayma modülü-Sönüm oranı ve birim kayma şekil değiştirme arasındaki bağıntı zemin etütlerinden elde edilen test sonuçlarıyla belirlenmesi daha geçerli bir durumken, bu durum her zaman sağlanamamaktadır. Böyle durumlarda zemin davranışını belirleyen gerilme-şekil değiştirme eğrilerini elde etmek için literatürde sunulmuş genel kabul gören yaklaşımlardan faydalanılmaktadır. Bu sebeple çalışma kapsamında Darendeli (2001) [19] tarafından önerilmiş derinlikle artan efektif gerilme etkisinin dikkate alındığı grafik eğrileri kullanılmıştır.



Şekil. 2. DD-2 ve ZB Şartlarında Kullanılmış orijinal ve ölçeklendirilmiş on bir adet deprem kaydına ait tepki spektrumları. (a) Orijinal kayıtlar, (b) Base Line Correction yapılmış Ölçeklenmiş-Matched kayıtlar

Sahaya özel deprem analizlerinde her bir zemin tabakasına ait maksimum frekans değerleri (fmaks=Vs/4H) kayma dalga hızı ve zemin profilinin tabaka kalınlığı ile tanımlanır. Bu ifade alınarak, göreceli olarak düşük kayma dalgası hızı değerine sahip tabakaların maksimum frekans değerlerini yüksek tutmak için maksimum frekans 30 olarak değerlendirilmis ve bunun sonucu 40 m derinliğindeki zemin profili toplam 34 alt tabakayla sınırlandırılmıştır. Kayma modülü azalımı ve sönüm oranı bağıntısının ifade edildiği zemin gerilme-şekil değiştirme eğrisi ilişkisinin gösterildiği gerilme-şekil değiştirme eğrileriler ile uyumlu ve yüklemeboşaltma koşulunu yansıtan model parametreleri olan P1 ve P2 değerleri DeepSoil programında otomatik olarak belirlenmiştir. YASS bulunmaması sebebiyle analizlerde artık boşluk suyu basıncı oluşumu dikkate alınmamış ve hesaplara dahil edilmemiştir. DeepSoil programında zaman tanım alanında hazırlanmış model Sekil 3'de sunulmuştur. Şekil 4'te temel tabanı seviyesinde sahaya özel deprem analizi sonucu bulunmuş ivme kayıtlarına ait yüzey tepki spektrum eğrisi ile Anakaya-Yüzey kayıtlarının grafik eğrileri görülmektedir.

4.2 Serbest saha analiz sonuçları

Şekil 4'te sahaya özel deprem analizleri sonucu zemin yüzeyine taşınmış ivme kayıtlarının tepki spektrumları görülmektedir. Bunun yanı sıra YKZE analizlerinde kullanılacak olan pik yüzey ivmeleri (PGA) ve derinlik boyunca yanal pik yüzey deplasmanları (PGD) eğrileri Şekil 5 ve Şekil 6'da görülmektedir. Şekil 5'de görüldüğü üzere temel tabanında 11 deprem kaydı ortalamalarının pik yüzey ivmelerinin (PGA) 0.219 g değerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 3. Deepsoil programında tanımlanmış zemin modeli



Şekil. 4. (a) Sahaya özel deprem analizi sonucunda temel taban seviyesinde tanımlanan ivme kayıtlarına ait yüzey tepki spektrumları (b) Anakaya-Yüzey kayıtları karşılaştırma

Şekil 6'da görüldüğü üzere zemin profillerinin sıkı dolgu tabakalarından ve kireçtaşı kil formasyonlarından oluşması, buna bağlı tabakaların yüksek Vs yüzey kayma dalga hızlarına sahip olması ve Vs₃₀ değerine bağlı kinematik etkileşim çok düşük çıkmıştır. ZC sınıfı zeminlerde kinematik etkileşimin düşük olacağı yargısının bu sonuçlarla örtüştüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 5. Serbest saha analizleri sonucunda derinlik boyunca pik yüzey ivmeleri (PGA)



Şekil 6. Serbest saha analizleri sonucunda derinlik boyunca yanal pik yüzey deplasmanları (PGD)

5 Alt Sistem yöntemiyle yapı-kazık-zemin etkileşim (YKZE) analizleri

5.1 Sismik yükler altında YKZE analizleri

Yapılması planlanan yapı temeli altında bulunan kazıklı radye temelde fore kazık uzunluğu projede L=18.0 m, kazık çapı ise D=80 cm değerlendirilmiştir. Merkezden merkeze kazıkların uzaklığı 3.0 m olacak şekilde karelaj belirlenmiştir. Hesap sonucunda radye temel altında toplam 159 adet fore kazık yerleşimi planlanmıştır. Kazıklar 14 metre dolgu tabakasından geçtikten sonra 4 metre kayaya soketlenecektir.

Bu çalışma kapsamında kazıklı radye sistemin YKZE analizleri Plaxis 3D Ultimate Sonlu Elemanlar yazılımıyla

TBDY-2018 yönetmeliğinde tanımlanmış Yöntem-III metodu kullanılarak yapılmıştır. Analizler kinematik ve eylemsizlik etkileşimi olmak üzere iki aşamada yapılmıştır. Üst yapının kütlesi dikkate alınmadan sahaya özel deprem analizi sonucunda elde edilen tabakalar boyunca yanal deplasmanların fore kazık sisteminde olusturacağı zorlanmalar ve temel tabanında elde edilen deprem kavıtlarının belirlenmesi kinematik etkileşim olarak tanımlanmıştır. Bununla birlikte üst yapı kütlesinin deprem etkisi altında yatay ivmelere maruz kalması sonucu oluşan taban kesme kuvvetinin belirlenmesi de eylemsizlik etkisi olarak tanımlanmıştır.

Tablo 4. Sonlu elemanlar analizinde tanımlanmış yapı

 elemanı mekanik özellikler

Parametre	Sembol	Radye	Perde	Birim
Malzeme Modeli	-	Elastic	Elastic	-
İzotropik	-	Evet	Evet	-
Birim Hacim Ağırlığı	γ	23.0	23.0	kN/m ³
Young Modülü	E_1, E_2	30000000	30000000	kN/m^2
Poisson Oranı	<i>v</i> ₁₂	0.18	0.18	-
Kesit Kalınlığı	d	1.00	0.40	m

Tablo 5. Sonlu elemanlar analizinde tanımlanmış kazık tasarım parametreleri

Parametre	Sembol	Ø80cm Fore kazık	Birim
Malzeme Modeli	-	Elastic	-
Kazık Çapı	D	0.8	m
Birim Hacim Ağırlığı	γ	23.0	kN/m^3
Young Modülü	E_1, E_2	30000000	kN/m^2
Yüzey Sürtünme Direnci	fs	750.00	kN/m
Uç Direnci	fu	1000.00	kN

Plaxis 3D Ultimate programında zemin profili, yapı temeli, bodrumları ve temel altı kazıklar üç boyutlu modellenmiş, binanın X-X ve Y-Y doğrultularında ayrı ayrı kinematik ve eylemsizlik analizleri yapılmıştır. Daha sonra kinematik ve eylemsiz analiz sonuçları süperpoze yöntemiyle birleştirilerek kazıklarda oluşan zorlanmalara bağlı iç tesir kuvvetleri (Eğilme momenti ve kesme kuvvetleri) hesaplanmıştır. Yapı elemanları radye ve perdeye ait mekanik parametreler Tablo 4'de verilmiştir. Kazık elemanları 80'lik 18 metre uzunluğunda "embedded beam" olarak tanımlanmıştır. Kazık için kullanılmış tasarım parametreleri Tablo 6'de görülmektedir. Bu değerlere göre kazıkların betonarme tasarımı yapılarak analiz sonlandırılmıştır. Analizler kapsamında oluşturulmuş üç boyutlu temel-zemin-kazık modeline ait tasarım zemin parametreleri Tablo 6'da verilmiştir. Kazık-zemin ara yüzeyi, statik ve dinamik yükler altında zeminde oluşacak deplasmanlar ve kazıklarda oluşacak kesme kuvvetleri ve momentler açısından önemlidir. Yapılacak olan çalışmada zemin ve kazıkların ara yüzey parametreleri literatürde yaygın kabul gören yaklaşımlar dikkate alınarak belirlenmiştir.

Parametre	Sembol	Dolgu	Killi Kireçtaşı-Kaya	Birim
Malzeme Modeli	-	Pekleşen Zemin (HS)	Mohr-Coulomb	-
Davranış Tipi	Drenaj Tipi	Drenajlı	Geçirimsiz	-
Kuru Birim Hacim Ağırlık	Yunsat	18.0	22.0	kN/m^3
Doygun Birim Hacim Ağırlık	γ_{sat}	19,0	22.0	kN/m^3
Poisson Oranı	V_{ur}	0.2	0.20	-
Young Modülü	E'_{ref}	160000	422000	kN/m^2
Üç eksenli Deneyden Referans Rijitlik	E^{ref} 50	53000	141000	kN/m^2
Odömetre Deneyinden Referans Rijitlik	E^{ref}_{oed}	53000	141000	kN/m^2
Boşaltma/Tekrar Yükleme Referans Rijitliği	$E^{ref}_{\ \ ur}$	159000	423000	kN/m^2
Üs (Power)	m	0.5	-	-
Kohezyon	C'ref	20	108	kN/m^2
İçsel Sürtünme Açısı	Φ'	38	38	0
Dilatansi Açısı	Ψ	8	8	0
Permeabilite x-yönü	k_x	0.6	-	m/day
Permeabilite y-yönü	k_y	0.6	-	m/day
Ara Yüzey Katsayısı	R _{inter}	0.85	0.95	-
Başlangıç Yatay Gerilme Katsayısı	\mathbf{K}_{o}	0.3843	0.3843	-

Tablo 6. Sonlu elemanlar zemin modelinde tanımlanmış zemin tasarım parametreleri

5.2 Kinematik etkileşim analizleri

TBDY-2018 kapsamında yöntem III'e göre kinematik etkileşim analizleri, sahaya özel deprem analizinde elde edilen zemin yer değiştirmelerinin fore kazıklarda neden olacağı kesit tesirleri ve temel taban seviyesinde oluşacak olan ortalama spektrum eğrisinin belirlenmesini kapsamaktadır. Serbest sahada analizlerinde elde edilen derinlik boyu yatay zemin deplasmanları (bkz. Şekil 6) Plaxis 3D yazılımında zemin yüzeyince derinlik boyunca kademe etkitilmiş ve kazıklarda oluşan zorlanmalar hesaplanmıştır. Kinematik analizler yapının x-x ve y-y doğrultusunda ayrı ayrı yapılmıştır.

Gerek x-x gerekse de y-y doğrultusunda yapılmış kinematik analizlere ait detaylar aşağıda detaylarıyla bahsedilmiştir. Üç boyutlu yapı temeli, perdesi ve temel altı fore kazık modeli Şekil 7'de görülmektedir



Şekil 7. Üç boyutlu yapı temeli, perdesi ve temel altı fore kazık modeli

X-X Doğrultusunda Yapılmış Kinematik Analizler:

X-X doğrultusunda yapılacak kinematik analizler için Plaxis 3D yazılımında oluşturulmuş üç boyutlu YKZE modeli Şekil 8'de görülmektedir. Yatay hareketlerin X-X doğrultusunda etkitilecek olması sebebiyle sınır koşulları (Boundry condition) Y-Y doğrultusuna göre bu doğrultuda daha fazla uzatılmıştır.



Şekil 8. X-X doğrultusunda yapılacak kinematik analizler için Plaxis 3D yazılımında oluşturulmuş üç boyutlu YKZE modeli

Şekil 9'da X-X doğrultusunda derinlik boyu tabakalı etkitilmiş yatay deplasmanlar ve zemin modelinde oluşturduğu hareketler görülmektedir. Yatay deplasmanlar taban kayasında, kazık tabanında ve kademeli sıklıkla kazık yüzeyine kadar etkitilmiştir. Zemin yüzeyinde derinlik boyu oluşan bu yatay hareketler fore kazıklarda zorlanmalara ve hareketlere neden olmuştur. Bu zorlanmalar neticesinde fore kazık elemanlarında iç tesir kuvvetleri kapsamında eğilme momentleri, kesme kuvvetleri ve yatay deplasmanlar hesaplanmıştır. Kinematik analizler sonucunda kazıklarda oluşan eğilme momenti, kesme kuvveti ve yatay deplasmanalar sırasıyla Şekiller 10-12'de görülmektedir. Bu analizlere göre kazıklarda oluşan maksimum eğilme momenti 175 kN.m, maksimum kesme kuvveti 175.1 kN ve maksimum yatay deplasman 8.0 mm hesaplanmıştır. alanının depremselliği ve zemin profili Çalışma değerlendirildiğinde; sahanın yerel zemininin ZC olması, belirli derinliklerde kaya profillerinin bulunması, mostranın derinde olmaması ve dolgu tabakasının da oldukça sıkı olması kinematik etkileşimleri sınırlandırmıştır. Sahaya özel deprem analizlerinde derinlik bovu vatav deplasmanların oldukça düşük olması da bu durumu göstermektedir. Bu sebeple iç tesir değerlerinin düşük değerler hesaplandığı düşünülmektedir. Benzer analizler Y-Y doğrultusu içinde yapılmış ve bu analizlere göre kazıklarda oluşan maksimum eğilme momenti 214.2 kN.m, maksimum kesme kuvveti 193.7 kN ve maksimum yatay deplasman 8.0 mm hesaplanmıştır.



Şekil 9. X-X doğrultusunda derinlik boyu tabakalı etkitilmiş yatay deplasmanlar ve zemin modelinde oluşturduğu hareket



Şekil 10. X-X doğrultusunda kinematik analiz sonucu belirlenmiş eğilme momentleri (M_{max} =175 kN.m)



Şekil 11. X-X doğrultusunda kinematik analiz sonucu belirlenmiş kesme kuvvetleri (Q_{max}=175.1 kN)



Şekil 12. X-X doğrultusunda kinematik analiz sonucu belirlenmiş kazıklarda oluşan yatay hareketler (Dmax=8.0 mm)

5.3 Eylemsizlik etkileşim analizleri

Deprem etkisi sonucu yatay ivmelere maruz kalan üstyapı kütlesinin oluşturduğu taban kesen kuvvetinin hesaplanması eylemsizlik etkilesimi olarak tanımlanır. Bu sebeple yapının bütününü etkileyen eş değer deprem kuvveti (taban kesme kuvveti) kazıklı-radye temel sistemine etkitilir ve ilgili yönetmelikte Yöntem III'e göre eylemsizlik etkileşimi yapılır. Bu çalışmada taban kesme kuvveti, sahaya özel deprem analizlerinde elde edilen ortalama spektrum eğrisi kullanılarak hesaplanmıştır (bkz. Şekil 4). Taban kesme kuvvetleri yapılan üst yapı analizlerinde Ex=4485 kN ve Ey=1205 kN olarak elde edilmiştir. Bu değerler bölgenin depremselliği, yapının perdeli yapı olması sebebiyle tasarımda kullanılan yüksek R ve D azaltma katsayıları dikkate alındığında düşük değerler olarak hesaplanmıştır. Eylemsizlik etkileşim analiziyle en kritik moment, kesme kuvveti ve yatay yer değiştirme değerleri belirlenen taban kesme kuvvetinin kazıklı radye temel sistemine etkitilmesiyle hesaplanmışlardır.



Şekil 13. X-X doğrultusunda temel seviyesinde taban kesme etkitilmiş model ve zemin modelinde oluşturduğu hareket

X-X Doğrultusunda Yapılmış Eylemsizlik Analizleri:

X-X doğrultusunda yapılacak eylemsizlik analizleri için Plaxis 3D yazılımında oluşturulmuş üç boyutlu YKZE modeli Şekil 13'de görülmektedir. Taban kesme kuvveti temel seviyesinde X-X doğrultusunda etkitilecek olması sebebiyle sınır koşulları (Boundry condition) Y-Y doğrultusuna göre bu doğrultuda daha fazla uzatılmıştır.



Şekil 14. X-X doğrultusunda eylemsizlik analiz sonucu belirlenmiş eğilme momentleri (M_{max} =84.4 kN.m)



Şekil 15. X-X doğrultusunda eylemsizlik analiz sonucu belirlenmiş kesme kuvvetleri (Q_{max}=73.5 kN)

Şekil 13'de X-X doğrultusunda temel seviyesinde taban kesme kuvveti etkitilmiş model ve zemin modelinde oluşturduğu hareketler görülmektedir. Zemin yüzeyinde derinlik boyu oluşan bu yatay hareketler fore kazıklarda zorlanmalara ve hareketlere neden olmuştur. Bu zorlanmalar neticesinde fore kazık elemanlarında iç tesir kuvvetleri kapsamında eğilme momentleri, kesme kuvvetleri ve yatay deplasmanlar hesaplanmıştır. Eylemsizlik analizler sonucunda kazıklarda oluşan eğilme momenti, kesme kuvveti ve yatay deplasmanalar sırasıyla Şekiller 14-16'da görülmektedir.

Bu analizlere göre kazıklarda oluşan maksimum eğilme momenti 84.4 kN.m, maksimum kesme kuvveti 73.5 kN ve maksimum yatay deplasman 0.58 mm hesaplanmıştır. Çalışma alanının depremselliği ve zemin profili değerlendirildiğinde; sahanın yerel zemininin ZC olması, belirli derinliklerde kaya profillerinin bulunması, mostranın derinde olmaması ve dolgu tabakasının da oldukça sıkı olması eylemsizlik etkileşimleri sınırlandırmıştır. ZC yerel zemin sınıfı bir zemin profilinde beklenildiği üzere eylemsizlik etkileri ihmal edilecek seviyelerde oluşmuştur. Benzer durum Y-Y eksininde yapılan analizlerde de gözlemlenmiştir. Bu analizlere göre kazıklarda oluşan maksimum eğilme momenti 84.4 kN.m, maksimum kesme kuvveti 73.5 kN ve maksimum yatay deplasman 0.58 mm hesaplanmıştır.



Şekil 16. X-X doğrultusunda eylemsizlik analiz sonucu belirlenmiş kazıklarda oluşan yatay hareketler ($D_{max}=0.58$ mm)

5.4 Süperpoze yaklaşımıyla kinematik ve eylemsizlik etkileşimlerin birleştirilmesi:

TBDY 2018 16C.5 başlığı altında verilen yaklaşımla, YKZE analizi sonucunda elde edilmiş kinematik ve eylemsizlik etkileşim sonuçları süperpoze yöntemi ile birleştirilmiştir.

