

ISSN: 2757-9255



ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ DERGİSİ

CUKUROVA UNIVERSITY
JOURNAL OF THE FACULTY OF
ENGINEERING

ARALIK
DECEMBER
2025

Cilt/Volume 40

Sayı/Issue 4



ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ DERGİSİ
Cukurova University,
Journal of the Faculty of Engineering



Sahibi (Owner)

Ali KESKİN
Ç.Ü. Mühendislik Fakültesi Dekanı

Editör (Editor)

Serin MEZARCIÖZ

EDİTÖR KURULU (Editorial Board)

Ali KESKİN (Çukurova Üniversitesi)
Umut ORHAN (Çukurova Üniversitesi)
Mutlu AVCI (Çukurova Üniversitesi)
Mustafa GÖK (Çukurova Üniversitesi)
Mahmut ALTINER (Çukurova Üniversitesi)
Hüseyin AKILLI (Çukurova Üniversitesi)
Ulus ÇEVİK (Çukurova Üniversitesi)
Ali KOKANGÜL (Çukurova Üniversitesi)
Mesut BAŞIBÜYÜK (Çukurova Üniversitesi)
Hacı Murat ARSLAN (Çukurova Üniversitesi)
Oğuz DEMİRYÜREK (Erciyes Üniversitesi)
Hüsamettin BULUT (Harran Üniversitesi)
Metin GÜRÜ (Gazi Üniversitesi)
Mehmet Emin AYDIN (University of the
West of England, İngiltere)
Azra BİLGİN (University of Colorado Boulder,
ABD)

Serin MEZARCIÖZ (Çukurova Üniversitesi)
Hasan ÇETİN (Çukurova Üniversitesi)
Özen KILIÇ (Çukurova Üniversitesi)
Hüseyin ERTEN (Çukurova Üniversitesi)
Belgin BAYAT (Çukurova Üniversitesi)
M. Atakan AKAR (Çukurova Üniversitesi)
R. Tuğrul OĞULATA (Çukurova Üniversitesi)
Özlem ŞENYİĞİT (Çukurova Üniversitesi)
Yusuf KUVVETLİ (Çukurova Üniversitesi)
Hüseyin R. YERLİ (Çukurova Üniversitesi)
Ergun ERÇELEBİ (Gaziantep Üniversitesi)
Nihan ÇETİN DEMİREL (Yıldız Teknik Üniversitesi)
Serter ATABAY (American University of Sharjah,
United Arab Emirates)
Muammer KOÇ (Hamad Bin Khalifa University,
Qatar)
Tamio ENDO (Mie University-Japonya)

Hakemli Bir Dergidir. Yılda Dört Sayı Basılır. / Refereed Journal. Published Quarterly.

Dergimiz **TÜBİTAK ULAKBİM** Mühendislik ve Temel Bilimler Veri Tabanı Listesi'nde taranmaktadır.
Indexed by **TÜBİTAK ULAKBİM** Mühendislik ve Temel Bilimler Veri Tabanı Listesi

Derginin eski adı: Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi
(ISSN: 1019-1011)

YAZIŞMA ADRESİ/CONTACT

Ç.Ü. Mühendislik Fakültesi Dergi ve Yayın Kurulu Başkanlığı Balcalı 01330 Sarıçam/ADANA
Tel : (322) 338 63 57 – (322) 338 70 50 E-posta: cu.mmfdergi@gmail.com



AMAÇ ve KAPSAM

Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, yılda dört sayı olarak yayımlanan hakemli bilimsel bir dergidir. Mühendislik alanındaki gelişmeleri takip etmek, meslek kuruluşları ve bireylerin ulusal ve uluslararası gelişimlerine katkıda bulunmak ve bu alanlarda Türkçe bir kaynak oluşturmak amacıyla yayımlanmaktadır. Derginin yazım dili Türkçe/İngilizcedir. Daha önce başka bir yerde yayımlanmamış tüm özgün ve güncel bilimsel araştırma ve uygulamaları kapsayan makaleler kabul edilmektedir. Tüm mühendislik alanları ile ilgili teorik/deneysel ve uygulamaya yönelik çalışmalar Dergi'nin ilgi alanındadır. Çeviri ve derleme makaleler kabul edilmemektedir. “**Araştırma ve uygulama içeren makaleleri**” yayınlamaktadır.

AIM and SCOPE

Journal of the Engineering Faculty of Cukurova University is a peer-reviewed scientific journal which is currently published quarterly. The journal is published to follow the developments in the field of engineering, to contribute to the national and international development of professional organizations and individuals, and to create a Turkish resource in these areas. The language of the journal is Turkish/ English. All original and up to date scientific research and applications articles that have not been published elsewhere are accepted. Theoretical/experimental and practical studies related to all engineering fields are in the scope of the Journal. Translation and compilation articles are not accepted. The journal publishes “**articles of research and practice**”.



İÇİNDEKİLER

Kenevir/Pamuk Karışımı Kumaşlar İçin Sürdürülebilir Ön Terbiye Proseslerinin Geliştirilmesi.....	755
<i>Improving of Sustainable Pretreatment Processes for Hemp/Cotton Blended Fabrics</i>	
Burcu SANCAR	
Design Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motors: An Analytical Review and Case Study.....	763
<i>Sabit Mıknatıslı Senkron Motorların Tasarım Optimizasyonu: Analitik Bir İnceleme ve Durum Çalışması</i>	
Burak ESENBOĞA, Fırat EKİNCİ	
Yarık Açılan İçi Boş Silindirin Art İzindeki Akışın Farklı Geliş Açılarında Deneysel Araştırılması.....	779
<i>Experimental Investigation of Wake Flow of a Hollow Cylinder with Slot at Various Angles of Incidence</i>	
Muhammed Murat AKSOY	
Betonarme Binaların Yapısal Düzensizliklerinin 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine Göre İncelenmesi	789
<i>Investigation of Structural Irregularities of Reinforced Concrete Buildings According to 2018 Turkish Building Earthquake Code</i>	
Cemal TOLONAY, Beytullah TEMEL	
İklim Değişikliğinin Seyhan Havzası Su Kaynakları Üzerindeki Olası Risklerinin Meteorolojik Verilere Dayalı Olarak Değerlendirilmesi	803
<i>Assessment of Possible Risks of Climate Change on Seyhan Basin Water Resources Based on Meteorological Data</i>	
Serpil SİNAN, Mesut BAŞIBÜYÜK	
Corrosion Behavior of Nickel-Titanium Alloy in Simulated Body Fluids	819
<i>Yapay Vücut Sıvılarında Nikel-Titanyum Alaşımının Korozyon Davranışının İncelenmesi</i>	
Büşra DAĞ, Güray KILINÇÇEKER	
Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları Kapsamında Türkiye'nin Karbon Emisyonu ve Ekolojik Ayak İzi Tahmini	827
<i>Forecasting of Türkiye's Carbon Emissions and Ecological Footprint Within the Framework of Sustainable Development Goals</i>	
Sakhi Mohammad HAMIDY, Ayça ZENGİNOĞLU, Hilal KARAMANCIOĞLU	
Ceyhan Havzası'nda Meteorolojik Kuraklık İndekslerinin Karşılaştırmalı Analizi ve Değerlendirilmesi.....	843
<i>Comparative Analysis and Evaluation of Meteorological Drought Indices in the Ceyhan Basin</i>	
Recep YURTAL, Shafiqullah RAHMANI	