Kazıkta Toplam Çıktılar		
x ve y yönünde	Göz önüne alınan doğrultu -x yönünde	Göz önüne alınan doğrultu -y yönünde
• $M_{x,=} M_{x,kinematik} + M_{x,eylemsizlik}$		
• $V_x = V_{x,kinematik} + V_{x,eylemsizlik}$	$M_{\rm T} = M_{\rm T} \pm 0.2M_{\rm T}$	• $M_T = M_T + 0.3 M_T$
• D _x = D _{x,kinematik} + D _{x,eylemsizlik}	• $V_{T,-} = V_{x,+} + 0.3 V_{y}$	• $V_{T,=} V_{y,+} + 0.3 V_x$
• My,= My,kinematik+ My,eylemsizlik	• $D_{T,=} D_{x,+} + 0.3 D_y$	$\bullet D_{T,}=D_{y,}+0.3D_{x}$
• $V_y = V_{y,kinematik} + V_{y,eylemsizlik}$		
• $D_y = D_{y,kinematik} + D_{y,eylemsizlik}$		

Şekil 17. Kinematik etkileşim ve eylemsizlik etkileşim etkilerinin birleştirilmesi

Bu yaklaşıma göre kazıkların tasarımı için kullanılacak nihai kesit tesirleri dikkate alınan deprem doğrultusunda elde edilen sonuçlarla zıt yöndeki sonuçların %30'unun toplanması ile hesaplanmıştır (bkz. Şekil 17). Hem kinematik hem de eylemsizlik etkileşim analizlerinde fore kazıklar doğrusal davranış sergilediği kabul edilen çubuk elemanlar olarak değerlendirilmiştir. Bu sebeple, kinematik etkileşim analizi sonucu elde edilmis eğilme momentleri R=2.5 davranış katsayısı ile, eylemsizlik etkileşiminden elde edilen kesit tesirleri ise bodrumlu yapılarda davranış katsayısı olan R=1.5 katsayısı ile azaltılmıştır. Tablo 7' de YKZE analizlerinden elde edilmiş ve azaltma katsayıları ile yeniden hesaplanmış kesit tesir değerleri verilmiştir. Bu tabloya göre kinematik ve eylemsizlik etkilerinin birbirine yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Bu sonuçlara göre en yüksek kesit tesirleri X doğrultusunda M_T=178 kN.m, V_T=312 kN ve yatay yer değiştirme is Y doğrultusunda D=11 mm olarak hesaplanmıştır.

			Doğrus (Azaltılmat	sal Analiz mış Sonuçlar)	Davranış Katsayılarıyla (Azaltılmış Sonuçlar)			
Analiz	Yükleme Yönü	M (kN.m)	V (kN)	D (m)	M (kN.m)	V (kN)	D (m)	
Kinematik Etkileşim	(X)-12	175.0	175.1	0.0080	70.0	175.1	0.0080	
	(Y)-13	215.0	194.0	0.0080	86.0	194.0	0.0080	
Eylemsizlik	(X)-12	85.0	74.0	0.0006	56.7	49.3	0.0004	
Etkileşim	(Y)-13	81.0	76.0	0.0006	54.0	50.7	0.0004	
Toplam	(X)-12	260.0	249.1	0.0086	126.7	224.4	0.0084	
	(Y)-13	296.0	270.0	0.0086	140.0	244.7	0.0084	
Birleştirilmiş Toplam	(X)-12	348.8	330.1	0.0112	168.7	297.8	0.0109	
	(Y)-13	374.0	344.7	0.0112	178.0	312.0	0.0109	

Tablo 7. YKZE analizleri sonucunda en kritik kazıkta gözlemlenen eğilme momenti (M), kesme kuvveti (V) ve yatay yer değiştirme (D) değerleri

6 Sonuçlar

Bu çalışmada bu durum amaçlanarak bir vaka analizi olarak Gaziantep ilinde yapılması planlanan Bodrum + Zemin + 11 normal kattan oluşan toplam 13 katlı yapının kazıklı radye temel sistemi TBDY-2018 (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği) kapsamında Alt sistem Yöntem-III durumu dikkate alınarak tasarlanmış ve gerek kinematik analiz gerekse de eylemsizlik analizi dünyada yaygın olarak kabul gören gelişmiş bir sonlu elemanlar analiz programı olan lisanslı Plaxis-3D Ultimate versiyon-2025 yazılımıyla yapılarak alternatif bir hesap yöntemi sunulmuştur. Bu kapsamda çalışmanın neticesinde varılmış önemli sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulduğu gibidir.

1.Kazıklı radye temel sistemlerin tasarımı özellikle sismik etkilere maruz kalan yapıların dayanıklılığı kapsamında önemli yer tutmaktadır. Bu temel sistemlerinin tasarımı her ne kadar geoteknik mühendislerinin sorumluluğunda olsa da disiplinler arası bir çalışmayı zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda geoteknik mühendisliğinin yanı sıra deprem mühendisliği ve yapı mühendisliği gibi alt disiplinlerinde bu tip temel sistemlerin tasarımında Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi (YKZE) açısından katkıları kaçınılmazdır.

2.YKZE analizlerinde zemin modelinin yaylarla temsil edilerek çözüm yapılması her ne kadar genel kabul gören bir yaklaşım olsa da zemin modelinin yaylar yardımıyla temsil edilmesi gerçekçi bir çözümü birebir yansıtmamaktadır. Zemin modelinin daha gerçekçi tanımlanabildiği bir sayısal ortamda kinematik ve eylemsizlik analizlerinin yapılabileceği bu çalışma ile sunulmuştur.

3.Zemin profillerinin sıkı dolgu tabakalarından ve kireçtaşı kil formasyonlarından oluşması, buna bağlı tabakaların yüksek Vs yüzey kayma dalga hızlarına sahip olması ve Vs₃₀ değerine bağlı kinematik ve eylemsizlik etkileşim çok düşük çıkmıştır. ZC sınıfı zeminlerde kinematik ve eylemsizlik etkileşimin düşük olacağı yargısının bu sonuçlarla örtüştüğü gözlemlenmiştir.

4.Taban kesme kuvvetleri yapılan üst yapı analizlerinde Ex=4485 kN ve Ey=1205 kN olarak elde edilmiştir. Bu değerler bölgenin depremselliği, yapının perdeli yapı olması sebebiyle tasarımda kullanılan yüksek R ve D azaltma katsayıları dikkate alındığında düşük değerler olarak hesaplanmıştır.

Teşekkür

Bu çalışmanın hazırlanmasında önemli katkısı olan Sebzeci İnşaat firmasına ve firma sahibi sayın İnş. Müh. Tevfik Sebzeci'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %13

Kaynaklar

- [1] M.A. Yiğit, M.İ. Onur ve E. Balaban, Kazıklı temellerde zemin kazık etkileşimi parametrelerinin incelenmesi. GUMMFD, 37(2) 625–640, 2022. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.825224.
- [2] O. Bilal ve Y. Fahjan, Dinamik yapı-kazık-zemin etkileşimi bağlamında temel gömme derinliğinin spektral tepki üzerindeki etkisi. Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 30(1), 44-52, 2024. https://doi.org/10.5505/pajes.2023.05046
- [3] E. Keskin, Betonarme Çerçeveli Bir Yapıda Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Kazık Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2018.
- [4] M.N. Aydınoğlu, Zayıf Zeminlerde Yapılan Binalarda Dinamik Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi İçin Uygulamaya Yönelik Bir Hesap Yöntemi. Boğaziçi Üniversitesi Yayınları, İstanbul, Türkiye, Teknik rapor 2011/1, Mayıs 2011. http://www.koeri.boun.edu.tr/ depremmuh/raporlar/Aydinoglu_Etkilesim_Rapor.pdf
- [5] H.R. Tabatabaiefar, B. Fatahi ve B. Samali, Seismic Behavior of Building Frames Considering Dynamic Soil-Structure Interaction. International Journal of Geomechanics, 13(4): 409-420, 2013. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.19435622.000023
- [6] G. Mylonakis, A. Nikolaou ve G. Gazetas, Soil-pilebridge seismic interaction: kinematic and inertial effects. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 26(3), 337-359, 1997. https://doi.org/10.1002/(SICI)10969845(199703)26:3 <337::AID-EQE646>3.0.CO;2-D.
- [7] M. Kutanis ve M. Elmas, Non-Linear Seismic Soil-Structure Interaction Analysis Temeld on the

Substructure Method in the Time Domain. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 25(6), 617-626, 2001.

- [8] J.A. Gutierrez ve A.K. Chopra, A substructure method for earthquake analysis of structures including structure-soil interaction. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 6(1), 51-69, 1978. https://doi.org/10.1002/eqe.4290060107.
- [9] J.P. Wolf, Dynamic soil-structure interaction. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1985.
- [10] Y. Hayashi ve I. Takahashi, Soil-structure interaction effects on building response in recent earthquakes. Third UJNR Workshop on Soil-Structure Interaction, California, 2004. https://www.pwri.go.jp/eng/ ujnr/tc/a/ssi_w3/Contributions/Hayashi.pdf
- [11] D. Chu ve K.Z. Truman, Effects of pile foundation configurations in seismic soil-pile-structure interaction. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, 2004.
- [12] A.S. Hokmabadi, A. Fakher and B. Fatahi, Seismic strain wedge model for analysis of single piles under lateral seismic loading. Australian Geomechanics, 46(1), 31-41, 2011. https://www.issmge.org/ uploads/publications/59/67/2.1.UHSSA.pdf
- [13] R.I. Borja, W.H. Wu, A.P. Amies and H.A. Smith, Nonlinear Lateral, Rocking and Torsional Vibration of

Rigid Foundations. Journal of Geotechnical Engineering Structures, 120(3), 491-513, 1994. https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339410(1994)120:3(491)

- [14] H. Matlock and L. Reese, Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles. Soil Mechanics and Foundation Div., 86(5), 63-91, 1960. https://doi.org/10.1061/ JSFEAQ.0000303
- [15] L.C. Reese and R.C. Welch, Lateral Loading of Deep Foundations in Stiff Clay. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 101(7), 633-649, 1975. https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000177
- [16] L.C. Reese, W.R. Cox and F.D. Koop, Field testing and analysis of laterally loaded piles in stiff clay. Proc. 7th Offshore Technology Conference, Houston, Texas, pp.671-690, 1975.
- [17] TBDY-2018: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, 18 Mart 2018.
- [18] I. Alpan, The geotechnical properties of soils. Earth-Science Reviews, 6(1), 5–49, 1970. https://doi.org/10.1016/0012-8252(70)90001-2
- [19] M.B. Darendeli, Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves. Doktora Tezi, Texas University, 362s, Austin, Texas, 2001. https://repositories.lib.utexas.edu/ items/efea68dd-895b-4f28-ac6e-71872ca5291a



NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 803-811



Niğde Ömer Halisdemir Üni**ver**sitesi 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



Review of studies on NAO robot

NAO robot üzerindeki çalışmaların incelemesi

Tuğba Kara^{1,*} 🕩, Ahmet Gökçen² 🕩

^{1,2} Iskenderun Technical University, Computer Engineering Department 31200, Hatay Türkiye

Abstract

Robots are reducing the various workload of humans in numerous fields, shaping many new scientific areas. This review provides an overview of research and developments conducted on the humanoid robot NAO between the years 2020 and 2024. It encompasses a general examination from the robot's physical structure to its hardware and software components. The review categorizes studies related to NAO into three main areas: Human-Robot Interactions, Navigation, and Others. The explanation of recent developments in NAO robot aims to facilitate a deeper understanding of potential advancements in the future of robotics.

Keywords: NAO Robot, Robotics, Human Interaction, Navigation

1 Introduction

Increasing need of information in today's world, the tasks undertaken by humans have slowly shifted to robots. These tasks have wide range of examples such as heavy-duty automotive industry, field of health in cases where risky surgeries take place, autism diseases for the purpose of protecting children's mental health and so on. Within these areas, developments have been made with the help of the robotics. Thanks to these developments, easiness is benefited more than realized in small areas of lives. While we are able to access innovations that make our lives easier faster with the systematic progress of these developments. Examples can be given from many robots that prioritize these different developments specific to each need. For instance, Boston Dynamics, which produces humanoid or dog-like robots for use mostly in the defense industry, small robots responsible for cleaning our house, and the humanoid-looking NAO robot by Aldebran Robotics are the main ones. Studies on robots must successfully implement several basic policies for a robot to perform its task. The most important of these policies are undoubtedly to perceive its environment and act within certain rules in this environment. In a general approach, the tasks of the robot vary with the sensors used, and mechanical designs. NAO robot, which has a wide variety of tasks, offers a rich resource for improvements.

This review article was written in order to present a brief summary of how these diversities lead to new developments, how the improvements progress and how their diversity is brought to the literature in some way. The review summarizes the improvements made on the NAO robot

Öz

Robotlar birçok alanda insanların çeşitli iş yükünü azaltarak birçok yeni bilimsel alanı şekillendirmektedir. Bu inceleme, 2020-2024 yılları arasında insansı robot NAO üzerinde yapılan araştırma ve gelişmelere genel bir bakış sunmaktadır. Robotun fiziksel yapısından donanım ve yazılım bileşenlerine kadar genel bir incelemeyi kapsamaktadır. İnceleme, NAO ile ilgili çalışmaları üç ana alanda kategorize etmektedir: İnsan-Robot Etkileşimleri, Navigasyon ve Diğerleri. NAO robotundaki son gelişmelerin açıklanması, robotiğin geleceğindeki potansiyel ilerlemelerin daha derinlemesine anlaşılmasını kolaylaştırmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: NAO Robot, Robotik, İnsan Etkileşimi, Navigasyon

under three main topics. These are human-robot interaction (HRI), navigation and other.

2 Technical aspects of NAO robot

NAO robot has a human-like look at height of up to 58 cm. It has head, torso, arms, and legs. The NAO has range of sensors like cameras, microphones, sonars and tactile sensors which enable it to detect and interpret surroundings. It has a lot of actuates and joints provided at the different body parts that make it move smoothly and accurately. A robot offers an onboard computer that is capable of processing sensory data, motor control and the very complicated decision tasks. The existence of the software platform that is used to program NAO's behavior and interactions makes it accessible for the developers to do programming as well. The NAO principal environment is Choregraphe, which is a graphical interface. Also, NAO supports different programming languages like Python and C++ etc. NAO is powered by the speech recognition, natural language processing features which make it to have a conversation with its user. The LED eyes and audio cues make the robot really interactive for users. NAO also has wireless and Bluetooth connections. It can be tapped into for use with the external hardware and software to execute the duties such as web browsing, data retrieval and cloud computing. Technical details of the NAO robot can be found in Table 1. Also, before passing into studies for better understanding, we present the NAO robot in Figure 1.

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: : tugbakara.lee23@iste.edu.tr (T. Kara) Geliş / Received: 09.07.2024 Kabul / Accepted: 27.12.2024 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngumuh.1509692



Figure 1. NAO robot [1]

3 Studies on NAO robot

In this section, we will examine the various studies and developments conducted on the NAO robot under three main categories: Human Interaction, Navigation, and Others.

3.1 Human Interaction

The purpose of this section is to explore how humans react towards NAO like in the experiments like speech recognition, natural language processing, face recognition, emotion detection and social interactional abilities.

To begin with the research, Trifirò et al. [2] called roboceptions through interacting with human beings. It is about how the robot will grasp the relationship between linguistic and bodily sensations. The robot's language learning activity uses a human interaction to articulate feelings, before a Dual-NMT-based grounding language technicality. The robosceptions are perceived by a synthetic somatosensory system. Using the RoboLang to analyze roboceptions helps the robot express its basic needs. Translation between RoboLang starts from the close resemblance values and bilingual datasets in bid to overcome the obstacle of small training data. This study uses NAO robot equipped with data collection sensors for research set up and data collection.

Yet another investigation of the NAO robot from Softbank Robotics related to HRI Nama et al. [3] find out that effective gesture-based communication and interaction could improve learning outcome for special need students in elementary level. This experiential program deploys Leap Motion together with custom made action-reaction correlations to weave kids' hand gestures with robot reactions. A strategy aimed at motivating learner to enjoy the learning process. The result of the research outlined to transform the very current content and apply close-loop HRI of disadvantages for kids with special needs face while learning. This research is partly attained by incorporating robotics and gesture recognition technology into learning processes of children. By doing so, according to the study, the activities will become stimulating and interactive, leading to improvements of their cognitive development and reducing the boredom of the children during education activities.

Recupero et al. [4] reveal the approach of the NAO to acquire the knowledge and behavior to fulfill the expressed wishes of the users when they speak. This one represents the actor of robot ontology and situates through the natural language processing engine to comprehend the user commands. There are two different kinds of operational modes for the robot: STATELESS and STATEFUL. When it concerns STATELESS mode, every command is implemented separately. However, in the STATEFUL mode, the robot decides which action to perform after it determines its current position. The system resolves the problem of identifying and running the action commands that fall upon a robot status, and it effectively manages the compound expressions. It describes the technical infrastructure including that of the NAO robot, the programming environment and the cloud-based neural network processing (NLP). To this end, the procedure of getting information from user commands, identifying desired actions and performing robot interactions is clearly stated within the study.

In another study of HRI, Romero-García et al. [5] presents Q-CHAT-NAO, an observation-based autism screening system supported by a NAO robot, which adapts six questions from the Q-CHAT-10. Q-CHAT-NAO collects information directly from toddlers. In this way, detecting early indicators of autism spectrum disorder (ASD) is achieved. Machine learning models, including decision trees, random forests, and boosted trees, are employed. Evaluation metrics is crucial for sensitivity to ensure correct classification of ASD cases. Activities involving the robot and the child, monitored by a therapist, provide input for classification. However, not all original questions are adaptable, resulting in a subset of six questions for the Q-CHAT-NAO.

The development of an integrated robotic system named ChildBot, designed to engage in educational and entertainment activities with children, is presented by Efthymiou et al. [6]. ChildBot incorporates sensors and robotic agents. With this incorporation, robust coordination in complex Child-Robot Interaction (CRI) is achieved. To make communication between the channels, sensors and perception modules are integrated into ChildBot. The Sense-Think-Act paradigm is followed by the system, and an indoor-based architecture is employed. Additionally, the development and integration of perception modules such as audio-visual active speaker localization, 6-DoF object tracking are also applied. The system showed that it enables autonomous interaction between children and robots. NAO robot is used as a supervisor in a game in this study.

In another HRI area, Ivani et al. [7] introduces a therapeutic program for children diagnosed with ASDs. The aim of the program is to integrate an algorithm within the framework of IOGIOCO. This algorithm is designed for gesture recognition. Also, the program is operated within the NAO robot. In the recognition part, firstly, 3D coordinates of body key points captured by a Kinect sensor are utilized. Then, the Residual Neural Network automatically identifies and evaluates gestures performed by children. The recognition process occurs in real-time, allowing for

immediate feedback from the robot based on the accuracy of the gestures. Aim behind this feedback is to aid therapists to help their engagement with the program and guiding the children.

A system, Handie, is designed to facilitate interactions between autonomous mobile and cyber physical systems by Håkansson and Amberkar [8]. It is designed especially in humanoid robots like Softbank Robotics' NAO robot v6 and users with hand signs and facial mood expressions. These non-verbal cues serve as commands to the robot, enabling actions such as information retrieval, music playback, and physical tasks execution. Handie uses a deep learning recognition to detect hand signs and facial expressions. The system architecture involves the integration of the NAO robot with an external computer system. The NAO follows the steps like capturing images, recognizing hand signs and mood expressions, then executing corresponding actions based on user input, respectively. The layer manages communication between the robot and the hand signs recognition component (HSRC). Behind the HSRC working logic convolutional neural networks are employed for image classification.

Gaze cueing effects in both young and older adults are investigated by Morillo-Mendez et al. [9]. For the gaze cueing task, NAO robot's head is used as the central cue observing from the back. The primary aim was to realize agerelated disparities in response to the robot's head orientation. Particular focus is the scenarios where visual eye cues were absent. Also, the analysis was conducted by excluding data from three recruits who in overall seem to be outliers. At the same time the accuracy of the remaining sample was almost zero error. Given the participants' reaction time in the ANOVA tests, age, stimulus synchrony, stimulus onset asynchrony, and gaze congruency main effects showed difference which indicated how gaze-cueing happens in different situations and populations.

Jeon et al.' [10] purpose in this paper is to present an approach to AI interactivity with the NAO robot in the process of balancing tables with time-sensitive training from a human trainer. The system uses Deep Q-Network (DQN). Then the system integrates sentiment through the training session from trainer speech using an originally designed reward function. The research uses this method on the NAO robot. It detects the current image of the table state and adjusts its joint parameters to adapt the executed actions to the planned ones. The human trainer gives the robot a judgment, i.e. if the robot's movement is good or bad, and the evaluation is involved in the DQN's environment reward. The interactive deep reinforcement learning (DRL) architecture gives full command over the robot learning and doing better as a result of a high rate of task completion success. Hyper parameters of the DQN training can be found in Table 2.