Boru Destekli Hava Soğutmalı Sistemlerin Lityum-İyon Batarya Paketlerindeki Termal Performansının İncelenmesi	855
<i>Investigation of Thermal Performance of Pipe-Supported Air-Cooled Systems in Lithium-Ion Battery Packs</i>	
Ferhat AKKUŞ, Mehmet Zerrakki IŞIK	
Değişken Kesitli Eksenel Fonksiyonel Derecelenmiş Eliptik Kirişlerin Serbest Titreşim Analizi	867
<i>Free Vibration Analysis of Axially Functionally Graded Elliptical Beams with Variable Cross Section</i>	
Timuçin Alp ASLAN	
Current Status and Future Forecast of Global CO2 Concentration Using Statistical and Deep Learning Time Series Methods	875
<i>İstatistiksel ve Derin Öğrenme Zaman Serisi Yöntemleri Kullanılarak Küresel CO2 Yoğunluğunun Mevcut Durumu ve Gelecekteki Tahmini</i>	
Sergen TUMSE	
Effects Carbon Dioxide Curing on 3D Printed Cement Paste Incorporating Magnesium Oxide.....	889
<i>Karbondioksit Kürünün Magnezyum Oksit İçeren 3B Baskılı Çimento Hamuru Üzerindeki Etkileri</i>	
Abdullah Huzeyfe AKCA, Shiho KAWASHIMA	
Mobil Yaşam Alanlarında Karbon Ayak İzinin Azaltılması: Enerji Verimliliği ve Çift Tanklı Su Isıtıcı Modelleri	899
<i>Reducing Carbon Footprint in Mobile Living Spaces: Energy Efficiency and Double Tank Water Heater Models</i>	
Mehmet Akif KARTAL, Ahmet FEYZİOĞLU	
A Comparative Experimental Analysis of Flexural Performance of Stainless Steel and CFRP Bone Plates under Four-Point Bending.....	915
<i>Dört Noktadan Bükülme Altında Paslanmaz Çelik ve CFRP Kemik Plakalarının Eğilme Performansının Karşılaştırmalı Deneysel Analizi</i>	
Ahmet ÇETİN	
Secret Image Hiding Method Based on Multi-Cover Image with Stego Image Sequence Detection Using Perceptive Hash	927
<i>Algısal Özet Kullanarak Taşıyıcı Görüntü Sırasını Tespit Eden Çoklu Kapak Görüntü Tabanlı Görüntü Gizleme Yöntemi</i>	
Ertuğrul GÜL, Saniye BİLGİÇ	
Investigation of Tensile Strength in 3D Printed PLA+ Samples: Influence of Raster Angle and Infill Density	937
<i>3D Baskılı PLA+ Numunelerinin Çekme Dayanımının İncelenmesi: Yazdırma Açısı ve Dolgu Yoğunluğunun Etkisi</i>	
Mete Han BOZTEPE	

Dip Tarama Çamurunun (Van Gölü) Jeoteknik Özellikleri ve Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılabilirliği	949
<i>Geotechnical Properties and Usability of Dredged Sediment from the Eastern Shore of Lake Van as a Fill Material</i>	
Elif ERDEVE ÖZVAN, Ayşe ÖZGÜVEN, Mehmet TÜRKMENOĞLU, Dilara ÖZTÜRK, Ömer YEŞİLOVA, Ali ÖZVAN	
Sürdürülebilir Elektrikli Ulaşım için Stratejik Planlama: Bursa İlinde Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Yer Seçimi Analizi.....	959
<i>Strategic Planning for Sustainable Transportation: Analysis of Electric Vehicle Charging Station Location Selection in Bursa Province</i>	
Adnan ABDULVAHİTOĞLU, Aşlı ABDULVAHİTOĞLU, Ziya ARSLAN	
Direct Shear Box Assessment of Sand–Rubber Mixtures: Strength, Ductility, and a Performance Index.....	977
<i>Kum–Lastik Karışımlarının Doğrudan Kesme Kutusu ile Değerlendirilmesi: Mukavemet, Süneklik ve Performans İndeksi</i>	
Şahin Çağlar TUNA	
Kahramanmaraş Depremi’nin İnşaat Maliyetleri ve Faaliyet Hacmi Üzerine Etkileri: 2020–2024 Dönemi Karşılaştırmalı Analizi	993
<i>The Effects of the Kahramanmaraş Earthquake on Construction Costs and Activity Volume: A Comparative Analysis of the 2020–2024 Period</i>	
Özge ALBOĞA	

Kenevir/Pamuk Karışım Kumaşlar İçin Sürdürülebilir Ön Terbiye Proseslerinin Geliştirilmesi

Burcu SANCAR^{1,a}

¹Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Adıyaman, Türkiye

^aORCID: 0000-0001-5120-268X

Makale Bilgileri

Geliş : 21.01.2025

Kabul : 28.04.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1623914

Sorumlu Yazar

Burcu SANCAR

bbesen@adiyaman.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Kenevir

Enzim

Ön terbiye

Sürdürülebilirlik

Atf şekli: SANCAR, B., (2025). Kenevir/Pamuk Karışım Kumaşlar İçin Sürdürülebilir Ön Terbiye Proseslerinin Geliştirilmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(4), 755-762.

ÖZ

Son yıllarda artan çevre bilinci nedeniyle, çevre dostu elyaflara olan ilgi artmış ve bu kapsamda kenevir kullanımı önem kazanmıştır. Ancak kenevir elyafının pamuğa göre daha fazla yabancı madde içeriyor olması, klasik boyamaya hazırlık işlemlerinde daha fazla kimyasal, su ve enerji kullanım ihtiyacı doğurmakta, bu durum çevre yükü oluşturmaktadır. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için, kenevir içeren tekstil yüzeyleri için sürdürülebilir ön terbiye proseslerinin geliştirilmesi oldukça önemlidir. Mevcut çalışmada, kenevir/pamuk karışım kumaşlar için pektinaz, lakkaz ve peroksidaz enzimlerinin kullanımı ile enzimatik ön terbiye proseslerinin geliştirilmesi amaçlanmış ve bu enzimlerin kumaşların boyanabilirlikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Ayrıca pektinaz enzimi içeren flottenin tekrar kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla, flotte dökülmeden beş tekrarlı kullanımı da denenmiştir. Çalışma sonuçları pektinaz enziminin kumaşların iyi bir hidrofilite kazanmaları için yeterli olduğunu; ancak lakkaz ve peroksidaz enzimlerinin kumaşların beyaz kullanımı veya açık renk boyanması için yeterli ağartma performansı göstermediğini ortaya koymuştur.

Improving of Sustainable Pretreatment Processes for Hemp/Cotton Blended Fabrics

Article Info

Received : 21.01.2025

Accepted : 28.04.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1623914

Corresponding Author

Burcu SANCAR

bbesen@adiyaman.edu.tr

Keywords

Hemp

Enzyme

Pretreatment

Sustainability

How to cite: SANCAR, B., (2025). Improving of Sustainable Pretreatment Processes for Hemp/Cotton Blended Fabrics. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(4), 755-762.

ABSTRACT

Due to increasing environmental awareness in recent years, interest in environmentally friendly fibers has increased and the use of hemp has gained importance in this context. However, the fact that hemp fiber contains more foreign substances than cotton requires the use of more chemicals, water, and energy in the classical preparation processes for dyeing. It causes an extra environmental load. To eliminate this disadvantage, it is very important to develop sustainable pretreatment processes for textile surfaces containing hemp. In the current study, it was aimed to develop enzymatic pretreatment processes for hemp/cotton blended fabrics by using pectinase, laccase, and peroxidase enzymes, and the effects of these enzymes on the dyeability properties of the fabrics were investigated. In addition, in order to investigate the reusability of the liquor containing the pectinase enzyme, five repeated uses were tried without spilling the liquor. The results show that pectinase enzyme is sufficient for fabrics to gain good hydrophilicity, while the laccase and peroxidase enzymes do not have sufficient bleaching performance for the fabrics that will be used white or dyed in light colors.

1. GİRİŞ

Artan bilinç düzeyi ve insanlardaki ekolojik kaygıların artması sebebiyle, doğal, biyobozunur ve sürdürülebilir materyallerin önem kazanması ile birlikte, kenevir liflerinin kullanımına ilgi artmaya başlamıştır [1-3]. Kenevir bitkisi yetiştirilmesi esnasında, pamuk ve ketenden farklı olarak, yüksek su tüketimi, gübre ve tarım ilacına ihtiyaç duymadığından, sürdürülebilir ve çevre dostu olarak üretilebilmektedir [3,4]. Ayrıca kenevir lifleri yüksek mukavemet, yüksek nem çekme, nefes alabilirlik, antipilling, antibakteriyel, UV koruma, antialerjik ve iyi elektrostatik özellik göstermesi ile katma değeri yüksek ürünlerin üretiminde tercih edilmektedir [5-9].

Bir tekstil elyafının bileşiminde bulunan maddeler elyaf özelliklerine ve davranışlarına etki edeceği gibi üretim özelliklerine de etkilemektedir. Bu nedenle, elyafı oluşturan maddelerin iyi bilinmesi optimum proses şartlarının seçilebilmesi ve bu elyaftan üretilecek ürünün kullanım özelliklerinin öngörülebilmesi açısından oldukça önemlidir [10]. Çizelge 1 incelendiğinde, kenevir liflerinin selülozun yanında yüksek oranda hemiselüloz, lignin ve pektin içerdiği görülmektedir [11,12].

Çizelge 1. Kenevir ve diğer bazı selülozik liflerin kimyasal bileşimi [6]

Elyaf	% Selüloz	% Hemiselüloz	% Lignin	% Pektin
Pamuk	92	6	-	<1
Jüt	72	13	13	-
Keten	81	14	3	4
Sisal	73	13	11	2
Kenevir	74	18	4	1
Rami	76	15	1	2
Kapok	13	-	-	-

Çizelge 1’den de görüldüğü gibi kenevir liflerinin yabancı madde içeriği pamuğa göre daha yüksektir ve bu safsızlıkların uzaklaştırılması için kenevir lifleri pamuğa göre daha ağır şartlarda ön terbiye işlemlerine ihtiyaç duymaktadır. Bu durum da kenevir/pamuk karışım tekstil materyallerinin, %100 pamuk içeren tekstil materyallerine nazaran, konvansiyonel ön terbiye proseslerinde daha yüksek kimyasal madde kullanımına ihtiyaç olduğunu ortaya koymaktadır. Gedik, %100 kenevir lifinden üretilmiş dokuma kumaşların optimum ağartma koşullarını belirleyebilmek amacıyla yaptığı yüksek lisans tezinde, kenevir kumaş numunelerine çeşitli yükseltgen (hidrojen peroksit, perasetik asit, potasyum permanganat, sodyum perborat, sodyum perkarbonat) ve indirgen (thioüre dioksit, sodyum borohidrit, glikoz) maddelerle ön terbiye işlemleri uygulamış ve en yüksek beyazlığın elde edilebildiği hidrojen peroksit ağartmasının 20 g/L H₂O₂ (1,5 g/L NaOH, 3mL/L stabilizatör, 1mL/L ısıtıcı) kullanımı ve 95 °C’de 90 dakika çalışma gerektirdiğini tespit etmiştir [10]. Aynı beyazlık değerlerini %100 pamuklu kumaşlarda elde etmek için 3 g/L H₂O₂ kullanarak 90 °C’de 60 dakika çalışmanın yeterli olduğu göz önünde bulundurulduğunda; kenevir içerikli kumaşların konvansiyonel ön terbiye proseslerinin daha fazla enerji, zaman ve kimyasal sarfıyatı, dolayısıyla çevre yükü oluşturacağı net bir şekilde görülmektedir [13]. Bu nedenle, kenevir liflerinin sürdürülebilir üretiminin tekstil ürünlerine dönüşüm sürecinde uygulanan terbiye proseslerinde de devam ettirilebilmesi için, ön terbiye işlemlerinde klasik yöntemler yerine, çevre dostu alternatif üretim süreçlerinin uygulanması gerekliliği ortaya çıkmaktadır [14].