3.2 Navigation

In this section, the findings of study on the navigation of the NAO robot are reviewed. This review involves navigation of NAO autonomously within its environment, including such functions as obstacle avoidance and path planning. Knowing NAO's capacity to navigate its movement through different realistic situations is very significant for the best possible mobility. In addition, the trajectory of studies in this field has been studied to see different top areas of research they are focusing on.

To begin with the core logic of navigation, Kumar et al. [11] introduce a hybrid control system. From the proposed hybrid control system, enhancing of humanoid navigation is expected. For this purpose, regression analysis with fuzzy logic is combined. Inputs coming from NAO's ultrasonic sensors are provided to the regression architecture. Regression is processed these inputs to generate a temporal turning angle. This temporal turning angel is further refined by the fuzzy controller to obtain the ultimate turning angle. This approach provides smooth motion control, obstacle avoidance, and goal-reaching. Petri-Net aids in managing inter-collision risks in the navigation of multiple NAOs.

A novel hybrid navigation system tailored for NAO humanoid robots is presented by Kashyap et al. [12]. This navigation system consists of the Dynamic Window Approach (DWA) and Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) techniques. Optimizing the velocity and turning angles is discussed to prevent obstacles and reach targets effectively. The hybrid approach is evaluated across both static and dynamic terrains. For these environments, it has been noted that there are risks of intercollision in multi-robot. Those problems are mitigated by the incorporation of Petri-Net controllers. In the simulations and real-world experiments, the proposed technique showed its ability to achieve collision-free paths while reaching designated targets. The article pointed out its potential in tackling more intricate terrains such as stairs or slopes. Block diagram of the DWA- TLBO can be found in Figure 2.



Figure 2. Block diagram of hybrid DWA-TLBO [12]

García and Shafie [13] propose Safe Reinforcement Learning (SRL) to enhance NAO's walking behavior. SRL makes robotwalk faster while reducing falls. Policy Reuse for Safe Reinforcement Learning (PR-SRL) improves walking behavior by combining an increasing risk function. Experimental evaluation on a NAO robot demonstrates PR-SRL's minimizes falls compared to state-of-the-art algorithms.

Gait planning for humanoid robots is discussed for their stability and task execution. In this paper, a hybrid approach using the linear inverted pendulum model and particle swarm optimization (PSO) tuned Proportional Integral Derivative (PID) controller is proposed by Kashyap et al. [14]. The linear inverted pendulum model (LIPM) is coupled with center of mass (COM) and zero moment point (ZMP) criteria. LIPM aids in selecting step length and period. Also, sensory data and desired trajectory help in inverse kinematics for trajectory planning. The PSO tuned PID controller optimizes parameters for obstacle avoidance and stability. Aim behind this approach is to reduce travel time and length. Simulation and real-world experiments show a significant reduction in stabilization time and overshoot.

Kashyap et al. [15] described the implementation of navigation approaches for single and multiple NAO robots. In this approach, collision-free path optimization in static and dynamic terrains are main focus. An Adaptive Networkbased Fuzzy Inference System controller is utilized. This controller generates a transitional driving angle based on obstacle distance. Output of this process is optimized by a TLBO approach to produce an optimum driving angle (ODA). Path selection is discussed based on Euclidean distance and ODA. Integration of a dining philosopher controller solves inter-collision issues in multiple NAO navigation. Simulation outcomes showed the controller's importance resulting in optimizing path length and travel time.

For the further implementation again, Kashyap et al. [16] focused on optimizing path length, energy demand, and task completion time problems. The solutions are discussed as development and implementation of a hybrid navigational controller for humanoid robotics. The aim is to improve path planning efficiency and task completion in humanoid robots. The hybrid controller includes Improved Spider Monkey Optimization (ISMO) approach besides Regression Analysis (RA) approach. RA approach takes the obstacle and target locations to determine navigational directions. Afterwards, the ISMO approach refines trajectory by adjusting turning angles. Also, B-Spline path smoother is applied to stabilize trajectory step by step. The effectiveness of the hybrid controller is attributed to the longer decision-making times and higher computational costs. Experiments were done in simulation and real time using NAO robot. The combination of RA and ISMO techniques showed the success in the experiments. Improvement in the path length and task completion of proposed approach percentages are presented in Table 3.

Navigation for humanoid robots and multi-objective problems are discussed by Kashyap et al. [17]. Under these solutions lay down integrating modified multiple adaptive neuro-fuzzy inference system (MANFIS) and multiobjective sunflower optimization (MOSFO) techniques. These generate optimal steering angles for obstacle avoidance. Operation is done with two steps. In the first step MANFIS takes the inputs like obstacle distances and target direction then it is used to determine intermediate steering angles. Then as a second step MOSFO technique provides the final steering angle. In the simulation environment of WEBOT using NAO, experiments' deviations are achieved under 5% compared to real-time experiments. Optimization of trajectory planning is aimed by combining modified MANFIS and MOSFO.

A framework is proposed by Kasaei et al. [18] to provide human-like walking. The framework is created by combining walking approach and DRL. The framework has six modules to reduce complexity and increase flexibility. The core of the framework is a specific two masses for upper and lower body modeling. An adaptive and fully parametric reference trajectory planner and an optimal controller are designed based on this dynamic model. A learning framework is developed using Genetic Algorithm (GA) and Proximal Policy Optimization (PPO) algorithms. Aim behind the GA and PPO is to optimize parameters and improve stability by adjusting arm movements and CoM height.

Kashyap et al. [19] discuss the development and implementation of a hybrid control system for NAO. With this development, emphasizing trajectory planning and obstacle avoidance is achieved. The primary aim is to achieve optimum steering angles for NAO robots to navigate in environments with minimum effort. The approach involves a three-step optimization procedure including regression analysis (RA), cell decomposition (CD), and whale optimization algorithm (WOA). Firstly, initial steering angles based on sensory data are provided by RA, then the configuration space is transformed into cell regions for path planning by CD. Finally the steering angles are optimized based on the characteristics of hunting prey by WOA. With this approach NAO is prevented from getting trapped in local minima. Then, Dining Philosopher Controller (DPC) is integrated to prioritize navigation among multiple NAO robots. With this addition, the DPC integration, inter-collisions are prevented.

A deep learning-based footstep planning method making use of Generative Adversarial Networks (GANs) for indoor navigation is proposed by Mishra et al. [20]. The objective of the program is to achieve efficient and accurate path planning within Robot Operating System (ROS) framework. Traditional path planning algorithms like Rapidly Exploring Random Tree (RRT*) and A* are found to be limited in narrow paths. Experimental results demonstrate the GANbased approach over traditional algorithms, achieving approximately 93% accuracy. The design combines GANbased method generation. Feedback techniques through ROS topics for step specific Monte Carlo localization to perform for robust localization in complex indoor environments. Odometry estimation is done by using classical approaches and IMU sensors. The footstep planner node utilizes odometry information and path images to employ weighted A* and probabilistic R* for the planning. The GAN-based approach fits for unlocking vision-based capabilities for humanoid robots. Also, the GAN-based approach facilitates navigation through complex environments and dynamic obstacle avoidance through path replanning. Experiments are done on NAO in simulation.

In the study, Kashyap et al. [21] aim to develop an obstacle-free route for single and multiple humanoid robots. A Firefly Algorithm (FA) strategy is utilized for autonomous motion. The FA agent's response is determined by obstacle positions and distances between robots. The FA approach provides a driving angle to aid the robot in obstacle avoidance. Experiments are conducted on the NAO robot using the WEBOT platform for simulation. Multiple simulation test demonstrates that the effectiveness of the proposed approach in navigating the NAO robot in complex environments.

The navigation of humanoid robots in complex environments was investigated by Muni et al. [22]. Algorithm uses a fuzzy embedded neural network-based controller. Proper target angles were obtained using the Mamdani fuzzy algorithm with obstacle distances. Petri-net controller supplies to help dynamic path analysis. Many single humanoid robots are used for simulation and guidance testing in a variety of challenging environments. Smooth communication is provided by a cascade neural network with a fuzzy system and a Petri net controller. The cascade trains the neural networks to obtain the required target angle, which is fed to the fuzzy controller to determine the effective target angle. The Petri grid controller resolves conflicts when multiple robots try to interact with each other. It is done by prioritizing motion planning. The experiments use V-REP simulation software and are simulated under laboratory conditions. The results for both conditions are compared, showing accuracy within acceptable errors.

Vikas et al. [23] analyzed the optimization of path planning for humanoid robots in rough paths in the article. Combining improved gravitational search algorithm (IGSA) with a differentially perturbed velocity approach was introduced. Aim behind this was to mitigate limitations of the primary IGSA. The algorithm aimed to minimize path length from source to goal, also stability and collision avoidance during locomotion. Humanoid robots' interaction to avoid collisions and environments considering obstacles for decision-making are the main parts of the proposed approach. The NAO robot was used in this study. Additionally, the Petri-net was discussed to handle conflicts during the navigation.



Figure 3. Scheme of proposed controller [24]

To step further, Vikas and Parhi [24] analyze the navigation of humanoid robots in complex terrains. In the analysis, classical approaches with reactive techniques are combined. These are linear regression based approach with gravitational search algorithm (GSA). Product of them is RGSA, supplemented with Chaos for optimizing path planning. To achieve the smooth trajectory planning, numerous chaotic maps are employed. The NAO robot is tested with static and dynamic obstacles during the experiments. The comparative study with other methods

ensures cost-effectiveness and simplicity of the approach, and also shows that solutions can be applied in the future in sports, however it has limitations to deal with obstacles of autonomous movement. However, GSA also prevent several obstacles such as early convergence, adequate detection at later stages etc. Proposed controller scheme can be found in Figure 3.

3.3 Others

In this part a variety of studies that focus on several aspects about robotic humanoids rather than only navigation and HRI can be found.

A method for improving 3D object recognition for the NAO robot is studied by Coquin et al. [25]. In the study an IoT multi-camera system is used. Cameras are integrated through an IoT platform. Feature extraction and belief functions are employed to address uncertainties and conflicts in recognition. Both global and local feature-based recognition algorithms are utilized to analyze extracted features, ensuring robust recognition in uncertain environments.

The approach called End-User Development of Modeldriven Adaptive Robotics Software (EUD-MARS) was presented by Akiki et al. [26]. EUD-MARS enables endusers to develop robotics software without requiring advanced technical skills. In this approach, software developers prepare robot profiles supporting with code based APIs. EUD-MARS was evaluated technically by controlling various robots, including Lego Mindstorms bots, an iRobot Create vacuum cleaner, a NAO humanoid, and a Parrot Bebop 2 drone. Software developers provided feedback on the XML-based language and visual tool for defining robot profiles and API configurations. In Figure 4, proposed EUD-MARS approach is presented.



Figure 4. EUD-MARS approach [26]

Riccio et al. [27] introduces an iterative learning algorithm which is called as LoOP. LoOP combines planning and learning techniques to generate action policies. The paper remarked that LoOP combined with Monte-Carlo Search Planning and Q-learning has limitations in the planning and learning methods. It achieves focused exploration during policy refinement on the NAO robot. In multi-robot scenarios, LoOP makes the robot learn competitive policies without the need for joint action modeling.

Version	Release Year	Dimensions	Sensors	Battery	Processor	Connection	RAM	Software
Version 6	2018	574x311x2 75 mm 5.48 kg	Microphones x4 2D Camera x2 Gyrometer x1 (3-axis) IMU x1 (3-axis) Sonar x4 FSR x8	Lithium- Ion 62.5 Wh	ATOM E3845	Ethernet (RJ45) WIFI (IEEE 802.11a/b//n) Bluetooth	4 GB DDR3	Gentoo
Version 5	2014	574x311x2 75 mm 5.48 kg	Microphones x4 2D Camera x2 Gyrometer x1 (2-axis) IMU x1 (2-axis) Sonar x2 FSR x8	Lithium- Ion 48.6 Wh	ATOM Z530	Ethernet (RJ45) WIFI (IEEE 802.11a/b//n) USB	1 GB	Gentoo
Version 4	2011	574x311x2 75 mm 5.48 kg	Microphones x4 2D Camera x2 Gyrometer x1 (2-axis) IMU x1 (1-axis) Sonar x4 FSR x8	Lithium- Ion 48.6 Wh	ATOM Z530	Ethernet (RJ45) WIFI (IEEE 802.11a/b//n) USB	1 GB	Gentoo

Table 1. Technical details of NAO robot over the years

There were two options called as Gaussian Mixture Models and Deep Neural Networks in application of LoOP for the nonlinear data. It is observed that LoOP reduces computational load and presents effective policy generalization, however it faces high simulation calls and reliance.



Figure 5. Morphological development stages of the NAO robot [29]

When the communication comes into the topic, Grillo et al. [28] focuses on a Trust Framework for task sharing among robots, in scenarios like robots must cooperate without full knowledge of each other's capabilities. The system architecture, implemented in ROS, enables robots to execute actions, and verify the execution of actions by other robots. Real-world experiments are tested on NAO robot and two Pepper robots. The experiments explore the robots' volume levels and positions, as well as their dispositions towards each other.

Combining navigation with mechanic, Naya-Varela et al. [29] explored the different developmental ways on a NAO robot to learn a bipedal walking. The researchers implemented five developmental ways by varying in speed and order. The NAO robot was controlled by an artificial neural network (ANN) optimized through an algorithm. The ANN's inputs and outputs had purposes of generating periodic signals and controlling the actuation of joints, respectively. Also, morphological parameters were considered focusing on legs. Smooth developmental ways were found to be effective in maintaining stability and learning performance. In Figure 5, development stages of the NAO morphology are described.

Botta et al. [30] explores methods and applied in robots like NAO, Amigobot to protect against attacks. It is demonstrated that protecting robots at the OSs and network levels is more critical than the physical level. However, it is remarked that protecting robots at the physical environment is important to understand their cyber security problems. The cyber security of robots necessitates a parallel study across all levels. General issues from the cyber security is described in Figure 6.

Table 2. Hyperparameters of DQN training

Parameter	Value
Learning rate a	0.001
Discount factor γ	0.9
Epsilon ε	20
Number of episodes	20.000
Number of voice feedbacks	300
Shrinking feedback factor d	0.1

An artificial somatosensory system is developed to enable the robot to perceive its embodiment while performing tasks. These perceptions enable the robot to move with its physical needs while the task is also running. On the test-bench, NAO was utilized, compatibility of the NAO fits the study's objectives. Through the incorporation of roboceptions, awareness of robot's physical condition is gained by Augello et al. [31].



Figure 6. Morphological development stages of the NAO robot [30]

Kuo and Chen [32] explore a way to help robots become more independent. The main idea is teaching a humanoid robot how to pick up and put down objects by itself. This is done through a DRL, combined with fuzzy logic. It is found that the best computer method for this was the artificial bee colony algorithm. Deep learning helps the robot get picking up and putting down things. Fuzzy logic makes it even better by increasing how often the robot succeeds. Method is shown that it works well by testing. The method is used on NAO robot, making it learn how to grab things and put them where they are supposed to go. This learning is broken into two parts: first, the robot learned to grab things, and then it learned to place them in certain spots. Optimization algorithms are used to tweak things and make the robot's learned skills work better. DRL and Fuzzy logic usage example can be found in Figure 7.



Figure 7. DRL and fuzzy logic usage purpose [32]

Table 3.	Improvement	percentages of	proposed	approach	referenc	ing IGA techn	iaue
1 4010 01	mproveniene	percentages or	proposed	approach	101010110	ing rorr coolin	ique.

Sl. No	IGA technique		RA-ISMO controller		Improvem	Improvement (%)	
	Length	Time	Length	Time	Length	Time	
1.	22.7273	234	24.37	264	-7.23	-12.82	
2.	22.7273	234	18.11	173	20.32	26.07	
3.	22.7273	234	21.09	207	7.2	11.54	
4.	22.7273	234	19.52	195	14.11	16.67	
Avg.	22.7273	234	20.7725	209.75	8.6	10.365	

4 Findings and discussion

We can see the contributions over the year with respect to search areas in Table 4.

Table 4. Number of contributions over the year

Year	Human-Robot Interaction	Navigation	Others
2020	3	4	2
2021	1	4	1
2022	3	4	1
2023	2	2	4
2024	-	-	1

5 Conclusion

NAO is a humanoid robot. Its humanoid appearance, coupled with its ease of adaptation to developments, enables it to be utilized in various fields for collaboration with humans. This review presents advancements in the NAO robot from 2020 to 2024, focusing on navigation, HRI, and other enhancement and development types. The current developments on NAO robot can perform many tasks; however, more development needs to reach perfection such as improving processor-based algorithms to decrease the need for external computers, prediction of battery percentage, etc. Undoubtedly, although navigation is not a new development area, realizing it in humanoid robotics is a new area that can be considered, so it is a fact that the improvements that have been made and will be made here will continue. In addition, the HRI field comes across as a much newer field and allows the interaction between people who are not interested in technology and robots to be more mellifluous. Combining the increasing artificial intelligence activities in the field of navigation with navigation algorithms and creating more understandable and easily usable interfaces developed for HRI can be achieved with a review article that can be a source for new developments and ideas.

Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

Smilarity Rate (iThenticate): %16

References

- [1] NAO Robot Common Appearance https://www.aldebaran.com/themes/custom/softbank/i mages/full-nao.png, Accessed 1 March 2024.
- [2] I. Trifirò, A. Augello, U. Maniscalco, G. Pilato and F. Vella, How are you? How a Robot can Learn to Express its own Roboceptions. Procedia Computer Science, 176, 480–489, 2020. https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.08.050.
- [3] T. Nama, S. Deb, B. Debnath and P. Kumari, Designing a humanoid robot integrated Exer-Learning-Interaction (ELI). Procedia Computer Science, 167, 1524–1532, 2020. https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.363.
- [4] D. Reforgiato Recupero and F. Spiga, Knowledge acquisition from parsing natural language expressions

for humanoid robot action commands. Information Processing & Management, 57(6), 102094, 2020. https://doi.org/10.1016/j.ipm.2019.102094.

- [5] R. Romero-García, R. Martínez-Tomás, P. Pozo, F. de la Paz and E. Sarriá, Q-CHAT-NAO: A robotic approach to autism screening in toddlers. Journal of Biomedical Informatics, 118, 103797, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jbi.2021.103797.
- [6] N. Efthymiou, P. P. Filntisis, P. Koutras, A. Tsiami, J. Hadfield, G. Potamianos and P. Maragos, ChildBot: Multi-robot perception and interaction with children. Robotics and Autonomous Systems, 150, 103975, 2022. https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103975.
- [7] A. S. Ivani, A. Giubergia, L. Santos, A. Geminiani, S. Annunziata, A. Caglio, I. Olivieri and A. Pedrocchi, A gesture recognition algorithm in a robot therapy for ASD children. Biomedical Signal Processing and Control, 74, 103512, 2022. https://doi.org/10.1016/j.bspc.2022.103512.
- [8] A. Håkansson and M. S. Amberkar, The Handie system: Hand signs interaction with autonomous, mobile cyber-physical systems. Procedia Computer Science, 207, 3681–3690, 2022. https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.09.428.
- [9] L. Morillo-Mendez, O. M. Mozos and M. G. S. Schrooten, Gaze cueing in older and younger adults is elicited by a social robot seen from the back. Cognitive Systems Research, 101149, 2023. https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2023.101149.
- [10] H. Jeon, D.-W. Kim and B.-Y. Kang, Deep reinforcement learning for cooperative robots based on adaptive sentiment feedback. Expert Systems with Applications, 121198, 2023. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121198.
- [11] P. B. Kumar, M. K. Muni and D. R. Parhi, Navigational analysis of multiple humanoids using a hybrid regression-fuzzy logic control approach in complex terrains. Applied Soft Computing, 89, 106088, 2020. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106088.
- [12] A. K. Kashyap, D. R. Parhi, M. K. Muni and K. K. Pandey, A hybrid technique for path planning of humanoid robot NAO in static and dynamic terrains. Applied Soft Computing, 96, 106581, 2020. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106581.
- [13] J. García and D. Shafie, Teaching a humanoid robot to walk faster through Safe Reinforcement Learning. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 88, 103360, 2020. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.103360.
- [14] A. K. Kashyap and D. R. Parhi, Particle Swarm Optimization aided PID gait controller design for a humanoid robot. ISA Transactions, 2020. https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.12.033.
- [15] A. Kumar Kashyap, A. Pandey, D. R. Parhi and A. Sharma, Path optimization for multiple humanoid robot using TLBO based ANFIS controller in obscure environment. Materials Today: Proceedings, 2021. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.756.