Tekstil terbiyesinde, çevre yükünü azaltmak ve çevreyle uyumlu bir üretim gerçekleştirebilmek için, terbiye işlemlerinde doğayla daha dost, daha uyumlu maddeler ve teknolojiler tercih edilmesi gerekliliği nedeniyle, ön terbiye işlemlerinde enzimlerin kullanımı sürekli araştırılan konular arasındadır [15]. Doğal protein olan enzimler, kimyasal bir reaksiyonu katalizledikten sonra serbest kalarak, bir sonraki reaksiyonu da katalizleyebildiğinden, işlem için çok az miktarda yeterli olabilmektedir. Ayrıca enzimler, çok kolay ve hızlı bir şekilde biyolojik olarak parçalanabildiklerinden atık su yükü oluşturmamaktadırlar [16,17].

Literatür incelendiğinde, kenevirden üretilen tekstil materyallerinin ön terbiyesinde enzimlerin ve ozon gazının ve kenevir elyafın havuzlanması sırasında ozon gazının kullanıldığı bazı çalışmaların mevcut olduğu görülmektedir. Bu çalışmalardan mevcut çalışma ile en yakın olanlar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Pritima ve Ritu (2016) yaptığı çalışmada, enzimatik ağartmanın kenevir kumaşların fiziksel özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla, çeşitli kimyasallar ile lakkaz enzimini birlikte kullanarak prosesler

(Lakkaz + H₂O₂, Lakkaz + NaOCl, Lakkaz + NaOH, H₂O₂+ Lakkaz, NaOCl + Lakkaz, and NaOH + Lakkaz) uygulamıştır. Sonuçta en iyi beyazlığın lakkaz + NaOCl işlemi ile elde edildiği ve enzim uygulamasının kumaşların fiziksel özellikleri üzerinde olumlu etkileri olduğu belirlenmiştir [18].

Fang ve arkadaşları yaptığı çalışmada, kenevir elyafı pektinaz ve ardından NaOH ile ön işleme tabi tutarak, elyaf numunelerinin yüzey morfolojisi, kimyasal bileşimi ve kopma mukavemet özelliklerini araştırmıştır. Sonuçta, pektinaz işlemi sonrası az miktarda NaOH uygulaması ile konvansiyonel NaOH uygulamasına göre daha kaliteli liflerin elde edilebildiği belirlenmiştir [19].

Merdan, %100 kenevir elyafı farklı lakkaz enzimi konsantrasyonları kullanarak, farklı sürelerde işleme tabi tutmuştur. Çalışmada konvansiyonel, ultrasonik enerji ve mikrodalga enerjisi metotları karşılaştırmalı olarak kullanılmış ve çalışma sonucunda çevre dostu mikrodalga teknolojisinin elyafların mukavemet, ağırlık kaybı ve uzama özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, ultrasonik enerji metodu beyazlık değerini arttırmış; ancak enerji tüketimini de arttırmıştır [20].

Guo ve arkadaşları yaptığı çalışmada, kenevir organik pamuk karışımı kumaşlarda selüloz ve pektinaz enzimi kullanarak enzimatik yıkama işlemi yapmış ve ardından kumaş numunelerini reaktif boyarmadde ile boyamıştır. Sonuçta, daha yumuşak tutumlu, düzgün yüzeyli ve daha koyu renkli kumaş numuneleri elde edilmiştir [21].

Yılmaz Şahinbaşkan yaptığı çalışmada, %100 kenevir dokuma kumaşa NaOH, H₂O₂ ve üç farklı enzim (amilaz, pektinaz ve lakkaz) kullanarak, kombine prosesler ile üç farklı yöntemle göre ön terbiye uygulaması ve kumaş performans özelliklerini karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, sadece enzimler ile yapılan ön terbiye proseslerinin kumaş renklendirme işlemleri için yeterli olmadığını ve proseslerin geliştirilmesi gerektiğini göstermiştir [2].

Karakaya yaptığı yüksek lisans tezinde, %100 kenevir lifini ozon gazı ile ön terbiye işlemine tabi tutmuş ve lifleri daha sonra doğal boyarmaddeler kullanarak renklendirmiştir. Sonuçlar, ozonlama ile konvansiyonel ağartma yöntemine yakın beyazlık sonuçları elde edildiğini; ancak elde edilen hidrofiliteğin düşük olduğunu göstermiştir [22].

Gedik ve arkadaşları, kenevirin havuzlanması sırasında havuzlama banyosunu farklı ozon konsantrasyonu ve ozonlama süresinde işleme tabi tutarak, banyodaki mikroorganizmaları ve diğer organik bileşikler yok etmeyi ve aynı zamanda kenevir elyafı beyazlatmayı amaçlamıştır. Sonuçlar, elyafın koyu renkli boyamalar için uygun bir beyazlık değerine ulaştığını, havuzlama banyosundaki safsızlıkların uzaklaştığını ve elyaftaki selüloz miktarının ve kristalin indeksinin arttığını ortaya koymuştur [23].

Yukarıda özetlenen çalışmalardan görüldüğü gibi, kenevir içeren kumaşların ön terbiyesinde pektinaz ve lakkaz enzimlerinin kullanıldığı mevcut çalışma ile benzer bazı çalışmaların olduğu görülmektedir. Ancak yapılan çalışmalar detaylı şekilde incelendiğinde, lakkaz enzimin tek başına kullanımının iyi bir beyazlık değerinin elde edilebilmesi için yeterli olmadığı ve lakkaz enzimine alternatif enzimlerin de araştırılması gerektiği görülmektedir. Bu amaçla mevcut çalışmada, lakkaz enziminin yanında, denim kumaşların ağartılma proseslerinde kullanılan peroksidaz enzimin kenevir kumaşların ağartılmasında kullanım olanakları da araştırılmıştır. Ayrıca çalışmada, enzimatik banyoların dökülmeden yeniden kullanılabilirliği üzerinde de durulmuştur. Özetlemek gerekirse, mevcut çalışmada kenevir/pamuk karışımı kumaşların pektinaz enzimi ile hidrofilleştirilme ve ardından lakkaz, peroksidaz ve lakkaz/peroksidaz enzimleri ile ağartılma olanakları araştırılmıştır. Çalışma sonrası kumaşların hidrofiliteği damlama ve batma testleri, ağartma performansları beyazlık ölçümü ve CIEL*a*b* renk değerleri ölçümleri vasıtasıyla, konvansiyonel hidrojenperoksit ağartması ile kıyaslanarak incelenmiştir. Ayrıca enzimatik işlem çözeltilerinin tekrar kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla, pektinaz enzimi içeren flotte işlem sonrası dökülmeden beş tekrarlı olarak kullanılmış ve her bir işlem sonrası kumaş numunelerinin hidrofilite değerleri de araştırılmıştır.

2. YÖNTEM

2.1. Materyal

Çalışmada, hidrojenperoksit (%50 lik H₂O₂ aktif O₂ miktarı: %23.5), sodyumhidroksit (NaOH), ıslatıcı, stabilizatör, soda ve Alfa Kimya'dan temin edilen pektinaz (Novozymes BioPrep® 3000 L), lakkaz

(Novozymes Novoprime® Base 268) ve peroksidaz (Novozymes Novozym® 59127) enzimleri kullanılmıştır.

Çalışmalarda, MEM tekstil (Kahramanmaraş) firmasından temin edilen %30 kenevir, % 70 pamuk lifi karışımı (Ne 20/1 ring iplik) ham düz örme (süprem) kumaş (32''/22 fein) kullanılmıştır.

2.2. Metot

Kumaşlar hazırlanıp kumaşlara sırasıyla enzimatik hidrofilleştirme (biyohidrofilleştirme) ve enzimatik ağartma işlemleri uygulanmıştır. Sonuçları karşılaştırmak amacıyla, referans hidrofilit ve beyazlık değerleri elde etmek için ham kumaşa konvansiyonel hidrojenperoksit ağartması da yapılmıştır. Kumaşlara uygulanan prosesler Çizelge 2'de verilmiştir.

Biyohidrofilleştirme: Kenevirli kumaşların hidrofilleştirme işlemleri pektinaz enzimi kullanılarak yapılmıştır. Biyohidrofilleştirme işlemleri, 1/20 flotte oranında, 1g/L pektinaz ve 1g/L ıslatıcı kullanılarak (pH 8-8,5 soda ile) 50 °C'de 60 dk süreyle IR boyama makinesinde uygulanmıştır. İşlem sonunda kumaş numuneleri 10 dk kaynar yıkama ve ardından soğuk durulama yapılarak, oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Ayrıca pektinaz enziminin tekrar kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla, kumaş numunelerinin biyohidrofilleştirme işlemi sonrası, aynı flotte dört defa daha kullanılarak (herhangi bir ilave yapılmaksızın) kumaşlara hidrofilleştirme işlemi uygulanmıştır. Her işlem biyohidrofilleştirme işlem şartlarını ve onu takip eden kumaş yıkama ve kurutma işlemlerini takip ederek gerçekleştirilmiş ve kumaş numuneleri hidrofilit testleri için ayrılmıştır.

Enzimatik Ağartma: Kumaş numunelerine enzimatik ağartma işlemleri lakkaz ve peroksidaz enzimleri kullanılarak uygulanmıştır. Bu amaçla, lakkaz, peroksidaz ve lakkaz/peroksidaz enzimin birlikte kullanımı ile ağartma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Lakkaz ve peroksidaz enzimlerinin ayrı ayrı kullanıldığı ağartmalar, 2 g/L enzim kullanılarak 1/20 flotte oranında (pH 5 - 5.5) 40 °C'de 60 dk süreyle IR boyama makinesinde yapılmıştır. Lakkaz ve peroksidaz enziminin birlikte kullanımıyla yapılan enzimatik ağartma işlemleri 1g/L lakkaz ve 1g/L peroksidaz kullanılarak 1/20 flotte oranında (pH 5 - 5.5) 40 °C'de 60 dk süreyle IR boyama makinesinde yapılmıştır. İşlem sonunda kumaş numuneleri 10 dk kaynar yıkama ve ardından soğuk durulama yapılarak, oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır.

Konvansiyonel ağartma: Sonuçları karşılaştırmak amacıyla ham kumaş, 10g/L H₂O₂, 1.5 g/L NaOH, 3g/L stabilizatör, 1 ml/L ıslatıcı kullanılarak 98 °C'de 60 dk süreyle IR boyama makinesinde referans konvansiyonel ağartma (tek adımda hidrofilleştirme ve ağartma) işlemine tabi tutulmuştur. İşlem sonunda kumaş numunelerine 0.2 g/L katalaz (pH 6-6.5 soda ile) kullanılarak 50 °C'de 10 dk işlem uygulanmış ve ardından oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır.

Çizelge 2. Kumaşlara uygulanan prosesler

Proses	Uygulama reçetesi	Sıcaklık (°C)	Süre (dk)	Ard işlem
Konvansiyonel ağartma (Referans işlem)	10 g/L H ₂ O ₂ (%50) 1.5 g/L NaOH 3 g/L stabilizatör 1 ml/L ıslatıcı	98	60	0.2 g/L katalaz (pH 6-6.5)
Biyohidrofilleştirme	1 g/L pektinaz 1 g/L ıslatıcı (pH 8-8.5)	50	60	
Enzimatik ağartma 1	2 g/L lakkaz (pH 5-5.5)			
Enzimatik ağartma 2	2 g/L peroksidaz (pH 5-5.5)	40	60	10 dk kaynar yıkama
Enzimatik ağartma 3	1 g/L lakkaz+1g/L peroksidaz (pH 5-5.5)			Soğuk durulama

2.3. Test Metotları

Hidrofilite testi: Kumaş numunelerinin biyohidrofilileştirme işlemi sonrası hidrofilite değerlerini belirleyebilmek amacıyla, kumaş numunelerine damlama ve batma testleri uygulanmıştır. Ayrıca pektinaz enzimin tekrar kullanımını araştırmak amacıyla yapılan tekrarlı flotte kullanımı sonrası da kumaş numunelerinin hidrofilite değerleri ölçülmüştür. Damlama testi, AATCC 79 standardına göre, kumaşa pastör pipet yardımıyla su damlatılması vasıtasıyla, damlanın kumaş tarafından emilim süresi ve yayılma çapının ölçülmesiyle belirlenmiştir [24]. Batma testi, AATCC 79 B standardına göre, 5cm X 5cm kumaş numunesinin 500 ml lik su dolu behere bırakılması ve kumaşın yüzeyden ayrıldığı sürenin ölçülmesiyle gerçekleştirilmiştir [25]. Damlama ve batma testleri beşer tekrarlı yapılarak ortalama değerler alınmıştır.