- [16] A. Kumar Kashyap and D. R. Parhi, Multi-objective trajectory planning of humanoid robot using hybrid controller for multi-target problem in complex terrain. Expert Systems with Applications, 179, 115110, 2021. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115110.
- [17] A. K. Kashyap, D. R. Parhi and A. Pandey, Multiobjective optimization technique for trajectory planning of multi-humanoid robots in cluttered terrain. ISA Transactions, 2021. https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.06.017.
- [18] M. Kasaei, M. Abreu, N. Lau, A. Pereira and L. P. Reis, Robust biped locomotion using deep reinforcement learning on top of an analytical control approach. Robotics and Autonomous Systems, 146, 103900, 2021. https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103900.
- [19] A. K. Kashyap and D. R. Parhi, Implementation of intelligent navigational techniques for inter-collision avoidance of multiple humanoid robots in complex environment. Applied Soft Computing, 109001, 2022. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109001.
- [20] P. Mishra, U. Jain, S. Choudhury, S. Singh, A. Pandey, A. Sharma, R. Singh, V. K. Pathak, K. K. Saxena and A. Gehlot, Footstep planning of humanoid robot in ROS environment using Generative Adversarial Networks (GANs) deep learning. Robotics and Autonomous Systems, 104269, 2022. https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104269.
- [21] A. K. Kashyap, A. Pandey, D. R. Parhi and S. Singh Gour, Trajectory tracking of single and multiple humanoid robots in cluttered environment. Materials Today: Proceedings, 56, 650–654, 2022. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.558.
- [22] M. K. Muni, D. R. Parhi, P. B. Kumar, C. Sahu and S. Kumar, Towards motion planning of humanoids using a fuzzy embedded neural network approach. Applied Soft Computing, 119, 108588, 2022. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108588.
- [23] Vikas, D. R. Parhi and A. K. Kashyap, Humanoid robot path planning using memory-based gravity search algorithm and enhanced differential evolution approach in a complex environment. Expert Systems with Applications, 215, 119423, 2023. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119423.
- [24] Vikas and D. R. Parhi, Chaos-based optimal path planning of humanoid robot using hybridized

regression-gravity search algorithm in static and dynamic terrains. Applied Soft Computing, 110236, 2023. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110236.

- [25] D. Coquin, R. Boukezzoula, A. Benoit and T. L. Nguyen, Assistance via IoT networking cameras and evidence theory for 3D object instance recognition: Application for the NAO humanoid robot. Internet of Things, 9, 100128, 2020. https://doi.org/10.1016/j.iot.2019.100128.
- [26] P. A. Akiki, P. A. Akiki, A. K. Bandara and Y. Yu, EUD-MARS: End-user development of model-driven adaptive robotics software systems. Science of Computer Programming, 200, 102534, 2020. https://doi.org/10.1016/j.scico.2020.102534.
- [27] F. Riccio, R. Capobianco and D. Nardi, LoOP: Iterative learning for optimistic planning on robots. Robotics and Autonomous Systems, 136, 103693, 2021. https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103693.
- [28] A. Grillo, S. Carpin, C. T. Recchiuto and A. Sgorbissa, Trust as a metric for auction-based task assignment in a cooperative team of robots with heterogeneous capabilities. Robotics and Autonomous Systems, 157, 104266, 2022. https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104266.
- [29] M. Naya-Varela, A. Faíña and R. J. Duro, Engineering morphological development in a robotic bipedal walking problem: An empirical study. Neurocomputing, 527, 83–99, 2023. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2023.01.003.
- [30] A. Botta, S. Rotbei, S. Zinno and G. Ventre, Cyber security of robots: A comprehensive survey. Intelligent Systems With Applications, 18, 200237, 2023. https://doi.org/10.1016/j.iswa.2023.200237.
- [31] A. Augello, S. Gaglio, I. Infantino, U. Maniscalco, G. Pilato and F. Vella, Roboception and adaptation in a cognitive robot. Robotics and Autonomous Systems, 164, 104400, 2023. https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.104400.
- [32] P.-H. Kuo and K.-L. Chen, Two-stage fuzzy object grasping controller for a humanoid robot with proximal policy optimization. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 125, 106694, 2023. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106694.





NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 812-826 Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araștırma makalesi / Research article

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



Geleceğin otomotivleri için hangi sayısal veri yolu?

Which digital data bus for the automotive of the future?

Yasemin Yılmazoğlu^{1,*} 匝, Ufuk Sakarya 2🕩

^{1,2} Yıldız Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, 34220, İstanbul Türkiye

Öz

Günümüzde yükselen yapay zekâ eğilimi ile otonom sürüşlü otomobillerin önemi giderek artmaktadır. Otonom sürüş yeteneğinin kazanılmasında önemli alt parçalar bulunmaktadır. Bu alt parçalardan birisi otomobilde yer alan gelişmiş sensör verilerinin yapay zekâ işlemcilerine gerçek zamanlı ve güvenilir bir şekilde aktarılmasıdır. Bu tip bir çözüme gitmeden önce yapılması gereken ilk iş ise mevcut durumun bu amaç doğrultusunda analiz edilmesidir. Bu derleme makalesi bu amaç ile oluşturulmuştur. Günümüzde otomotivde kullanılan belli başlı haberleşme veri yolları karşılaştırmalı olarak analiz edilerek sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Sayısal veri yolu, Araç içi haberleşme, Derleme

1. Giriş

İnsanların en önemli ihtiyaçlarından birisi hiç şüphesiz ulaşımdır. Geçmişten günümüze ulaşım için çözümler birçok bilim adamının ana uğraşısı olmuştur. Günümüzde yükselen yapay zekâ eğilimi ile otonom sürüslü otomobillerin önemi giderek sürüş yeteneğinin artmaktadır. Otonom kazanılmasında önemli alt bileşenler bulunmaktadır. Bu alt parçalardan birisi otomobilde yer alan gelişmiş sensör verilerinin yapay zekâ işlemcilerine gerçek zamanlı ve güvenilir bir şekilde aktarılmasıdır. Başka bir deyiş ile bu iş için en uygun veri yolunun tasarlanmasıdır. Bu tip bir çözüme gitmeden önce yapılması gereken ilk iş ise mevcut durumun bu amaç doğrultusunda analiz edilmesidir. Bu derleme makalesi bu amaç ile oluşturulmuştur. Günümüzde otomotivde kullanılan belli başlı haberleşme veri yolları karşılaştırmalı olarak analiz edilerek sunulmuştur. Bu çalışmaların sonucundan her bir yöntemin artı ve eksilerine göre sistem isterlerinin tasarlanması bu makalenin kapsamı dışındadır. Bununla birlikte geleceğin akıllı otomobillerinin haberleşme veri yollarının tasarımında bir adımın atılması ve ülkemizde bu alanın öneminin vurgulanarak farkındalığın arttırılması amaçlanmıştır.

1.1 Otomotiv veri yollarının tarihsel gelişimi

Otomotiv endüstrisinde elektronik sistemlerin artan önemiyle birlikte, araç içi iletişim protokollerinin gelişimi büyük bir ivme kazanmıştır. Bu süreçte, farklı veri yolu teknolojileri, araçlardaki elektronik kontrol üniteleri arasında veri alışverişini sağlamak için geliştirilmiştir.

Abstract

Today, with the rising artificial intelligence trend, the importance of autonomous driving cars is increasing. There are important sub-components in gaining autonomous driving ability. One of these sub-components is the realtime and reliable transfer of advanced sensor data in the car to artificial intelligence processors. The first thing to do before going to such a solution is to analyze the current situation in line with this purpose. This review article was created for this purpose. Today, certain communication data paths used in the automotive industry are comparatively analyzed and presented.

Keywords: Digital data bus, Intra-communication in car, Survey

Otomotiv elektroniği 1950'li yıllarda, marş motorları, ateşleme sistemleri ve temel elektrik aksamları ile sınırlıydı. Elektrikli camlar, merkezi kilit ve klima gibi sistemlerin eklenmesiyle, 1970'li yıllarda araç içi kablolama giderek karmaşık hale geldi. Bu dönemde her elektronik bileşen, doğrudan bir elektrik bağlantısı ile yönetiliyordu. Ancak bu yaklaşım, ağırlık artışı ve maliyet nedeniyle sürdürülemez hale gelmiştir. 1980'lere gelindiğinde, araçlarda kullanılan elektronik sistemlerin sayısındaki artış, daha verimli veri iletim yöntemlerine olan ihtiyacı doğurdu. Bu dönemde, seri veri yolu sistemleri geliştirilmeye başlandı.

Bosch tarafından 1986 yılında geliştirilen CAN protokolü, otomotiv endüstrisinde devrim niteliğinde bir yenilik sundu. ECU'lar arasında doğrudan kablo bağlantısı yerine ortak bir veri yolu üzerinden haberleşme sağlayarak, kablolama karmaşıklığını ve maliyetleri düşürdü. CAN, 1991 yılında Mercedes-Benz tarafından ilk defa seri üretim bir araçta (S-Class W140) kullanıldı ve kısa sürede otomotiv endüstrisinin standardı haline geldi. CAN protokolünün yaygınlaşmasının ardından, belirli ihtiyaçlara yönelik farklı veri yolları geliştirilmeye başlandı [1].

1999 yılında, otomotiv üreticileri düşük maliyetli sistemlerde kullanılmak üzere LIN protokolünü geliştirdi. LIN, özellikle düşük veri hızları gerektiren uygulamalarda kullanıldı [2]. 1998 yılında ise, otomotiv multimedya sistemleri için MOST veri yolu geliştirildi. MOST, yüksek hızlı veri iletimi ve ses/görüntü senkronizasyonu sağlamak amacıyla kullanıldı [3].

Gelişen otomotiv elektroniği ve otonom sürüş teknolojileri, daha yüksek hız ve bant genişliği

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: yasemin.yilmazoglu@std.yildiz.edu.tr (Y. Yılmazoğlu) Geliş / Received: 19.04.2024 Kabul / Accepted: 25.02.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngumuh.1588278

gereksinimlerini doğurdu ve 2006 yılında BMW, FlexRay protokolünü ilk kez seri üretim bir araçta (BMW X5 E70) kullandı. FlexRay, zaman tetiklemeli (time-triggered) iletişim sağlayarak, özellikle otonom sürüş ve güvenlik sistemleri için kritik bir çözüm sundu [4]. Sonrasında Ethernet teknolojisinin otomotiv sektörüne adapte edilmesiyle, BroadR-Reach Automotive Ethernet 2008 yılında tanıtıldı. Bu protokol, özellikle ADAS ve otonom sürüş sistemleri için geliştirildi [5].

Günümüzde ise otomotiv veri yolları, V2X (Vehicle-to-Everything) iletişimi, otonom sürüş sistemleri ve gelişmiş güvenlik çözümleri için sürekli gelişmektedir. V2X, araçların altyapı, diğer araçlar ve yayalarla haberleşmesini sağlamak için LTE ve 5G teknolojilerini kullanan bir teknolojidir [6]. Makalede araç içi haberleşme sistemleri tanıtıldığından V2X ile ilgili detay bilgiye yer verilmemiştir.

2. Otomotivde kullanılan haberleşme veri yolları

2.1. CAN veri yolu

CAN Bus (Controller Area Network), ilk olarak Bosch tarafından 1980'lerde geliştirilen, araç içi elektronik kontrol üniteleri (ECU'lar) arasında iletişimi sağlayan bir seri iletişim protokolüdür. CAN, düşük maliyetli ve güvenilir bir veri iletim çözümü sunduğu için özellikle otomotiv endüstrisinde vaygın bir sekilde kullanılmaktadır [7]. Bu protokol, araç içi sistemdeki çok sayıda elektrikli bileşenin, örneğin mikrodenetleyiciler, elektronik kontrol üniteleri, sensörler, cihazlar ve aktüatörlerin, tek/çift telli bir veri yolu üzerinden birbirleriyle iletişim kurmasını sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. CAN, doğası gereği paketlerini yayınlayarak çalışır, yani CAN veri yoluna bağlı tüm düğümler, tüm paket iletimlerini alabilir. Ayrıca, CAN paketinde bir çerçeve, bir yapı olarak tanımlanır ve ağda bir dizi CAN verisi taşır. Her iletilen CAN çerçevesi için çekişme tanımlayıcı (ID) alanı, paketlerin önceliğini gösterir. ID bit değeri ne kadar düşükse, paketin önceliği o kadar yüksektir. Bu protokol, CAN veri yolu trafiği içindeki çarpışmaları önlemek için tasarlanmıştır [8].

2.1.1 Genel bilgiler

CAN veri yolu, özellikle araçlarda bulunan elektronik sistemlerin birbiriyle sorunsuz bir şekilde iletişim kurmasını sağlar. Bu sistem sayesinde farklı kontrol üniteleri, merkezi bir bilgisayara ihtiyaç duymadan doğrudan veri alışverişi yapabilir. Örneğin, motor kontrol ünitesi, fren sistemi veya hava yastıkları gibi hayati sistemler CAN veri yolu üzerinden birbiriyle iletişim kurarak koordineli bir çalışma sergiler [9]. CAN protokolü, hata tespiti ve veri güvenliği gibi özelliklere sahip olup, otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılır. Ayrıca, protokol çoklu sahip-köle (masterslave) mimarisini destekler ve birden fazla cihazın aynı anda veri iletebilmesine olanak tanır.

2.1.2 Mesaj yapısı

CAN protokolünde her mesajın belirli bir formatı vardır. Bu formatta bir mesaj kimliği (ID), veri uzunluğu kodu (DLC), veri alanı ve döngüsel artıklık denetimi (CRC) yer alır. Her mesaj belirli bir önceliğe sahiptir ve bu öncelik, mesajın ID'si ile belirlenir. Yüksek öncelikli mesajlar, ağda diğer mesajlara göre öncelikli olarak iletilir. CAN'de iki ana mesaj formatı vardır: Standart Çerçeve (11-bit ID) ve Genişletilmiş Çerçeve (29-bit ID)

CAN mesaj yapısındaki alanların açıklamaları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. CAN veri yolu alan adları ve açıklamaları

Alan Adı	Açıklama
ID	Mesajın önceliğini belirleyen kimlik
DLC	Veri uzunluğu kodu
Veri Alanı	İletilen asıl veri
CRC	Hata tespit mekanizması
ACK	Mesajın başarıyla alındığını belirten bayrak

Sekil 1'de gösterildiği gibi, standart bir CAN 2.0A veri çerçevesi yedi alandan oluşur: Çerçeve başlama (SOF) biti, 18 bit başlık, 0-8 bayt veri, 15 bitlik döngüsel artıklık denetimi alanı, 3 bitlik onay yuvası (ACK), 7 bitlik çerçeve bitiş alanı (EOF) ve son olarak 3 bitlik ara çerçeve boşluğu. Ayrıca, bir çerçevenin başlığı üç küçük alana bölünebilir: 11 bit tanımlayıcı alanı (CAN 2.0B için 29 bit, genişletilmiş format), uzaktan iletim isteği (RTR) biti ve 4 bitlik veri uzunluk kodu. Bir CAN çerçevesi en fazla 8 bayt veri içerebilir. Tanımlayıcı kısmı (genişletilmiş CAN çerçeve formatı için 11 bit veya 29 bit), veri yoluna erişim için yapılan çekişme sırasında mesaj önceliklerini belirler. CAN çekişme kontrolü, veri yolu üzerindeki iletim sırasında çerçeve çarpışmalarını önlemek için çarpışma çözünürlüğü ile tasiyici algılama çoklu erişimi (CSMA/CR) mekanizmasına dayanır. Bu noktada, her mesaj için benzersiz olan ve bir CAN çerçevesinin başlığına ait olan tanımlayıcı alan, mesajın önceliğini belirler [10].



Şekil 1. CAN 2.0A mesaj formatı (8 baytlık veri işlemesi)

2.1.3. Daha hızlı CAN: CAN FD

CAN FD (Esnek Veri Hızlı) veri yolu, Robert Bosch GmbH tarafından geliştirilen ve ISO standart spesifikasyonuna dahil edilen, daha fazla veri taşımak ve daha yüksek hızlarda iletim yapmak için klasik CAN protokolünün bir uzantısıdır.

Klasik CAN çerçeveleri ile karşılaştırıldığında başlıca farklar şunlardır:

- Çerçeve başlığından bir yedek bit, klasik CAN ile CAN FD çerçevelerini ayırt etmek için kullanılır.
- Standart veri birimi (SDU), başlık ve fragmanın veri hızına göre daha yüksek bir hızda iletilir (15 Mbps'ye kadar) ve 0-64 bayt arasında boyutları destekler, klasik CAN'e kıyasla 8 kat daha fazla veri taşır.

• SDU uzunluğu yalnızca 4 bit ile belirtilir, bu nedenle izin verilen uzunluklar 0, 1, ..., 8 bayt ya da daha uzun yükler için 12, 16, 20, 24, 32, 48, 64 bayttır [9].

Şekil 2'de CAN FD'nin klasik mesaj çerçeve yapısı verilmiştir.

CAN Kimlik tanımlayıcı (11 ya da 29 bit)	SDU uzunluğu (4 bit)	SDU (0-64 bayt)	CRC (17 ya da 21 bit)
--	-------------------------	--------------------	--------------------------

Şekil 2. CAN FD mesaj çerçeve yapısı

CAN ve CAN FD arasındaki farklar T	Fablo 2'de verilmiştir.
------------------------------------	-------------------------

Tablo 2. CAN ve CAN FD arasındaki teknik farklar

Özellik	CAN	CAN FD	
Maksimum Veri Hızı	1 Mbps	8 Mbps	
Maksimum Veri Alanı	8 bayt	64 bayt	
Esneklik (Flexible Data-Rate)	Sabit bit hızı	Veri ve ACK bölgesinde değişken hız	
Hata Algılama ve Düzeltme	CRC-15 ve CRC-16	Güçlü CRC-17 ve CRC-21	
Geriye Dönük Uyumluluk	Tüm CAN ağlarıyla uyumlu	Klasik CAN ile kısmen uyumlu	
Güvenlik ve Güvenilirlik	Daha düşük hata toleransı	Daha yüksek güvenlik mekanizmaları	
Tipik Kullanım Alanı	Motor kontrolü, güvenlik sistemleri, klima kontrolü	ADAS, otonom sürüş, yüksek bant genişlikli sistemler	

Düşük hız gerektiren ve maliyetin önemli olduğu uygulamalarda klasik CAN hala kullanılmakta olsa da elektrikli araçlar, otonom sürüş ve ADAS gibi ileri seviye sistemlerde CAN FD'nin kullanımı daha yaygındır

2.1.4. CAN için donanım gereksinimleri

CAN veri yolu sistemlerinin çalışması için özel donanımlar gerekmektedir. Bu donanımlar arasında CAN kontrolörü, alıcı-verici ve fiziksel katman bileşenleri yer alır. CAN kontrolörü, veri trafiğini yöneten merkezi bileşen olup, mesajları göndermek ve almakla görevlidir. Alıcı-verici ise, verilerin analog sinyaller şeklinde fiziksel kablo üzerinden iletilmesini sağlar. Fiziksel katman, genellikle iki telli bükülmüş çift kablo (twisted pair) kullanılarak oluşturulur ve elektromanyetik girişimlere karşı dirençli bir yapı sağlar [10]. Tablo 3'de CAN için sağlanması gereken donanım bileşenleri verilmiştir.