Beyazlık ve CIEL*a*b* renk değerleri ölçümü: Kumaş numunelerinin beyazlık ölçümleri ve CIEL*a*b* renk değerleri, Minolta marka 3600A model spektrofotometre ile ölçülmüştür. Kumaşların beyazlık değerleri Berger formülüne göre ölçülmüştür. Ölçümler, D65 gün ışığında ve 10° gözlemci açısı kullanılarak yapılmıştır [26]. Her ölçüm üç kez tekrarlanmış olup, sonuçların ortalaması alınmıştır.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Ham ve referans (H₂O₂ ile ağartılmış) kumaş numunelerine uygulanan damlama ve batma testi sonuçları Çizelge 3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3. Kumaş numunelerinin hidrofilite sonuçları

Numune	Batma testi	Damlama testi	
	Süre (s)	Süre (s)	Çap (mm)
Ham kumaş	Batma olmadı	-	-
Referans kumaş	3.24	3.94	11.16
Pektinaz enzimi içeren flottenin ilk kullanımı sonrası	2.77	4.35	16.33
Pektinaz enzimi içeren flottenin 2. kullanımı sonrası	10.14	9.36	11.33
Pektinaz enzimi içeren flottenin 3. kullanımı sonrası	15.27	9.58	10.25
Pektinaz enzimi içeren flottenin 4. kullanımı sonrası	31.39	12.84	10.08
Pektinaz enzimi içeren flottenin 5. kullanımı sonrası	36.94	14.57	8.33

Çizelge 3'te kumaş numunelerinin batma ve damlama testi ile elde edilmiş hidrofilite sonuçları verilmiştir. Batma testinde batma süresinin kısılması, damlama testinde damla yayılım süresinin kısılması ve damla çapının artması hidrofilite değerlerinin iyileştiğini göstermektedir. Çizelgede verilen hidrofilite sonuçları, pektinaz enzimi ile işlem gören kumaş numunelerinin batma süresinin referans kumaştan daha düşük olduğunu ve damla çapının ise referans kumaştan daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durum, pektinaz enzimi uygulaması ile kumaşların hidrofilite değerlerinin konvansiyonel H₂O₂ ağartması sonrası elde edilen referans değerlerden yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Pektinaz enzimi ile işlem gören kumaşların damlama testi sonrası damlayı biraz daha geç şekilde emdiği, ancak emdikten sonra daha fazla yayılım gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum, kumaşın pektinaz enzimi ile işlem sonrası yapısından uzaklaşan pektinin kumaşın hidrofilitesini yeterli seviyede arttırdığını göstermektedir. Ancak damla emilim süresinin biraz daha yüksek oluşunu, pektinaz enzimi ile yapılan işlem sırasında kumaştan uzaklaşmayan yağ ve mumların kumaşa ilk su damlası temas ettiğinde, kumaş yüzeyinde bir bariyer oluşturduğu ve yüzeyden su emilimini bir miktar geciktirdiği şeklinde açıklamak mümkündür. Elde edilen hidrofilite sonuçları literatürde bulunan çalışma sonuçları ile örtüşmektedir. Yılmaz Şahinbaşkan [2] %100 kenevir içeren dokuma kumaşlarda pektinaz enzimi kullanımıyla yaptığı biyohidrofilileştirme işleminde konvansiyonel hidrofilileştirme işlemine göre daha iyi hidrofilite sonuçları elde etmiştir. Söz konusu çalışmada en iyi hidrofilite sonuçları konvansiyonel hidrofilileştirme ardından H₂O₂ ağartması sonrası elde edilmiş olmasına rağmen, günümüzde konvansiyonel hidrofilileştirme ve ağartma işlemleri tek banyoda yapıldığından mevcut çalışmada elde edilen sonuçların daha güncel olduğunu söylemek mümkündür. Benzer sonuçlar Sancar ve arkadaşlarının [17] %100 pamuklu dokuma kumaşlar üzerine yaptığı çalışma sonuçları ile de bu noktada benzerlik göstermektedir. Bu durum, kenevir/pamuk karışımı kumaşlarda iyi bir hidrofilite sağlamak için çevre dostu pektinaz enzimi kullanımının tek başına yeterli olduğunu ortaya koymaktadır. Pektinaz enzimi içeren flottenin tekrar kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla yapılan tekrarlı

biyohidrofilleştirme işlemleri sonrası elde edilen kumaş hidrofilite sonuçları incelendiğinde, flottenin her bir kullanımı sonrası kumaş numunelerinin hidrofilite değerlerinin kötüye gittiği görülmektedir. Bu sonuçlar, pektinaz enzimi içeren flottenin herhangi bir ilave yapılmaksızın tekrar kullanılma özelliğinin olmadığını ortaya koymuştur. Bu durumun, her bir işlem sonrası kirlenen flotte nedeniyle enzim aktivitesinin düşmesi ile ilgili olabileceği düşünülmektedir. Enzim aktivitesinin ölçülmesi ile gerekli enzim ilavesinin ve pH ayarlamasının yapılması vasıtasıyla flottenin yeniden kullanılma durumunun araştırılması gerekmektedir.

Enzimatik ve referans H_2O_2 ağartması sonrası elde edilen kumaş numunelerinin beyazlık ve CIEL a^*b^* renk değerleri Çizelge 4'te görülmektedir.

Çizelge 4. Kumaş numunelerinin beyazlık ve CIEL a^*b^* renk değerleri

Kumaş numunesi	Beyazlık (Berger)	L^*	a^*	b^*	C^*	h^0
Ham kumaş	13.30	71.36	1.52	9.27	9.40	80.68
Referans kumaş	50.16	92.10	-0.21	6.68	6.68	91.82
Pektinaz ile işlem gören	19.75	71.55	1.49	7.06	7.21	78.11
Lakkaz ile işlem gören	21.01	71.21	1.09	6.68	6.77	80.70
Peroksidaz ile işlem gören	21.37	71.76	1.08	6.75	6.83	80.91
Lakkaz+peroksidaz ile işlem gören	21.30	71.75	1.12	6.75	6.84	80.55

CIEL a^*b^* renk uzayında; L^* değeri bir rengin açıklık-koyuluğu, a^* değeri kırmızılık- yeşilliği ve b^* değeri sarılık-maviliği hakkında bilgi vermektedir. L^* değeri 0 ile 100 arasında değişiklik göstermekte ve değer arttıkça renk açılmaktadır. a^* ve b^* değerlerinin yükselmesi ise rengin kırmızılık ve sarılık değerlerinin artması anlamlarına gelmektedir. C^* değeri bir rengin doygunluğunu, h^0 değeri de açısını göstermektedir. Normal şartlarda CIEL a^*b^* renk değerleri boyanmış kumaşların renk değerlerinin belirlenmesi için kullanılmaktadır. Bu çalışmada, kenevir içeren kumaşların kenevirin koyu kahverenginden kaynaklı kumaşa melanaj bir renk vermesinden dolayı, kumaşların enzimatik ağartma sonrası beyazlık performanslarını araştırmak amacıyla beyazlık değeri yanında renk değerleri de ölçülmüştür. Çizelge 4'te verilen beyazlık değerleri incelendiğinde referans kumaşın beyazlık değerinin 50 Berger, enzimatik ağartma sonrası elde edilen en iyi değer ise 21.37 Berger olduğu görülmektedir. Bu değer, enzimatik ağartma sonrası ham kumaşa (13.30 Berger) göre beyazlık değerinin arttığını; ancak enzimatik ağartma sonrası beyaz kullanılacak ve açık renk boyanacak kumaşlar için yeterli beyazlık değerine ulaşamadığını göstermektedir. Bu sonuçlar da literatürde lakkaz enzimi uygulamasıyla beyazlık iyileştirmesi üzerine odaklanan çalışma sonuçları ile örtüşmektedir [2,17,18,20]. Merdan [20] kenevir elyafı lakkaz enzimi ile ağartmak amacıyla ultrasonik enerji ve mikrodalga enerjisi teknolojilerini kullanarak daha iyi beyazlık değerlerine ulaşabilmiştir. Bu durum, enzimlerin özellikle ultrasonik enerji varlığında kullanılması ile daha iyi beyazlık değerlerine ulaşmanın mümkün olduğunu göstermektedir. Kumaşların CIEL a^*b^* renk değerleri incelendiğinde, enzimatik ağartma sonrası kumaşların sarılık değerinin referans kumaşa yaklaştığı, kırmızılık değerlerinin ise yüksek kaldığı görülmektedir. Ayrıca enzimatik ağartmada en iyi sonucun peroksidaz ağartması ile elde edildiğini ve peroksidaz enzimi konsantrasyonu, işlem süresi, işlem sıcaklığı gibi çalışma parametrelerinin değiştirilmesi ile daha iyi beyazlık değerlerine ulaşılmasının mümkün olabilecektir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, ülkemizde son yıllarda önemi artan kenevir lifi karışımı kumaşların enzimlerin kullanımı ile ekolojik olarak ön terbiye işlemlerini yapmak amaçlanmıştır. Bu mihvalde, %30 kenevir / %70 pamuk karışımı kumaşlara sadece enzim kullanımı ile hidrofilite ve beyazlık kazandırmak amaçlanmıştır. Bu amaçla kumaş numuneleri ilk olarak pektinaz enzimi ile daha sonra lakkaz, peroksidaz ve lakkaz ile peroksidaz enzimin birlikte kullanımı ile işleme tabi tutulmuştur. Yapılan işlemler sonrası kumaş numunelerinin ön terbiye performansları hidrofilite (damlama ve batma testleri ile), beyazlık ve CIEL a^*b^* renk ölçümü testleri ile incelenmiştir. Ayrıca enzimatik banyoların tekrar kullanılabilirliklerinin araştırılması amacıyla, pektinaz enzimi içeren flotte beş tekrarlı olacak şekilde kullanılmış ve her bir kullanım sonrası elde edilen kumaş numunelerinin hidrofiliteleri de ölçülmüştür. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Kumaşların pektinaz enzimi sonrası hidrofilite önemli ölçüde gelişmiş ve sadece pektinaz enzimi kullanımı ile referans kumaş numunesinden bile daha iyi hidrofilite sonuçları elde edilebilmiştir.
- Pektinaz enzimi içeren flottenin tekrar kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla yapılan tekrarlı biyohidrofilleştirme işlemleri flottenin her bir kullanımı sonrası kumaş numunelerinin hidrofilite değerlerinin kötüye gittiğini göstermiş ve pektinaz enzimi içeren flottenin tekrar kullanıma özelliğinin olmadığını ortaya konulmuştur. Enzimatik işlem flottelerinin enzim konsantrasyonu, pH gibi ölçümleri sonrası gerekli ilaveler yapılarak yeniden kullanımının araştırılması önerilmektedir.
- Enzimatik ağartma işlemi, kenevirli kumaşların beyazlık değerlerinde artış sağlamış, ancak referans kumaşın beyazlık seviyesine ulaşamamıştır. En iyi beyazlık değeri, peroksidaz enzimi kullanılarak yapılan ağartma işleminde elde edilmiştir. Sadece peroksidaz enzimi kullanılarak ham kumaşa kıyasla belirgin bir beyazlık iyileşmesi sağlanmakla birlikte, elde edilen beyazlık değeri açık renk boyama ve beyaz kullanım için yetersiz kalmıştır. İyileştirme için enzim konsantrasyonu, çalışma sıcaklığı ve süresinin artırılması, enzimatik işlem sırasında ultrasonik enerji/mikrodalga enerjisi kullanımının araştırılması veya enzim+ozon kombinasyonlarının denenmesi önerilmektedir.

Sonuç olarak, enzimatik ön terbiye işlemleri, kenevirli kumaşlarda beyazlatma ve renk iyileştirme açısından olumlu sonuçlar sunmuş, ancak beyazlatma için bazı parametrelerin optimize edilmesi gerektiği belirlenmiştir. Enzimatik işlemler, çevre dostu olmaları ve kimyasal kullanımını azaltmaları açısından sürdürülebilir tekstil üretimine önemli katkılar sağlamaktadır. Kenevir gibi doğal ve sürdürülebilir bir elyafın sadece enzimlerin kullanımı ile ön terbiyesinin yapılması hem çevresel etkileri azaltma hem de tekstil sektöründe yenilikçi yaklaşımların önünü açma potansiyeline sahiptir.