Tablo 3. CAN için donanım gereksinimleri

Bileșen	İşlev
CAN Kontrolörü	Mesajları gönderir ve alır
Alıcı-Verici (Transceiver)	Verileri fiziksel katman üzerinden iletir
Fiziksel Katman	Bükülmüş çift kablo üzerinden veri iletimi

2.1.5. CAN mesajları nasıl okunur?

Araç iletişimini daha ayrıntılı anlamak için tüm ECU'lar ve bunlara bağlı CAN mesaj kimliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla CANoe ya da CANalyzer uygulamaları kullanılabilir. CANalyzer ve CANoe araçları, kapsamlı bir ölçüm ve simülasyon yetenekleri setini birleştirerek CAN tabanlı modül veya sistem geliştirmenin temel ihtiyaçlarını karşılamak için geliştirilmiştir. CANalyzer ve CANoe birden fazla CAN ağına arayüz oluşturabilir ve tüm iletişim aktarımları için doğru zaman damgalı ölçümler sağlayabilir [11]. İlk olarak, CANalyzer kullanarak CAN veri yoluna erişim sağlayacak fiziksel bir bağlantı, tercihen referans sistem ECU'suna yakın bir yerde araca monte edilmelidir. CANalyzer'ın "izleme fonksiyonu" ile veri yolu iletişimi ve tüm ECU'ların CAN mesajları kolayca görüntülenebilir (Şekil 3).

CAN ID'lerinin yanı sıra her bir mesajın döngü süresi ve uzunluğu da analiz edilebilir. Bu bilgiler, referans sisteminin doğru çalışmasını sağlamak için tüm katılımcı ECU'ların bir veri yolu simülasyonunda sonradan kullanılmak üzere önemlidir.

	E III At ER GE CSearch		AP
	a in me lies [and [constant		
62404.932600	CAN 1	18FF012Ex	CAN Frame
62404.932600	CAN 2	18FE4A03x	CAN Frame
62404.933100	CAN 1	18FFC8D1x	CAN Frame
62404.933200	CANS	18FF022Ex	CAN Frame
62404.943000	CAN 1	DC1700x	CAN Frame
62404.943300	CAN 1	C00D 100x	CAN Frame
62404.933700	CAN 1	18FF022Ex	CAN Frame
62404.943600	CAN 1	18FFC500x	CAN Frame
62404.936600	CAN 1	18FF3821x	CAN Frame
62404.934900	CAN 2	CF02F2Ax	CAN Frame
62404.936900	CAN 2	18FF3821x	CAN Frame
62404.935800	CAN 1	CF02F2Ax	CAN Frame
62404.943500	CAN 2	18F0090Bx	CAN Frame
62404.944100	CAN 1	18F0090Bx	CAN Frame
62404.943800	CAN 2	FF0C0Bx	CAN Frame
62404.936100	CAN 1	CFE6CEEx	CAN Frame
62404.944100	CAN 2	8FE6E0Bx	CAN Frame
62404.936400	CAN 2	CFE6CEEx	CAN Frame
62404.925400	CAN 2	18F0010Bx	CAN Frame
62404.926000	CAN 1	18F0010Bx	CAN Frame
62404 937800	CAN 1	C010021x	CAN Frame

Şekil 3. CANalyzer ile CAN mesajlarının okunması ve izlenmesi

mary_status_4_S0 - Notepad pr Edit Format File View Help ***BUSMASTER Ver 3.2.2*** ***PROTOCOL CAN*** ***NOTE: PLEASE DO NOT EDIT THIS DOCUMENT*** ***[START LOGGING SESSION]***
START DATE AND TIME 10:10:2024 11:2:34:413 ***HEY*** ***SYSTEM MODE*** ***START CHANNEL BAUD RATE*** ***CHANNEL 1 - Kvaser - Kvaser Leaf Light v2 #0 (Channel 0), Serial Number- 0, Firmware- 0x000003a5 0x00040013 - 5000
END CHANNEL BAUD RATE ***START DATABASE FILES*** ***C:\Users\yyilmazo\Desktop\dbc files\RigidBev_VCUP1.dbf*** ***END DATABASE FILES*** ***<Time><Tx/Rx><Channel><CAN ID><Type><DLC><DataBytes>** 11:02:34:4070 Rx 1 0xCF090F3 x 8 50 1F 50 1F 30 34 00 7D 11:02:34:4080 Rx 1 0xCF091F3 x 8 A0 76 82 0F 7A 0E FF FF 11:02:34:4080 Rx 1 0xCF180F3 x 8 C0 76 FF FF 7C 0E FF FF 11:02:34:4080 Rx 1 0x18037C00 x 8 00 00 00 00 00 00 00 00 11:02:34:4080 Rx 1 0xC1BF35B x 8 00 00 00 00 00 00 D0 6F 11:02:34:4090 Rx 1 0xCF092F3 x 8 3D 24 16 24 29 24 FF FF 11:02:34:4090 Rx 1 0xCF181F3 x 8 2D 24 16 24 23 24 FF FF 11:02:34:4090 Rx 1 0xCFF01CB x 8 94 03 00 7D FF 7C 00 00 11:02:34:4100 Rx 1 0xCF093F3 x 8 80 6D FF FF FF FF FF FF 11:02:34:4100 Rx 1 0xCF094F3 x 8 E0 AB E0 AB FF FF FF 11:02:34:4100 Rx 1 0xCFF02CB x 8 BF 6A 4A A6 34 01 FF FF 11:02:34:4100 Rx 1 0xCFF03CB x 8 B8 6A 04 00 26 62 22 FF 11:02:34:4110 Rx 1 0xCF096F3 x 8 F0 FF CF FF SF FF F5 1:02:34:4110 Rx 1 0x18077C00 x 8 00 00 0A 0F A0 5E 40 55 11:02:34:4110 Rx 1 0x18087C00 x 8 E0 FF 80 20 00 00 00 00 11:02:34:4110 Rx 1 0x18EFF700 x 8 00 00 62 02 B4 91 00 00 11:02:34:4120 Rx 1 0xCF0A0F3 x 8 80 D9 02 FF FF FF FF 11:02:34:4120 Rx 1 0xCF1BEF3 x 8 D4 07 D4 07 FF FF 00 7D

Şekil 4. CAN mesaj logu

İlgili CAN mesajları belirlendikten sonra, mesaj veri baytlarını ayrıntılı olarak incelemek ve fiziksel sinyalleri tespit etmek kaçınılmazdır. Bu, fiziksel girişler manuel olarak üretilerek (örneğin gaz pedalını açmak, sürüş yapmak, fren yapmak vb.) ve belirli CAN mesajları ile bunların baytlarını paralel olarak gözlemleyerek başarılabilir. Ardından, bir CAN mesajı, CAN verisi ve bir fiziksel giriş değeri arasında bir ilişki kurulabilir [12].

CAN veri yolu kayıtları CANoe dışındaki aplikasyonlarla da sağlanıp izlenebilir. Şekil 4'te farklı bir CAN veri yolu izleme aracı ile alınmış mesaj kayıtlarını içeren bir dosya görüntüsü verilmiştir.

2.1.6. Kullanım alanları

İlk CAN gelişimi, büyük ölçüde otomotiv endüstrisi tarafından desteklenmiştir: CAN, çeşitli binek otomobillerde, kamyonlarda, teknelerde, uzay araçlarında ve diğer araç türlerinde kullanılmaktadır. Protokol günümüzde de endüstriyel otomasyon ve ağ tabanlı gömülü kontrol sistemleri gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır ve üretim makineleri, tıbbi ekipmanlar, bina otomasyonu, dokuma makineleri ve tekerlekli sandalyeler gibi çeşitli ürünlerde uygulamaları bulunmaktadır [7]. Modern araçlarda, motor kontrolü, şanzıman yönetimi, ABS, hava yastıkları, klima sistemleri gibi farklı sistemler CAN ağı üzerinden haberleşir. Bu sistemlerin yanı sıra, CAN veri yolu, endüstriyel otomasyon, medikal cihazlar, demiryolu sistemleri ve havacılık gibi farklı sektörlerde de kullanılmaktadır. Örneğin, elektrikli araçların batarya yönetim sistemlerinde CAN protokolü yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.1.7. Otomotivdeki yeri

CAN veri yolu, modern araçların elektronik altyapısının bel kemiğini oluşturur. Araç içerisindeki tüm elektronik

kontrol üniteleri CAN ağı üzerinden birbirleriyle iletişim kurar. Bu da hem maliyetleri düşürür hem de araç içi kablolama karmaşıklığını azaltır. Özellikle hibrit ve elektrikli araçlarda, motor, batarya ve enerji yönetim sistemlerinin entegrasyonu CAN veri yolu ile sağlanmaktadır [8]. Bu nedenle, CAN veri yolu otomotiv endüstrisinde vazgeçilmez bir iletişim protokolü haline gelmiştir.

2.1.8. Avantajlar ve dezavantajlar

CAN veri yolunun en büyük avantajlarından biri, hızlı ve güvenilir bir iletişim sunmasıdır. Ayrıca, düşük maliyetli olması ve hata tespit mekanizmalarının etkinliği, sistemin güvenliğini artırır. Ancak, CAN veri yolu sınırlı bant genişliğine sahiptir ve bu, özellikle yüksek veri gereksinimi olan uygulamalarda dezavantaj yaratabilir. Bunun yanı sıra, güvenlik açıkları, özellikle günümüzde siber saldırılara karşı hassasiyet oluşturabilir. Son yıllarda, bu güvenlik açıklarını gidermek için CAN protokolüne ek güvenlik katmanları eklenmiştir. Tablo 4'te CAN veri yolunun avantaj ve dezavantajları kısaca maddelendirilmiştir.

Tablo 4. CA	N veri yol	u avantaj ve	dezavantajları
-------------	------------	--------------	----------------

Avantajlar	Dezavantajlar
Düşük maliyetli	Sınırlı bant genişliği
Hızlı ve güvenilir iletişim	Güvenlik açıklarına karşı hassasiyet
Hata tespit mekanizmaları etkin	Yüksek veri hızları için yetersiz olabilir

2.1.9. CAN güvenlik sorunları

CAN veri yolu ilk olarak 1980'lerin başında tasarlandığında, güvenlik ana odak noktası değildi. Başlangıçta, sadece birkaç ECU arasında iletişim kurmak için kullanılan bu sistem, son kullanıcı tarafından erişime açık değildi. Ancak zamanla otomotiv endüstrisi büyük bir değişim geçirdi ve bugün onlarca ECU birbiriyle bağlantılı hale geldi. Yasal düzenlemeler de teşhis amaçlı veri yoluna erişim sağlanmasını gerektirmektedir [10].

CAN protokolü çeşitli güvenlik özelliklerine sahip olmasına rağmen, hala saldırılara açıktır. En büyük sorunlardan biri şifreleme ve kimlik doğrulamanın bulunmamasıdır. Bu eksiklik, yetkisiz düğümlerin ağa katılmasına ve iletişim kurmasına olanak tanır. Verilerin şifrelenmemesi, saldırganların bu verileri kolayca dinleyip anlamasına imkân tanır. Özellikle modern araçların sürücülere ait konum bilgileri ve adres defteri gibi verileri topladığı göz önüne alındığında, bu durum önemli gizlilik sorunlarına yol açabilir. Ayrıca saldırganlar, sisteme hatalı veri enjekte edebilir [13].

Ayrıca CAN protokolü, Hizmet Engelleme (DoS) saldırılarına karşı da savunmasızdır. Arabuluculuk mekanizması, önceliği olan düğümlerin önce veri iletmesine izin verir. Eğer kötü niyetli bir düğüm sürekli olarak en yüksek önceliğe sahip olursa, diğer düğümler veri iletemez. Bu durumda, CAN veri yolundaki iletişim kesintiye uğrar. Bir saldırgan iletişim sırasında kasıtlı olarak bir hata oluşturduğunda, hata sayaçlarının artmasına neden olur ve bu sayede düğüm veri yolundan çıkarılabilir [13].

Ayrıca CAN veri yolu, her bir mesajın tüm ECU'lara iletilmesini sağlayan bir yayın mekanizmasına dayanır. Bu durum, saldırganın bir ECU'ye erişim sağladığında bütün ağı dinleyebilmesine veya bozabilmesine neden olabilmektedir. CAN protokolü, güvenlik açısından değerlendirildiğinde CIA (Gizlilik, Bütünlük ve Erişilebilirlik) üçlemesi temel alınarak analiz edilmektedir. Bu üçleme, herhangi bir sistemin güvenlik açıklarını değerlendirmek için kullanılan temel bir güvenlik modelidir.

- Gizlilik: Verilerin yalnızca yetkili kişiler tarafından erişilebilir olmasını sağlamayı hedefler. Normalde, kriptografik yöntemler kullanılarak gizlilik sağlanır. Ancak, CAN protokolünde bu tür yerleşik güvenlik önlemleri bulunmamaktadır.
- Bütünlük: Verilerin iletim sırasında değiştirilmediğini garanti eder. CAN, CRC ile veri bütünlüğünü sağlamak için temel bir mekanizmaya sahiptir. Ancak, CRC sadece rastgele hataları algılayabilir, kötü niyetli bir düğüm tarafından yapılan değişiklikleri tespit edemez.
- Erişilebilirlik: Ağın her zaman yetkili kullanıcılar tarafından kullanılabilir olmasını ifade eder. CAN protokolünde, düğümler arasında bir önceliklendirme kuralı bulunur. Bu kural, daha yüksek öncelikli düğümün veri iletimine öncelik verir.

Sonuç olarak, CAN protokolü güvenlik üçlemesi kapsamında tam anlamıyla güvenlik sağlamaktan uzaktır. Gizlilik, bütünlük ve erişilebilirlik konularında önemli açıklar taşımaktadır.

2.1.10 CAN güvenlik sorunlarına alınabilecek önlemler

CAN veri yolunun siber güvenlik açıklarına karşılık alınabilecek birtakım önlemler mevcuttur. Aşağıda bu önlemler maddelendirilmiştir.

- Mesaj Kimlik Doğrulama Mekanizmaları: CAN veri yolu, saldırılara karşı kriptografik doğrulama yöntemleri kullanmalıdır. Örneğin: Message Authentication Code (MAC) kullanılarak mesajların sahte olup olmadığı kontrol edilebilir. HMAC-SHA256 gibi hash tabanlı doğrulama yöntemleri ile mesajların kaynağı güvence altına alınabilir [14].
- Anomali Tespiti: Araç içinde davranış tabanlı anomali tespit sistemleri kullanılabilir. Bu sistemler, olağandışı mesaj yoğunluğu veya kimlik sahtekârlığı gibi saldırıları tespit edebilir [15]. Örneğin CAN saldırı tespit sistemleri (IDS), araç içi iletişimi analiz ederek anormal mesajları engelleyebilir [16].
- Fiziksel Erişim Kısıtlamaları: Saldırganların CAN veri yoluna fiziksel erişim sağlamasını önlemek için OBD-II portuna yetkisiz erişimi engelleyen güvenlik çözümleri uygulanmalıdır ve güvenli donanım bileşenleri kullanılarak saldırılara karşı fiziksel koruma sağlanmalıdır [17].

2.2. LIN veri yolu

LIN (Local Interconnect Network), otomotiv sektöründe düşük maliyetli ve düşük hızda iletişim sağlayan bir veri yolu protokolüdür. 1999 yılında tanıtılan bu protokol, CAN veri yolunun daha karmaşık olduğu ve yüksek hız gerektirmeyen uygulamalarda kullanılmak üzere geliştirilmiştir.

2.2.1. Mesaj ve çerçeve yapısı

LIN mesaj yapısı, ana düğüm tarafından başlatılan bir başlık ve ardından gelen bir yanıt mesajından oluşur. Başlık, senkronizasyon ve kimlik bilgilerini içerirken, yanıt mesajı veri yükü ve kontrol bilgilerini içerir. Mesaj yapısında basitlik ön plandadır ve çoğu zaman küçük boyutlu verilerin iletimi için uygundur. Şekil 4'te LIN veri yoluna ait mimari gösterilmiştir.



Şekil 4. LIN veri yolu mimarisi – ana düğüm ve köle düğümler

LIN sisteminde tek bir ana cihaz (master) ve ona bağlı köle cihazlar (slave) bulunur. Ana cihaz hem ana görevleri hem de köle görevlerini yönetirken, köle cihazlar yalnızca köle görevlerini yerine getirir. Veri yolu, fiziksel olarak bir ana ve birden fazla köle düğümden oluşur. LIN protokolündeki tüm iletişim, ana görev tarafından analiz edilir ve bu görevi yalnızca ana düğüm yerine getirir. LIN veri yolu çerçevesi ise iki bölümden oluşur: başlık (header) ve yanıt (response). Başlık, ana düğüm tarafından gönderilir ve aşağıdaki bileşenlerden oluşur:

- Break: LIN çerçevesinin başlangıcı, CAN protokolündeki çerçeve başlangıcı (SOF) ile benzer şekilde bir "break" sinyali ile yapılır. Break sinyali, 13 dominant bit ve bir resesif bitten (break delimiter) oluşur. Veri yolundaki tüm düğümler, break sinyali ile başlatılır.
- Sync: Senkronizasyon (Sync) alanı, mesaj başlığının ikinci bölümüdür ve ana düğüm tarafından iletilir. Hexadecimal olarak x55 karakteri, köle düğümlerin otomatik aktarım hızını hesaplamasını sağlar. Bu hesaplama köle düğüm tarafından yapılır ve veri yolu ile transfer hızının senkronize edilmesine yardımcı olur [18].
- Identifier: Kimlik (Identifier), başlık bölümünün son alanıdır ve ana düğüm tarafından başlığa iletilir. Kimlik, veriyi alacak olan cihazı tanımlar ve her köle düğüm gelen kimlikleri bekler. LIN ağında toplamda 64 farklı kimlik bulunur. 0-59 arası veri çerçevelerinin iletimi için, 60-61 ise tanılama verilerinin iletimi için kullanılır. 62 numaralı kimlik genişleme için ayrılmış olup, 63 ise gelecekteki optimizasyonlar için ayrılmıştır.
- Data: Veri alanı, mesajın gerçek verisini içerir ve bu veriler 0 ile 8 bayt arasında olabilir. Yanıt olarak köle düğüm tarafından iletilir.
- Checksum: Kontrol toplamı (Checksum), yanıt bölümünde yer alır ve köle düğüm tarafından iletilir. LIN protokolünde, 8 bitlik kontrol toplamını hesaplayan iki farklı algoritma bulunur [19].

Her LIN mesaj çerçevesi, ana düğüm tarafından gönderilen bir başlık ile başlar. Bu başlık, bir kopma bayt alanı, senkronizasyon bayt alanı ve korumalı kimlik bilgisini içerir. Köleler istenen yanıtı göndermeden önce kısa bir duraklama, yanıt alanı olarak bilinen boşluk oluşur. Her çerçeve sonunda, bir sonraki çerçeve başlatılana kadar LIN veri yolu yüksek seviyede tutulur ve kopma baytı, veri yolunu tekrar düşük seviyeye çeker.

Bu yanıt, sekiz veri bayt alanına ek olarak bir kontrol toplamı bayt alanı içerebilir. LIN 2.0 spesifikasyonunun yayınlanmasıyla birlikte, yeni bir kontrol toplamı hesaplama yöntemi tanıtıldı. Halen kullanılan LIN 1.3 spesifikasyonuna uyum sağlamak amacıyla, önceki kontrol toplamı hesaplama yöntemi de LIN 2.0 tarafından desteklenmektedir. Yeni kontrol toplamı, "gelişmiş kontrol toplamı" olarak adlandırılır ve korumalı kimlik bilgisi dahil tüm veri baytlarının ters çevrilmiş sekiz bitlik toplamı ile hesaplanır. LIN 1.3 kontrol toplamı ise klasik kontrol toplamı olarak adlandırılır ve korumalı kimlik bilgisi olmadan hesaplanır.

Her bir köle, kopma bayt alanını algıladığı anda aktif duruma geçer. Ardından gelen Senkronizasyon bayt alanı, kölelerin bir sonraki iletim için ana düğümle senkronize olmasını sağlar. Senkronizasyon dizisi, her zaman Ox55 veri değeri ile gönderilen bir bayt alanıdır, böylece ağdaki tüm köleler, bu sinyalin kenarlarını algılayarak ana düğümün saatine senkronize olabilir [20]. Kopma bayt alanı hariç, LIN mesajındaki tüm bayt alanları, seri haberleşme tabanlı çoğu iletişimde bilinen düşük seviye başlangıç biti ile başlar, ardından sekiz veri biti gelir ve bayt alanı bir durdurma biti ile tamamlanır. Korumalı kimlik alanı altı kimlik bitinden ve iki parite bitinden oluşur, bu da bir LIN ağında 64 farklı kimlik oluşturulmasını sağlar.

Korumalı kimlik bilgisine dayanarak, köleler yanıt alanından sonra istenen yanıtı göndermeye başlar veya daha fazla veri bekler [18].

3. Kullanım alanları

LIN veri yolu, kullanımı, gecikmenin herhangi bir soruna neden olmadığı kritik olmayan işlemler ve görevlerle sınırlıdır [21]. Uygulama örnekleri arasında ayna ayarı, klima kontrolü, iç ışık gibi basit kontrol görevleri bulunmaktadır. Aşağıda genel kullanım yerleri verilmiştir.

- Otomotiv Sektörü: LIN ağı, araç içi elektronik sistemlerin birbiriyle haberleşmesini sağlar. Düşük hız ve düşük maliyet gereksinimleri nedeniyle araçların kapı kilitleri, aynalar, cam açma/kapama sistemleri, koltuk ayarlama motorları, klima sistemleri gibi alt sistemlerinde kullanılır.
- Araç Aydınlatma Sistemleri: İç ve dış aydınlatma sistemleri, özellikle de far ve iç ışıklandırma gibi donanımlar için uygun maliyetli bir iletişim protokolü sunar.
- Sensör Ağları: Araç içindeki çeşitli sensörler (yağ basıncı, sıcaklık, hız, park sensörleri) için LIN kullanılabilir. Düşük veri aktarım hızına ihtiyaç duyulan ve sürekli iletişim gerektirmeyen yerlerde tercih edilir.
- Otomatik Kapı Sistemleri: Elektrikli kayar kapı, bagaj ve sunroof gibi sistemlerde LIN protokolü kullanılarak maliyet tasarrufu sağlanabilir.
- Ev Otomasyonu ve Beyaz Eşya: Düşük maliyet ve hız avantajı nedeniyle LIN protokolü, ev otomasyon sistemlerinde ve bazı beyaz eşya uygulamalarında kullanılabilir.

LIN ile oluşturulan sistemlerde, LIN veri yolunun kullanımı sadece maliyeti düşürmekle kalmamakta, aynı zamanda temel teknik cihazların operasyonel ve teşhis bilgilerini tam olarak kullanmak için hiyerarşik bir ağ yapısı sağlandığı görülmüştür [22].

4. Avantaj ve dezavantajları

LIN, donanım ve yazılım gereksinimleri açısından CAN gibi daha karmaşık protokollere kıyasla çok daha ucuzdur. Bu nedenle, düşük maliyetli araç alt sistemlerinde tercih edilir. Ayrıca oldukça basit bir yapıya sahiptir. Sahip-köle yapısı sayesinde veri transferi kolay bir şekilde gerçekleştirilir ve karmaşık zamanlama gereksinimleri yoktur.

Bunun yanında LIN, düşük hızda çalıştığı için enerji tasarrufu sağlar ve gerçek zamanlı veri aktarımı gerektirmeyen uygulamalarda ideal bir protokoldür. Örneğin, cam açma/kapama sistemleri gibi düşük veri hızlarına ihtiyaç duyan sistemlerde kullanılır. LIN, yeni cihazların kolayca eklenebildiği esnek bir yapıya sahiptir, birden fazla alt sistemde kolayca entegre edilebilir. Son olarak diğer protokollere göre daha az kablo gerektirir, bu da montaj süresini ve maliyetini azaltır.

Dezavantajlarına bakılacak olursa maksimum 20 kbps hızında çalıştığı bu sebepten de yüksek hız ve büyük veri transferi gerektiren uygulamalar için yetersiz kaldığı söylenebilir.

LIN'in sahip-köle yapısı, her ağda bir ana sahip cihaz gerektirir. Bu da bazı durumlarda ağın esnekliğini sınırlayabilir ve zamanlama ile ilgili kısıtlamalar doğurabilir. Ayrıca LIN, zaman kritik uygulamalar için uygun değildir. Bu nedenle, gerçek zamanlı veri aktarımının önemli olduğu uygulamalarda kullanılmaz.

LIN protokolü, CAN gibi daha gelişmiş protokoller kadar güçlü bir hata tespit ve düzeltme mekanizmasına sahip değildir. Bu da güvenilirlik gerektiren uygulamalarda bir dezavantaj oluşturabilir.

Son olarak ise LIN, sınırlı bir iletişim mesafesine sahiptir. Bu yüzden geniş kapsamlı veya uzun mesafeli iletişim gerektiren sistemlerde kullanımı zordur.

LIN protokolü, özellikle düşük maliyetli, basit yapılı ve düşük hız gerektiren uygulamalar için ideal olsa da, yüksek veri hızı, güvenilirlik ve gerçek zamanlılık gerektiren durumlar için yetersiz kalır. LIN veri yolunun avantaj ve dezavantajları Tablo 5'te kısaca maddelendirilmiştir.

Tablo 5. LIN veri yolu avantaj ve dezavantajları

Avantajlar	Dezavantajlar
Düşük Maliyet	Düşük Veri Hızı
Basitlik	Sahip-köle (Master-Slave) Yapısı
Düşük Güç Tüketimi	Gerçek Zamanlı Uygulamalarda Yetersiz
Gerçek Zamanlı Olmayan	Hata Tespit ve Düzeltme
Uygulamalara Uygun	Kapasitesi Sınırlı
Esneklik ve Genişletilebilirlik	Sınırlı Mesafe
Az Kablo Gereksinimi	

2.3. FlexRay veri yolu

FlexRay, yüksek hız ve güvenilirliğe sahip, özellikle otomotiv endüstrisinde güvenlik açısından kritik uygulamalar için geliştirilmiş bir iletişim protokolüdür. DaimlerChrysler ve BMW tarafından gerçekleştirilen incelemeler ve edinilen tecrübeler, mevcut veri yolu sistemlerinin hiçbirinin gelecekteki otomotiv sistemleri için gerekli tüm gereksinimleri karşılayamadığını göstermiştir. 1999 yılının ortalarında BMW ve DaimlerChrysler, gelecekteki bir veri yolu sisteminin geliştirilmesi ve spesifikasyonlarının belirlenmesi için birlikte çalışma kararı almıştır. Bu iş birliği, gelecekteki FlexRay veri yolu sistemi için gereksinimlerin belirlenmesi ile sonuçlanmıştır [23]. Bu konsorsiyum zamanla Bosch, Philips gibi diğer büyük firmaların da katılımıyla büyümüştür.

Araçlarda yüksek veri iletim hızları gereksinimi, olay tetiklemeli ve zaman tetiklemeli sistemlerde deterministik davranış beklentisi, hata toleransı, dağıtık kontrollerin daha iyi desteklenebilmesi ve veri yolu sistemlerinin standardizasyonu gibi amaçlarla protokolün geliştirilmesi sağlanmıştır.

FlexRay, CAN ve LIN protokollerini tamamlayan ya da onların yerini alabilecek yüksek performanslı bir veri yolu çözümüdür. Ayrıca FlexRay, zaman tetiklemeli çoklu erişim (TDMA) yaklaşımını benimseyerek, güvenlik ve deterministik iletişim gereksinimlerini karşılamayı hedefler [24].

2.3.1. Byteflight/Fieldbus/FlexRay ilişkisi

Fieldbus, uzun mesafelerde ve yüksek dış yük altında farklı sistem bileşenleri arasında veri alışverişi yapmak için kullanılan seri bir veri yolu sistemidir. Fieldbus teknolojilerinin iletişim protokolü de FlexRay'e benzer şekilde çalışır. Ancak Fieldbus'ta, veri iletiminin zamanlamasını kontrol eden bir ana düğüm vardır. Buna karşın, FlexRay'de her düğüm, kendine ayrılan yuvalarda veri iletir; bu, ağın iletişim zamanlamasını sürdürmesi için tek bir düğüme bağımlı olmadığı anlamına gelir. Fieldbus konfigürasyonunda ise ana düğümün arızalanması halinde ağ başarısız olabilir [25]. Ancak Fieldbus teknolojilerinde, cihazlarda yerleşik yedeklilik bulunur ve bu, tüm ağın arızalanma olasılığını azaltır. Bunun yanında Fieldbus genellikle fabrika otomasyonu, proses kontrolü ve endüstriyel ortamlarda kullanılır. Örneğin, üretim veya endüstriyel bir ortamdaki sensörler, aktüatörler, kontrolörler ve aletler Fieldbus protokollerini kullanarak birbirleriyle iletişim kurabilir. Fieldbus ayrıca bu sistemlerin raporlama veya uzaktan izleme için datacom ağlarıyla iletişim kurmasını sağlar ve sistem ile Ethernet, TCP/IP ve çeşitli kablosuz teknolojiler gibi standart veri iletişim protokolleri arasında ağ geçidi cihazları veya çeviriciler olarak işlev görür.

Byteflight ise FlexRay'in gelişmesine katkı sağlayan bir protokoldür. Byteflight, TDMA kullanarak belirli bir bant genişliği tahsisi sağlar [26]. Bu, CAN protokolüne kıyasla daha tutarlı ve önceden belirlenmiş veri iletimi sağlar. Byteflight'ın hata toleransı konsepti ile geliştirilmesi ise FlexRay'in oluşturulmasını sağlamıştır. İki kanallı veri yolu yapısı sayesinde, veri iletiminde bir kanal arızalanırsa diğer kanal üzerinden iletim devam edebilir. Şekil 5'te Byteflight, Fieldbus ve FlexRay arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 5. CAN, byteflight, flexray ilişkisini içeren diyagram

2.3.2. FlexRay çalışma mekanizması

FlexRay protokolü, zaman tetiklemeli veri iletimini destekler. Bu, ağdaki her düğümün belirli zaman dilimlerinde veri gönderebilmesi anlamına gelir. FlexRay'in temel çalışma prensibi, TDMA yöntemi ile ağın senkronize bir şekilde çalışmasını sağlamaktır. FlexRay döngüsü, statik ve dinamik segmentlerden oluşur. Statik segment, zaman tetiklemeli veri iletimine olanak sağlar ve her bir düğümün belirlenen zaman diliminde veri göndermesini mümkün kılar. Dinamik segment, olay tetiklemeli veri iletimine olanak tanır ve ihtiyaç duyulan veri trafiği için esneklik sağlar. FlexRay ayrıca, sembol penceresi ve boşta kalma süresi gibi iletişim döngüsünü kontrol eden zaman dilimlerine sahiptir. Sembol penceresi, düğümler arasında senkronizasyon sağlarken, boşta kalma süresi ağın geri kalanı için kullanılmayan zaman dilimini ifade eder [23].

FlexRay'in iletişim statik ve dinamik kısım arasındaki sınır, sistemin çalışma zamanı öncesinde serbestçe tanımlanabilir ve her iki kısım da boş olabilir. İletişim döngüsü bir SENKRON (SYNC) sembolüyle başlar. Zaman dilimleri, hem statik hem de dinamik kısım için kullanılan kimlik numaralarıyla (ID) tanımlanır. Her iki kanala da bağlı olan ağ düğümleri, statik kısımda mesajlarını her iki kanalda da eşzamanlı olarak gönderirler. Dinamik kısımda ise kanallardaki zaman dilimlerinde farklılıklar olabilir. Saat senkronizasyonunu sağlamak için yalnızca her iki kanala bağlı ağ düğümlerinden gelen mesajlar kullanılır. Tüm ağ düğümleri saat senkronizasyonu gerçekleştirir, ancak yalnızca statik kısımdan seçilen mesajlar bu senkronizasyon için kullanılır.

- Başlatma: İletişim sistemi, en az iki düğümün iletişime katılmasıyla başlatılır. İki kanallı bir sistemde, yalnızca her iki kanala bağlı düğümler başlatmaya katılabilir. Bir düğüm, ilk mesajını göndermeden önce, başlatma zaman aşımının sona ermesini beklemelidir. Bu süre, döngü uzunluğuna bağlıdır.
- Saat Senkronizasyonu: FlexRay'de saat senkronizasyonu, sistemdeki tüm düğümlerin küresel zamanı tutarlı ve standart bir şekilde görmesini sağlar. Senkronizasyon, sistemde en az iki aktif düğüm olduğu sürece gerçekleşir. Statik bir bölüme sahip bir sistemde, başlatma işleminden sonra dağıtık, hata toleranslı bir saat senkronizasyon algoritması kullanılır.

2.3.3. FlexRay sistem mimarisi

FlexRay, çift kanallı bir ağ mimarisi ile çalışır. Her FlexRay düğümü, bir ana birim (host), bir iletişim kontrolcüsü (CC), bir veri yolu sürücüsü (BD) ve isteğe bağlı bir veri yolu koruyucusu (BG) içerir.

- Ana Birim (Host): İletişim sürecini kontrol eden kullanıcı yazılımıdır.
- İletişim Kontrolcüsü (CC): FlexRay protokolünün tüm yönlerini uygulayan ve protokolün çekirdeği olan birimdir.
- Veri Yolu Koruyucusu (BG): Hatalı medya erişimine karşı slotları koruyan bir elektronik bileşendir.
- Veri Yolu Sürücüsü (BD): İletişim kontrolcüsünü bir iletişim kanalına bağlayan verici ve alıcıdan oluşur [27].

2.3.4. FlexRay mesaj çerçeve yapısı

FlexRay mesaj çerçevesi üç ana bölümden oluşur: başlık (header), yük (payload) ve fragman (trailer). Başlık bölümü, mesajın kimliği, uzunluğu ve hata kontrolü bilgilerini içerir. Yük bölümü ise iletilecek veriyi taşır ve fragman bölümü, mesajın doğru bir şekilde alınıp alınmadığını kontrol eden CRC içerir.

FlexRay'de tüm mesajlar için mesaj formatı aynıdır. Bir SYNC biti ayarlandığında, ilk veri baytında döngü sayacı kodlanır. Döngü sayacı, iletişim döngülerini sayan 8 bitlik bir sayaçtır ve tüm düğümlerde sistem genelinde aynıdır.

- ID: 10 bitlik bir tanımlayıcı, değer aralığı (1,0 ... 1023). Statik kısımda slot pozisyonunu ve dinamik kısımda önceliği tanımlar. Tanımlayıcı ne kadar küçükse, öncelik o kadar yüksektir. ID=0 SYNC sembolü için ayrılmıştır. Bir tanımlayıcı bir ağda yalnızca bir kez kullanılabilir. Her düğüm hem statik hem de dinamik kısımda bir veya daha fazla tanımlayıcı kullanabilir.
- 2. MUX: 1 bitlik çoklama alanı. Bu bit, aynı tanımlayıcı ile farklı verilerin iletilmesini sağlar.
- SYNC: 1 bitlik senkronizasyon alanı. Bu bit, mesajın saat senkronizasyonu için kullanılıp kullanılmadığını ve ilk veri baytının döngü sayacını içerip içermediğini belirtir (SYNC="1": döngü sayacı ve saat senkronizasyonu ile mesaj, SYNC="0": döngü sayacı olmadan mesaj).
- 4. LEN: 4 bitlik uzunluk alanı, veri baytlarının sayısını belirtir (0-12,0). Döngü sayacı kullanılıyorsa (SYNC=1), LEN=11 olarak ayarlanır.
- CYCLE: Döngü alanı, döngü sayacı olarak kullanılabilir veya ilk veri baytı olarak işlev görür. Döngü sayacı, tüm iletişim denetleyicilerinde iletişim döngüsünün başında senkronize olarak artırılır.
- 6. DATA: 0-12 baytlık veri baytları.
- 7. CRC: 15 bitlik döngüsel artıklık denetimi.

Döngü sayacına sahip bir mesajın çerçeve formatı Şekil 6'da verilmiştir.

ID	MUX	SYNCH	LEN	CYCLE	DATA	CRC	0
10 bit	1 bit	1 bit	4 bit	8 bit	011 bayt	15 bit	1 bit

Şekil 6. Döngü sayacı kullanılan mesaj çerçeve formatı

Döngü sayacına sahip olmayan bir mesajın çerçeve formatı ise Şekil 7'de verilmiştir.

ID	MUX	SYNCH	LEN	DATA	CRC	0
10 bit	1 bit	1 bit	4 bit	012 bayt	15 bit	1 bit

Şekil 7. Döngü sayacı olmadan kullanılan mesaj çerçeve formatı

2.3.5 FlexRay ağ topolojisi

FlexRay, esnek bir ağ topolojisi sunar. Yıldız topolojisi, veri yolu topolojisi ve halka topolojisi gibi çeşitli topolojilerle çalışabilir. FlexRay ayrıca aktif ve pasif yıldız bağlayıcıları da destekler. Aktif yıldız bağlayıcılar, sinyalin güçlendirilmesini sağlayarak veri iletim mesafesini artırır.
FlexRay çift kanallı bir sistem olarak geliştirilmiştir, böylece hem tek kanallı hem de çift kanallı sistemler gerçekleştirilebilir.

Yıldız topolojileri aktif veya pasif yıldız bağlayıcılar kullanılarak gerçekleştirilebilir. Aktif bir yıldız bağlayıcı, elektrik sinyallerini yükselten ve dağıtan elektronik bir cihazdır. Buna karşılık, pasif bir yıldızın aktif elemanları yoktur, bu da elektrik sinyallerinin yükseltilmediği anlamına gelir. Pasif yıldız esasen başka hiçbir bileşeni olmayan bir elektrik bağlantısıdır.

FlexRay, yalnızca "saf" topolojilerle sınırlı değildir; daha önce açıklanan topolojiler de birleştirilebilir. Veri yolu topolojisi, düğümlerin bir hat boyunca sıralandığı ve her bir düğümün sırasıyla veri aldığı sistemlerde kullanılır. Yıldız topolojisi ise merkezi bir düğümden gelen verilerin diğer düğümlere iletildiği sistemlerde tercih edilir. FlexRay, bu topolojileri birleştirerek hibrit ağlar oluşturma imkânı sunar [28].

2.3.6 Kullanım alanları

FlexRay, özellikle otomotiv endüstrisinde, güvenlik açısından kritik uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Direksiyon, fren ve süspansiyon gibi x-by-wire sistemlerinde kullanılarak, araçlarda mekanik bağlantıların yerini alabilir. Bunun yanı sıra, FlexRay, sanayi otomasyonu, uçak ve tren sistemleri gibi diğer alanlarda da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

2.3.7 Avantaj ve dezavantajlari

FlexRay'in en büyük avantajlarından biri yüksek veri hızıdır. FlexRay, her iki kanal üzerinden 10 Mbps hızında veri iletebilir. Bu, CAN protokolüne göre 20 kat daha hızlı veri iletimine olanak tanır. Ayrıca, FlexRay'in deterministik yapısı, veri iletim süresinin önceden belirlenmesini sağlar ve bu da özellikle güvenlik açısından kritik uygulamalarda büyük bir avantajdır.

FlexRay'in dezavantajları arasında maliyetlerin yüksek olması ve sistemin karmaşıklığı bulunmaktadır. FlexRay, CAN gibi daha düşük maliyetli sistemlere kıyasla daha pahalıdır. Ayrıca, FlexRay'in uygulanması ve yönetimi, daha karmaşık bir yapı gerektirir, bu da sistemin kurulum ve bakım maliyetlerini artırabilir.

Tablo 6'da CAN, FieldBus, Byteflight ve FlexRay protokollerinin bazı özellikler bakımından kıyası verilmiştir.

2.4 MOST protokolü

Medya Odaklı Sistem Taşıma (MOST) ağı, MOST iş organizasyonu protokolü tabanlı otomotiv birliği multimedya bilgi iletim teknolojisi tarafından geliştirilen bir iletim ağı sistemidir [29]. Yüksek iletim hızı, düşük maliyet, yüksek anti-parazit yeteneği ve esneklik gibi avantajlara sahiptir [30]. MOST, ses, video ve diğer multimedya verilerinin araç içi eğlence sistemlerinde iletimini sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. MOST, araçlardaki yaygın veri iletim yollarından farklı olarak halkalı topolojiye dayanmaktadır. Fiber optik kablo tabanlı bir veri iletim protokolü olan MOST, ilk olarak 2001 yılında kullanıma sunulmuştur. 2013 yılı itibarıyla 140 araç modelinde kullanılmaya başlanmış ve Audi A3, Mercedes S serisi gibi

araçlarda yer almıştır. Günümüzde birçok otomobil markası tarafından tercih edilmektedir [31].

Geleneksel veri yolu ağı sistemi düşük güvenilirliğe ve hata toleransına sahiptir. Bu nedenle, ses verilerinin geleneksel araç veri yolu üzerinden yüksek bant genişliğinde iletimi yeni bir sorun haline gelmiştir. MOST yeni ve esnek bir mimariye sahip bir iletişim sistemidir. Ses sinyallerini eşzamanlı olarak iletebilir ve günümüzde otomobillerde en yaygın kullanılan multimedya sistemidir [32].

MOST protokolünde, alıcı-vericiler değiştirildikten sonra kablo bağlantıları üzerinden iletişim mümkündür. Cihazlardan biri (master) halkadaki cihazlar için tüm veri tabanını içerir. Şekil 8'de aygıtlar üzerinde halka topolojisinin gösterimi verilmiştir. Bunun yanı sıra bu protokolün en büyük avantajı, yüksek bant genişliği sunması ve veri iletiminde yüksek güvenilirlik sağlamasıdır.



Şekil 8. Aygıtlar üzerinde gösterilmiş temsili halka topolojisi

2.4.1 Mesaj çerçeve yapısı

MOST protokolü, veri iletiminde belirli bir çerçeve yapısı kullanır. MOST25, MOST50 ve MOST150 olmak üzere üç farklı versiyonu bulunur ve bu versiyonlar veri iletim hızlarına göre adlandırılmıştır. Her bir versiyonun çerçeve yapısı farklıdır. MOST25'teki veri alışverişi protokolü diğer protokollerden (örneğin CAN, LIN) çok daha karmaşıktır [33]. MOST25'te veri çerçevesi 16 alt çerçeveden oluşurken, MOST150'de bu sayı 384 byte'a kadar çıkabilir [31]. Çerçevede kontrol verileri, senkron veri ve asenkron veri olmak üzere üç farklı veri türü bulunur.

En tipik veri türü, multimedya verilerini temsil eden ve çerçevenin yapılandırılabilir en büyük bölümünü kaplayan senkron veridir. Asenkron veriler, GPS sistemleri, erişilen dosyalar hakkında bilgiler ve MOST sistemi içindeki kapsüllenmiş protokollerin verileri gibi çoklu ortam bilgilerini desteklemek için kullanılır. Kontrol verileri ağ bağlantı noktaları arasındaki iletişimin yönetilmesinden sorumludur. Bu nedenle, veri çerçevesi 32 bayt uzunluğundadır ve çerçevenin her bir iletişim birimi tarafından 16 alt çerçeveye bölünmesi gerekir (Şekil 9).

Özellik	CAN	FieldBus	Byteflight	FlexRay
Mesaj iletimi	asenkron	senkron	senkron ve asenkron	senkron ve asenkron
İletişim Yöntemi	Dinamik arbitraj ile zaman tetiklemeli iletişim (üst protokol kullanılarak)	Master-Slave konfigürasyonu, veriyi ileten düğümü master belirler	TDMA	TDMA, ancak dinamik iletişime izin verir
Mesaj tanımlama Veri hızı	mesaj tanımlayıcı 1 Mbps brüt	zaman dilimi 12 Mbps brüt	mesaj tanımlayıcı 10 Mbps brüt	zaman dilimi 10 Mbps brüt
Bit kodlama	Bit doldurmalı NRZ	Modifiye frekans modülasyonu (MFM)	Başlangıç/bitiş bitli NRZ	Başlangıç/bitiş bitli NRZ
İletim Bayt Sayısı	0-8	kontrol baytı (PROFIBUS- PA)	0-12	0-254
İletişim Kanalı Sayısı	1	1	1-2 – ikinci kanal yedek olarak kullanılabilir	2 – ikinci kanal yedek olarak kullanılabilir
Fiziksel katman	l Mbps'ye kadar verici/alıcı	Master tarafından, 100 ns aralığında saat senkronizasyonu ile desteklenir.	10 Mbps'ye kadar optik verici/alıcı	Diferansiyel sinyalle 10 Mbps
Saat senkronizasyonu	sağlanmamış	master tarafından, 100 ns aralığında	master tarafından, 100 ns aralığında	dağıtık, µs aralığında
Zaman uyumluluğu	desteklenmiyor	destekleniyor	yüksek öncelikli mesajlar için desteklenir	destekleniyor
Gecikme titreșimi	veri yolu yüküne bağlı	tüm mesajlar için sabit.	t_cyc'ye göre yüksek öncelikli mesajlar için sabit	tüm mesajlar için sabit
Hata Denetimi	15 bit CRC	l baytlık çerçeve kontrol sırası (PROFIBUS-PA)	Optik fiber ve transceiver ile sağlanır, başlangıç/bitiş bitleri ile NRZ kodlama kullanılır.	11 bit başlık CRC & 24 bit çerçeve CRC
Genişletilebilirlik	zaman-kritik olmayan uygulamalar için mükemmel	yalnızca orijinal tasarımda genişletme planlanmışsa mümkün	yüksek öncelikli mesajlar için genişletme ve bant genişliği üzerinde etkisi	fonksiyonel ve yapısal alanın ayrılması
Esneklik Karmasıklık	her düğüm için esnek bant genişliği Düsük	her düğüm için yalnızca bir mesaj ve TDMA döngüsü. Yüksek	her düğüm için esnek bant genişliği Yüksek	her düğüm için çoklu yuva, dinamik Yüksek
Kullanım Alanları	CAN otomasyon ve otomotiv uygulamalarında yaygın olarak kullanılır	Otomasyon amaçları için yaygın olarak kullanılır	Otomotiv uygulamalarında, özellikle güvenlik sistemlerinde yaygın olarak kullanılır.	Yeni protokol, geniş çapta kullanılmıyor ancak gelecekteki uygulamalar için yüksek seviyede araştırmalar yapılıyor

Tablo 6. CAN, fieldbus, byteflight, flexray kıyası

2.4.2 MOST protokolü versiyonları

MOST protokolünde versiyon isimleri Mbps cinsinden veri hızlarına göre isimlendirilmiştir. Tablo 7'de versiyonların çerçeve boyutları byte cinsinden görülebilir.

Tablo 7. MOST protokolü çerçeve boyutları

Versiyon	Veri Hızı (Mbps)	Çerçeve Boyutu (Byte)
MOST25	25	16 Alt Çerçeve
MOST50	50	128 Byte
MOST150	150	384 Byte

MOST25: MOST25 protokolünde ikinci katman, iletişimde çerçeve yapısına dayanır ve bu çerçeveler 16 çerçevelik bloklar halinde gönderilir. Her bir çerçeve, senkronize veri (örneğin, ses verisi) ve paket veri (örneğin, GPS verisi) içerir. Çerçevedeki senkron ve paket veri bölümlerinin boyutları sınır işaretleyicileri ile önceden belirlenmiştir. Paket veri bölümü en fazla 9 dört bitlik kelime içerir ya da hiç veri taşımayabilir. Ağın kontrolü için kullanılan kontrol mesajları, büyük bir mesajın parçalara ayrılmasıyla bloklar halinde iletilir [31]. MOST25 protokolünde senkron veri bölümü, sürekli veri akışı gerektiren ses gibi veriler için kullanılırken, paket veri bölümü GPS gibi sistemlerden gelen asenkronize verilerin iletimine olanak tanır.



Şekil 9. MOST protokolü mesaj çerçeve yapısı



Şekil 10. MOST25 protokolü çerçeve yapısı

MOST50: MOST50, veri iletim hızını MOST25'e kıyasla iki kat artırır ve fiziksel katmanda çerçeve yapısında değişiklik yapılmıştır. MOST50 çerçevesi, 128 bayt büyüklüğünde olup daha basit ve esnek bir yapı sunar. Çerçevenin başlangıcında 11 baytlık bir kontrol alanı bulunur. Stream veya paket veri kullanılmadığında, bu bölümler kaldırılabilir, böylece çerçeve daha verimli bir şekilde kullanılabilir.

MOST50 protokolü, artan hız ve sadeleştirilmiş çerçeve yapısıyla veri iletimini optimize eder. Kontrol verilerinin tek bir başlık alanında toplanması, veri yönetimini ve hata ayıklamayı daha kolay hale getirir. Ayrıca, çerçeve boyutunun iki katına çıkarılması, daha fazla verinin taşınmasına olanak tanır [31].



Şekil 11. MOST50 protokolü çerçeve yapısı

MOST150: MOST150, MOST50'ye kıyasla üç kat daha yüksek bir veri iletim hızına sahiptir ve 384 baytlık çerçeveler kullanır. Çerçeve yapısı değişmeden kalmış olsa da, veri alanı genişletilmiştir. MOST150, senkron veri bölümüne ek olarak izokron veri türünü destekler. İzokron veri, senkron iletişim hızından farklı bir örnekleme hızına sahip veri türüdür ve bu özellik, özellikle ses ve video akışı gibi uygulamalarda senkron iletişim ortamının simüle edilmesi için kullanılır.

MOST150 protokolü, yüksek hızda veri iletimi gereken ses ve görüntü gibi uygulamalarda tercih edilir. Hizmet Kalitesi (QoS) desteği ile belirli uygulamalar için gerekli bant genişliği ayrılabilir ve Ethernet tabanlı veri iletimine olanak tanır. Ayrıca, senkron veri iletişiminin yanı sıra asenkron veri kanalı da bulunur ve bu kanal üzerinden TCP/IP protokolü kullanılarak veri iletimi gerçekleştirilebilir [31].

Çarpışma uyarısı, trafik işareti izleme, şeritten ayrılma uyarısı, şerit yönlendirme, yaya uyarısı, gece görüşü, uyarlanır hız sabitleyici veya çarpışma öncesi uyarı gibi gelişmiş sürücü destek sistemleri çok çeşitli araç alt sistemleriyle entegrasyon gerektirdiğinden MOST150 bu sistemler için rahatça kullanılabilmektedir [34].

MOST150 tarafından sunulan 150 Mbps aralığındaki verim, araç iletişim ağları içinde en yüksek olanıdır. Buna rağmen, optik fiberlerin fiziksel katmanından yararlanmaya çalışan tasarımcılarla daha da hızlı çözümler aranmaktadır.



Şekil 12. MOST150 protokolü çerçeve yapısı

Sonuç olarak bu versiyonlar karşılaştırıldığında MOST150'nin yüksek veri hızları ve geniş bant genişliği gerektiren uygulamalar için en uygun protokol olduğu; MOST50'nin orta seviyedeki veri iletim gereksinimlerini karşılayacak şekilde optimize edildiği; MOST25'in ise düşük veri ihtiyacı olan uygulamalar için ideal olduğu görülmektedir.

Tablo 8'de bu versiyonların bant genişliği bilgileri dolayısıyla iletişim hızları karşılaştırılmıştır.

2.4.3 MOST protokolü versiyonları

MOST protokolü bir halka topolojisi kullanarak çalışır. Her bir cihaz (düğüm) gelen veri çerçevesini işler ve bir sonraki cihaza iletir. Bu halka yapısı, veri iletiminde yüksek hız ve güvenilirlik sağlar. Ağda bir ana düğüm (master) bulunur ve diğer cihazlar bu ana düğüme senkronize olur. Ana düğüm, ağdaki cihazların durumunu yönetir ve sistemin düzgün çalışmasını sağlar.

Önceki düğümden alınan veri bloğu bilgi ve komut kaynağı olarak kullanılır. Önceki düğümden alınan blok yeniden oluşturulur ve iletilir. Kapalı cihazlar optik sinyali analizi olmadan iletir. Veri aktarımı, blok gönderici tarafından alındığında tamamlanır (Şekil 13).

Tablo 8. MOST	protokol	versiyonlarının	kıyası
---------------	----------	-----------------	--------

Parametre	MOST25	MOST50	MOST150
Akış verisi			
Minimum bant genişliği [Mbps]	8.48	0.38	0
Maksimum bant genişliği [Mbps]	21.17	44.93	142.85
Paket verisi			
Minimum bant genişliği [Mbps]	0	0	0
Maksimum bant genişliği [Mbps]	10.84	44.54	142.85
Kontrol verisi			
Minimum bant genişliği [kbps]	405.84	448.0	512.0
Maksimum bant genişliği [kbps]	405.84	810.62	1130.0



Şekil 13. MOST haberleşme diyagramı – yönetici ve köle ağlar

2.4.4 Kullanım alanları

MOST protokolü, özellikle otomotiv endüstrisinde araç içi multimedya sistemlerinin yönetiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Araç içi eğlence sistemleri, seyrüsefer sistemleri, kamera görüntüleme sistemleri gibi birçok multimedya bileşeni, MOST ağı üzerinden birbirine bağlanır ve senkronize şekilde çalışır.

2.4.5 Avantaj ve dezavantajları

MOST protokolünün en büyük avantajı, yüksek veri iletim hızına sahip olması ve veri iletiminde yüksek güvenilirlik sağlamasıdır. Fiber optik kablo kullanımı, elektromanyetik parazitlere karşı dayanıklılık sağlar. Ancak MOST sisteminin kurulum maliyetleri, fiber optik kablo altyapısı ve özel donanım gerektirdiği için yüksektir. Bu sebepten maliyet açısından, fiber optik kablolar ve donanımlar diğer ağ çözümlerine göre daha pahalı olabilir.

2.5 Ethernet

Ethernet, bilgisayar ağlarında veri iletimi için kullanılan bir teknoloji olup, ilk olarak yerel alan ağlarında (LAN) yaygınlaşmıştır. Günümüzde Ethernet, hem tüketici elektroniği hem de endüstriyel ve otomotiv uygulamalarda geniş çapta kullanılmaktadır. Ethernet'in avantajları arasında yüksek bant genişliği, düşük gecikme süreleri ve esnek yapı bulunur. Özellikle otomotiv endüstrisinde Ethernet, CAN ve FlexRay gibi geleneksel iletişim protokollerine kıyasla daha yüksek veri hızları sunması nedeniyle tercih edilmektedir [25, 26].

2.5.1 Donanım gereksinimi

Ethernet ağı için gereken donanım bileşenleri arasında ağ kartları, anahtarlar (switch), yönlendiriciler (router) ve kablolama bulunmaktadır. Otomotiv uygulamaları için Ethernet, özellikle sınırlı alan ve elektromanyetik uyumluluk (EMC) gereksinimlerine uygun olacak şekilde optimize edilmiştir. Standart Ethernet kabloları genellikle twisted pair kablolar üzerine kuruludur, ancak otomotiv uygulamalarında daha ince ve hafif kablolar tercih edilir [27, 28].

2.5.2 Mesaj yapısı

Ethernet'in temel mesaj yapısı, bir çerçeve formatına dayanır. Her bir çerçeve, başlık (header), veri alanı (payload) ve sonlandırma (trailer) bölümlerinden oluşur. Başlık kısmı, kaynaktan hedefe verilerin nasıl iletileceği hakkında bilgi sağlar. Veri alanı, iletilen bilginin kendisini içerirken, sonlandırma kısmı veri bütünlüğünü sağlamak için hata denetimi gibi bilgileri içerir. Otomotiv uygulamalarında bu yapı, zaman hassasiyeti olan veri akışları için optimize edilebilir [35]. Şekil 14'te Automotive Ethernet (AE) mesaj yapısı verilmiştir.

Önuç	SOF	Hedef Adres	Kaynak Adres	VLAN	Tür	DATA	FCS
7 bit	1 bit	6 bit	6 bit	4 bit	2 bit	46-1500	4 bit

Şekil 14. Automotive ethernet mesaj çerçeve yapısı

2.5.3 Automotive Ethernet çeşitleri

- Zaman Tetiklemeli Ethernet (TTE): SAE tarafından SAE6802 standardıyla tanımlanmıştır. Genellikle güvenliğin ön planda olduğu uygulamalarda, özellikle ulaşım sektöründe ve endüstriyel otomasyon sistemlerinde kullanılır. IEEE 802.3 Ethernet ile uyumlu olup, zaman tetiklemeli teknoloji sayesinde standart Ethernet'in sağlam hata toleransı ve gerçek zamanlı işlevleriyle entegre edilmiş belirleyici gerçek zamanlı iletişimi mümkün kılar.
- Esnek Zaman Tetiklemeli Ethernet (FTTE): Katı gerçek zamanlı işlemleri paylaşımlı veya anahtarlamalı Ethernet üzerinden sorunsuz ve esnek bir şekilde destekler. CAN'de olduğu gibi, gerçek zamanlı trafiğin kaynağı adresleme şeması aracılığıyla belirlenir. FTT Ethernet protokolü, etkili bir ana/multi-köle iletim kontrol tekniği kullanarak çevrimiçi zamanlama ve kabul kontrolünü birleştirir, böylece dinamik iletişim gereksinimlerinde dahi gerçek zamanlı iletişimi garanti eder.
- Zaman Duyarlı Ağ (TSN): IEEE'nin 802.1 çalışma grubu tarafından geliştirilen Ethernet standartları kümesini ifade eder. TSN, veri iletiminde zaman garantileri sağlamayı amaçlayan bir standart Ethernet genişlemesidir. TSN teknolojisinin temel yetenekleri şunlardır:
- Ağ elemanları arasında zaman senkronizasyonu sağlama,
- Kontrollü ve öngörülebilir gecikmeler,
- İletişim yollarının seçimi ve hata toleransı,
- Yedeklilik.
- Kablosuz Zaman Duyarlı Ağ (WTSN): TSN kavramını kablosuz iletişime uyarlayarak garantili kablosuz hizmetler sunar. Esnek kurulum imkânı, daha düşük bakım maliyetleri, yeniden yapılandırılabilirlik ve hareket kabiliyeti gibi avantajlar sağlar. WTSN, Endüstri 4.0 için esnek ve verimli bir teknoloji olarak öne çıkacaktır [36].

2.5.4 Ethernet'in otomotivde kullanımı

Ethernet, otomotiv sektöründe yüksek veri hızı ve esnek yapı sunması nedeniyle yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle Gelişmiş Sürücü Destek Sistemleri (ADAS), otonom sürüş ve eğlence sistemlerinde veri transferi kritik önemdedir. Tablo 9, Ethernet'in otomotivde kullanım alanlarını ve sağladığı avantajları gösteriyor.

2.5.5 Avantajlar ve dezavantajlar

AE'nin avantajları şunlardır:

- Standartlaştırılmıştır: ISO, AE protokolünü ISO 21111 ile standartlaştırmıştır.
- Daha yüksek bant genişliği sağlar: LIN (20 kb/s), CAN (1 Mb/s), FlexRay (10 Mb/s) ve MOST (25, 50 veya 150 Mb/s) ile karşılaştırıldığında daha yüksek veri iletim hızlarına sahiptir ve yanıt süresi kısadır.
- Dünyanın en yaygın ağ standardı: TCP/IP, genellikle Ethernet üzerinden uygulanır. Ethernet, en yaygın ağ arabirim protokolü olduğu için, iyi test edilmiş ve üst katman yazılım arayüzleri standart Ethernet ile aynıdır.

- Yüksek esneklik sağlar: Tak ve çalıştır özelliklerine sahiptir, bu da bileşenlerin gerektiğinde otomatik algılama ve yapılandırma ile bağlanıp çıkartılmasına olanak tanır.
- EMC, EMI (Elektromanyetik Girişim) ve otomotiv uygulamaları için gerekli sıcaklık sınıfı gereksinimlerini karşılar.
- Her çerçevenin bir kaynağı ve bir veya birden fazla hedefi vardır: Diğer otomotiv ağ türlerinde, çerçevenin vericisi tanımlanmaz ve tüm düğümler her zaman tüm çerçeveleri alır, ardından çerçeve içeriğinin kullanılıp kullanılmayacağına karar verir.
- Ethernet teknolojisi ölçeklenebilir: Günümüzün otomotiv sistemlerinin getirdiği ölçeklenebilirlik gereksinimlerini karşılar (yani birbirine bağlanacak düğüm sayısı sürekli artmaktadır).

AE'nin dezavantajları şunlardır:

- Düşük hata toleransı vardır.
- Ethernet'in yıldız topolojisi nedeniyle, her düğümün tek bir bağlantı noktasına (anahtara) geri bağlanması gerekir: Bu, kablolama açısından daha sınırlayıcı gereksinimler getirir.
- Ağa daha fazla anahtar eklemek, ağaç topolojisi yaratır: Bu, daha fazla esneklik sağlar ancak maliyeti artırır.
- Ethernet, "en iyi gayret" ile çalışan bir iletişim protokolüdür: Bu, güvenilirlik ve zamanında teslimatlar konusunda güvenilir olmadığı anlamına gelir.
- Ethernet, Radyo Frekansı Girişimi'nden (RFI) etkilenir: Bu nedenle, güvenli ve gerçek zamanlı sistemlerde kullanılamaz.

Bu son dezavantajın bir sonucu olarak, Ethernet standardına son on yılda birçok geliştirme eklenmiştir. Bu geliştirmeler, gerçek zamanlı özellikleri destekleyebilmek amacıyla tasarlanmıştır. Zaman Tetiklemeli Ethernet (TTE), Esnek Zaman Tetiklemeli Ethernet (FTTE), Zaman Duyarlı Ağ (TSN) ve Kablosuz Zaman Duyarlı Ağ (WTSN) gibi çözümler, belirli gecikmeleri garanti edebilecek gelecek vaat eden çözümler arasındadır [36].

Tablo 9. Automotive ethernet kullanım alanları

Kullanım Alanı	Açıklama	Avantajları
ADAS (Gelişmiş Sürücü Destek Sistemleri)	Yüksek bant genişliği ile radar, kamera ve sensör verileri işlenir.	Düşük gecikme süresi, yüksek veri aktarım hızı
Eğlence Sistemleri	Araç içi multimedya ve internet erişimi sağlar.	Güvenilir bağlantı, yüksek hız
Otonom Sürüş	Araç sensörleri ve kontrol üniteleri arasındaki veri akışını sağlar.	Zaman duyarlı ağ (TSN) ile hassas veri yönetimi

5. Araç içi haberleşme sistemlerinin karşılaştırılması

CAN, LIN, FlexRay, MOST ve AE gibi protokoller farklı veri hızlarına, topolojilere ve iletişim mimarilerine sahiptir. CAN ve LIN gibi olay tetiklemeli protokoller, daha düşük hızlar ve daha az karmaşık uygulamalar için uygundur. Öte yandan, FlexRay ve MOST gibi zaman tetiklemeli protokoller, özellikle x-by-wire uygulamaları ve multimedya sistemleri gibi yüksek hız ve gerçek zamanlı veri iletimini gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. AE ise, Ethernet'in esnekliğini ve yüksek hızını sunduğundan, gelecekte araç içi iletişim sistemlerinin temel protokollerinden biri olma potansiyeline sahiptir.

Her protokolün kendine özgü avantajları ve dezavantajları vardır. CAN, yaygın kullanımı, düşük maliyeti ve sağlamlığı ile öne çıkarken, LIN düşük hız gerektiren basit uygulamalar için idealdir. FlexRay, yüksek hız ve güvenilirliği ile kritik uygulamalar için tasarlanmıştır, ancak maliyeti ve karmaşıklığı yüksektir. MOST, yüksek hız ve bant genişliği gerektiren multimedya uygulamaları için uygundur, ancak yüksek maliyetli bir çözümdür. AE ise veri iletim hızının yanı sıra esnekliği ile ön plana çıkmaktadır, ancak güvenilirlik konusunda bazı sınırlamaları vardır. [36]. Tablo 10'da CAN, LIN, FlexRay, MOST ve AE için teknik karşılaştırmalar verilmiştir.

abio 10. A	traç içi haberleşme siste	mlerinin teknik açı	dan karşılaştırılması		
Özellik	CAN	LIN	Flex Ray	MOST	AE
Maksimum Veri Hızı	1 Mbps	20 kbps	10 Mbps	150 Mbps	1 Gbps (ve üzeri)
Maksimum Veri Alanı	8 bayt (CAN) / 64 bayt (CAN FD)	8 bayt	254 bayt	64 bayt (çerçeve başına)	Maksimum MTU (1500 bayt)
İletişim Türü	Çoklu erişim (Broadcast)	Master-Slave	Deterministik (Zaman tetiklemeli)	Ring Topolojisi	Tam çift yönlü (Full Duplex)
Hata Toleransı	Orta	Düşük	Yüksek	Orta	Yüksek
Kullanım Alanı	Motor kontrolü, fren sistemleri	Sensörler, klima kontrolü	Güvenlik kritik sistemler, otonom sürüş	Multimedya sistemleri	ADAS, otonom sürüş
Maliyet	Düşük	Çok düşük	Yüksek	Orta-Yüksek	Orta-Yüksek
Uyumluluk	Otomotivde yaygın, eski sistemlerle uyumlu	Basit uygulamalar için uygun	Lüks ve otonom araçlarda kullanılıyor	Multimedya odaklı, diğer sistemlerle sınırlı uyumluluk	Yeni nesil araçlarda yaygınlaşıyor

Tablo 10. Araç içi haberleşme sistemlerinin teknik açıdan karşılaştırılması

6. Araç içi haberleşme sistemlerinin avantaj ve dezavantajları

Aşağıdaki tabloda araç içi haberleşme yollarının avantaj ve dezavantajları verilmiştir.

Tablo 11. Araç içi haberleşme sistemlerinin avantaj ve dezavantajları

Protokol	Avantajlar	Dezavantajlar
CAN	Standartlaştırılmış, düşük kablo kullanımı, düşük maliyet, uygulama kolaylığı, çoklu mastar ve çoklu yayın, sağlamlık, esneklik, yüksek hata toleransı, verimlilik	Sımırlı uzunluk (40 metre), düşük performans, yüksek yazılım ve bakım maliyetleri, veri yolunun yük dirençleri ile sonlandırılması gerekliliği
LIN	Standartlaştırılmış, uygulaması kolay, düşük maliyetli, esnek, belirleyici, kendi kendini senkronize eder, EMI azaltma, garantili gecikme süreleri	Düşük veri hızı, ana-köle yapılandırması, düşük hata toleransı
FlexRay	Standartlaştırılmış, yüksek veri hızı, farklı topolojileri destekler, yüksek güvenilirlik, hem senkron hem de asenkron veri aktarımı, iki bağımsız kanal	Yüksek maliyet, karmaşık uygulama, düşük çalışma voltaj seviyeleri
MOST	Standartlaştırılmış, esnek, yüksek veri hızı, değişken baud hızlarını destekler, optik fiber kullanımı	Çok yüksek maliyet, düşük hata toleransı
AE	Standartlaştırılmış, yüksek veri iletim hızı, yüksek esneklik, düşük yanıt süresi, EMC ve EMI gereksinimlerini karşılar, ölçeklenebilir	Düşük hata toleransı, yüksek maliyet, yıldız topolojisi nedeniyle daha fazla kablolama gereksinimi, RFI'dan etkilenir, güvenilir olmayan bir protokoldür

7. Sonuçlar

Bu çalışmada otomotiv sektöründe otonom sürüş teknolojilerinin gelişimi ve bu süreçte veri yollarının kritik rolü ele alınmıştır. Günümüzde otomobillerde kullanılan çeşitli veri yolu protokollerinin (CAN, LIN, FlexRay, MOST ve Ethernet) her birinin kendine özgü avantaj ve sınırlamaları bulunmaktadır. CAN, düşük maliyetli ve güvenilir bir yapı sunarken; LIN düşük veri hızı gerektiren basit uygulamalarda tercih edilmektedir. FlexRay, yüksek hız ve güvenilirlik gerektiren kritik uygulamalarda öne çıkarken; MOST, yüksek bant genişliği gerektiren multimedya sistemleri için uygun bir çözümdür. Ethernet ise yüksek veri iletim hızı ve esnek yapısıyla geleceğin akıllı araç teknolojileri için potansiyel bir aday olarak görülmektedir.

Ayrıca havacılıkta kullanılmakta olan veri yollarının da otomotivde kullanılabilirliği üzerine birtakım araştırmalar yapılmış ve ARINC 818 veri yolunun 28.05 Gbps'ye kadar veri iletim hızını desteklemesinin yanında bu veri yolunun güvenilir, esnek, kararlı olması gibi çok fazla avantajları bulunması sebebi ile otomotiv sektörünün ihtiyaçları özelinde incelenmesinin geleceğin akıllı taşıtlarının veri yolları tasarımında önemli olabileceği öngörülmektedir [37]. Bununla birlikte, otonom sürüş ve yapay zekâ gibi yeni teknolojilerin yükselişiyle, veri yolu güvenliği, hız ve genişletilebilirlik gereksinimleri daha da ön plana çıkmaktadır.

Günümüzde otomotiv veri yolu teknolojileri, bağlantılı ve otonom araçların yaygınlaşması, elektrikli araçların artışı ve V2X iletişimi gibi faktörlerle dönüşüm geçirmektedir. CAN veri yolu, sınırlı hız kapasitesi nedeniyle CAN FD ile değiştirilmeye başlanmıştır [38]. LIN, düşük maliyetli sistemlerde varlığını sürdürebilir ancak uzun vadede kablosuz haberleşme teknolojileri ile değişebilme olasılığı mevcuttur.

FlexRay, deterministik iletişim avantajına rağmen Automotive Ethernet'in sunduğu yüksek hız ve esneklik nedeniyle otomotiv endüstrisinde giderek daha az tercih edilmektedir. MOST ise, multimedya sistemleri için geliştirilmiş olmasına rağmen karmaşık yapısı ve yüksek çözümlerle maliveti nedenivle Ethernet tabanlı değiştirilmektedir [39]. Automotive Ethernet, 1 Gbps ve üzeri hızları, tam çift yönlü iletişimi ve yüksek hata toleransı sayesinde özellikle ADAS, otonom sürüş ve yüksek bant genişliği gerektiren sistemlerde standart hale gelmektedir. Siber güvenlik önlemlerinin artırılması amacıyla Secure CAN ve kriptografik doğrulama yöntemleri yaygınlaşması ile veri yollarının güvenilirliğinin artması beklenmektedir. Bu bağlamda, gelecekte daha yüksek hız ve güvenlik sağlayan yeni protokol ve sistemlerin geliştirilmesi gerekli olduğu ve bu alanda gelişimlerin sağlanacağı açıkça ortaya çıkmaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %11

Kaynaklar

- [1] Bosch. CAN Specification (Version 2.0). Robert Bosch GmbH, 1991.
- [2] LIN Consortium. LIN Specification (Version 2.2A). LIN Consortium, 2010.
- [3] MOST Cooperation. MOST Specification (Version 3.0). MOST Cooperation, 2014.
- [4] FlexRay Consortium. FlexRay Communications System Specification (Version 3.0). FlexRay Consortium, 2010.
- [5] OPEN Alliance. Automotive Ethernet Specification. OPEN Alliance, 2014.
- [6] 3GPP. Release 14: Cellular V2X. 3rd Generation Partnership Project, 2017.
- [7] Li, R., Liu, C., & Luo, F. A design for automotive CAN bus monitoring system. In 2008 IEEE vehicle power and propulsion conference pp. 1-5. IEEE, September, 2008. https://doi.org/10.1109/VPPC.2008.4677 544
- [8] Lokman, S. F., Othman, A. T., & Abu-Bakar, M. H. Intrusion detection system for automotive Controller Area Network (CAN) bus system: a review. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2019 (1), 2019. https://doi.org/10.1186/s13638-019-1484-3
- [9] Guštin, M. CAN Bus Security Protocol: lightweight message confidentiality, authentication, and freshness on an automotive bus (Doctoral dissertation, Graz University of Technology), 2022.
- [10] Keskin, U. In-vehicle communication networks: a literature survey, 2009.
- [11] Gowda, M. B., Biradar, R. C., & Kotgire, M. K. CAN controlled complex real time stimulus for verification

and validation of powertrain systems. In 2018 Second International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications (ICAECC) pp. 1-4. IEEE, February, 2018. https://doi.org/10.1109/ICAECC.2018.847 9476

- [12] Freiberger, S., Albrecht, M., & Käufl, J. Reverse engineering technologies for remanufacturing of automotive systems communicating via CAN bus. Journal of remanufacturing, 1, 1-14, 2011. https://doi.org/10.1186/22 10-4690-1-6
- [13] Bozdal, M., Samie, M., & Jennions, I. A survey on can bus protocol: Attacks, challenges, and potential solutions. In 2018 International Conference on Computing, Electronics & Communications Engineering (iCCECE) pp. 201-205, IEEE, August 2018. https://doi.org/10.1109/iCCECOME.2018.865 8720
- [14] Wolf, M., Weimerskirch, A., & Paar, C., "Secure automotive on-board networks," Proceedings of the IEEE, 2006.
- [15] Cho, K., & Shin, K. G., "Fingerprinting electronic control units for vehicle intrusion detection," USENIX Security Symposium, 2016.
- [16] Larson, U. E., & Nilsson, D. K., "Securing Vehicles Against Cyber Attacks," Proceedings of the 16th International Conference on Embedded Security, 2008.
- [17] Marchetti, M., & Stabili, D., "Anomaly Detection of CAN Bus Messages Through Analysis of ID Sequences," IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017. https://doi.org/10.1109/IVS.2017.7995934
- [18] AREA, B. S. S. A. (n.d.). Automotive Bus Systems. Retrieved from Atmel website.
- [19] Hardt, W., & Schmidt, D. I. R. (n.d.). Automotive Communication Buses.
- [20] Piao, C., Liu, Q., Huang, Z., Cho, C., & Shu, X. VRLA battery management system based on LIN bus for electric vehicle. In Advanced Technology in Teaching Selected papers from the 2012 International Conference, 2013.
- [21] Artal, J. S., Caraballo, J., & Dufo, R. CAN-LIN-Bus protocol. Implementation of a low-cost serial communication network, June 2014. https://doi.org/0.1109/TAEE.2014.6900168
- [22] Xu, Y., Wang, J., Chen, W., Tao, J., & Liu, Q. Application of LIN bus in vehicle network. In 2006 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety pp. 119-123. IEEE, December 2006. https://doi.org/1 0.1109/ICVES.2006.371566
- [23] Berwanger, J., Ebner, C., Schedl, A., Belschner, R., Fluhrer, S., Lohrmann, P. & Mores, R. FlexRay–the communication system for advanced automotive control systems. SAE transactions, 2001. https://doi.org/10.4271 /2001-01-0676
- [24] Shaw, R. & Jackman, B. An introduction to FlexRay as an industrial network. IEEE International Symposium

on Industrial Electronics, 2008. https://doi.org/10.1109/ISIE.2 008.4676987

- [25] PROFIBUS, PROFIBUS PA technology and application, System Description, Karlsruhe: PROFIBUS Nutzerorganisation e.V, 2007.
- [26] Makowitz, R., & Temple, C. Flexray-a communication network for automotive control systems. In 2006 IEEE International Workshop on Factory Communication Systems pp. 207-12) IEEE, June 2006. https://doi.org/10.1109/WFC S.2006.1704153
- [27] Xu, Y. N., Jang, I. G., Kim, Y. E., Chung, J. G. & Lee, S. C. Implementation of FlexRay protocol with an automotive application. International SoC Design Conference, 2008. https://doi.org/10.1109/SOCDC.2008.48 15675
- [28] RAUSCH., M. FlexRay. CARL HANSER VERLAG GMBH &. 2007
- [29] MOST Cooperation, *MOST Specification Rev. 3.0 E2*, MOST Cooperation, ch.2, 2010
- [30] Lu, S., Fang, Z., Qu, G., & Gao, S. ETBAC-Based model in media oriented system transport network. In 2015 IEEE International Conference on Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications, 2015. https://doi.org/10.1109/ CIT/IUCC/DASC/PICOM.2015.72
- [31] Sumorek, A., & Buczaj, M. The evolution of 'media oriented systems transport' protocol. Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa, 14 (3), 115-120, 2014.
- [32] MOST Cooperation, *MOST Book*, 2st ed. MOST Cooperation, ch.4. 2011.
- [33] Styla S., Walusiak S., Pietrzyk W. Computer simulation possibilities in modelling of ignition advance angle control in motor and agricultural vehicles. Teka Komisji Motoryzacji Energetyki i Rolnictwa, 8, pp. 231-240, 2008.
- [34] Sumorek, A., & Buczaj, M. New elements in vehicle communication 'media oriented systems transport' protocol. Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa, 12 (1), 275-279, 2012.
- [35] Zhou, Z., Lee, J., Berger, M. S., Park, S., & Yan, Y. Simulating TSN traffic scheduling and shaping for future automotive Ethernet. Journal of Communications and Networks, 23 (1), 53-62, 2021.
- [36] Douss, A. B. C., Abassi, R., & Sauveron, D. State-ofthe-art survey of in-vehicle protocols and automotive Ethernet security and vulnerabilities. Mathematical Biosciences and Engineering, 20 (9), 17057-1709, 2023.
- [37] Pamuk A., Sakarya U. Havacılıktaki Video Veri Yolu Standardının Akıllı Taşıtlar İçin Kullanım Olasılığı Üzerine Bir İnceleme, KONJES, 2023.
- [38] Kvaser. Comparing CAN FD with Classical CAN. Kvaser Technical Documents. 2016.
- [39] IEEE Standards Association. Transitioning to automotive Ethernet. IEEE Standards. 2019.