5. KAYNAKLAR

1. Özdemir, S. ve Tekoğlu, O. (2013). Ekolojik tekstil ürünlerinde kullanılan hammaddeler. *Akdeniz Sanat Dergisi*, 4(8), 27-30.
2. Yılmaz Sahinbaşkan, B. (2019). Kenevir dokuma kumaşa enzimatik ön işlemlerin etkisi. *Int. J. Adv. Eng. Pure Sci.*, 3, 208-213
3. Dinçer Şahan, Ö., Korkmaz, N. & Karadağ, A. (2024). Alkali pretreatment and analysis of biomass content of narlısaray population and vezir type cannabis plant. *International Journal of Chemistry and Technology*, 8(1), 83-89.
4. Zhu, R., Yu, Y., Yang, W., Zhao, J., Shi, G. & Liu, J. (2021). Novel scouring method of hemp fibers based on electrochemical techniques. *Textile Research Journal*, 91(19-20), 2215-2224.
5. Atav, R., Diden, D.B., Keskin, S. & Ürgünay, U. (2024). Investigation of the dyeability and various performance properties of fabrics produced from flax and hemp fibres and their blends with cotton in comparison with cotton, *Coloration Technology*, 140, 440-450.
6. Kaya, S. ve Öner, E. (2020). Kenevir liflerinin eldesi, karakteristik özellikleri ve tekstil endüstrisindeki uygulamaları. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(1), 108-123.
7. Palabıyık, İ., Körlü, A. ve Özçelik, G. (2024). Kenevir içeren denim giysilerin terbiyesinde çevre dostu bir yöntem: Ozon ile yıkama. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(4), 881-895.
8. Zhang, L., Guo, F., Zuo, D.Y., Liao, S., Wang, Q., Liu, L., Ma, D., Liu, H., Yi, H. & Yi, C. (2022). Effect of ozone washing on the antibacterial property of hemp yarn. *The Journal of the Textile Institute*, 113(12), 2569-2574.
9. Palanikumar, K., Natarajan, E., Markandan, K., Ang, C.K. & Franz, G. (2023). Targeted pre-treatment of hemp fibers and the effect on mechanical properties of polymer composites. *Fibers*, 11, 43.
10. Gedik, G. (2012). Kenevir liflerinden üretilen kumaşların optimum ağartma koşullarının ve yöntemlerinin belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 82.
11. Liu, L., Xiang, Y., Zhang, R., Li, B., Yu, J. & Fang, B. (2017). TEMPO-media oxidation combined with laccase for effective degumming pretreatment of hemp fibers. *Bioresources*, 12(4), 8848-8861.
12. Väisänen, T., Batello, P., Lappalainen, R. & Tomppo, L. (2018). Modification of hemp fibers (*Cannabis Sativa* L.) for composite applications. *Industrial Crops and Products*, 111, 422-429.

13. Eren, H.A., Anış, P., Yılmaz, D., Kirişçi, Ş. ve İnkaya, T. (2009). Pamuğun ağartılmasında lakkaz, ozon ve hidrojen peroksitin kombine kullanımı. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 4, 299-303.
14. Gedik, G. ve Avinç, O. (2018). Bleaching of hemp (*Cannabis sativa* L.) fibers with peracetic acid for textiles industry purposes. *Fibers and Polymers*, 19, 82-93.
15. Liu, S.Q., Chen, Z.Y., Sun, J.P. & Long, J.J. (2016). Ecofriendly pretreatment of grey cotton fabric with enzymes in supercritical carbon dioxide fluid. *Journal of Cleaner Production*, 120, 85-94.
16. Kan, C.W., Yuen, C.W.M. & Lam, Y.L. (2009). Effect of enzyme treatment and dyeing on the mechanical properties of linen, society of dyers and colourists. *Coloration Technology*, 125, 269-276.
17. Sancar, B., Paksoy, N., Balcı, O. ve Kurtoğlu, N. (2012). Pamuklu dokuma kumaşların boyamaya hazırlık işlemlerinde enzim kullanım olanaklarının incelenmesi ve kombine proses geliştirilmesi. *Tekstil ve Mühendis*, 19(86), 7-13.
18. Pratima, N. & Ritu, M. (2016). Effect of enzymatic bleaching on physical properties of hemp fabric. *SRJIS*, 4(27), 3169-3176.
19. Fang, G., Chen, H., Chen, A., Mao, K. & Wang, Q. (2017). An Efficient Method of Bio-Chemical Combined Treatment for Obtaining High-Quality Hemp Fiber, *Bioresources*, 12(1), 1566-1578
20. Merdan, N. (2017). Effects of environmental surface modification methods on physical properties of hemp fibers. *Materials Science*, 23(4), 416-421.
21. Guo, Y., Sun, Z., Guo, X., Zhou, Y., Jiang, L., Chen, S. & Ma, J. (2019). Study on enzyme washing process of hemp organic cotton blended fabric. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 31(1), 58-64.
22. Karakaya, E. (2021). Kenevir liflerinin ekolojik ön terbiyesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 83.
23. Gedik, G., Aydın Kızılkaya, Y.M., Uyak, V. & Koluman, A. (2023). Simultaneous eco-friendly bleaching and retting wastewater treatment of hemp fiber with ozone application, *Fibers and Polymers*, 24(1), 57-72.
24. Sancar Beşen, B. & Balcı, O. (2017). Investigation of the effects of silicone emulsions having different particle sizes on knitted fabrics depending on the type of yarn. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 29(3), 394-416.
25. Cengiz, Ö.F., Erkale, İ., Özkayalar, S., Alay Aksoy, S., Boyacı, B. & Kaplan, S. (2019). Investigation of transfer and functional properties of the microcapsule applied fabrics. *Journal of Textiles and Engineer*, 26(115), 243-251.
26. Koruyucu, A. (2025). Production of organo-modified and amino-functional silicone finishing chemicals and their effects on the handle and color values of cotton knited fabrics. *Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 40(1), 193-204.

Design Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motors: An Analytical Review and Case Study

Burak ESENBOĞA^{1,a}, Fırat EKİNCİ^{2,b}

¹Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Engineering Faculty, Department of Electrical and Electronics Engineering, Adana, Türkiye

²Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Engineering Faculty, Department of Energy Systems Engineering, Adana, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-7777-259X; ^bORCID: 0000-0002-4888-7881

Article Info

Received : 18.04.2025

Accepted : 27.05.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1679067

Corresponding Author

Burak ESENBOĞA

besenboga@atu.edu.tr

Keywords

Permanent magnet synchronous motor

Electromagnetic analysis

Parametric optimization

Cogging torque

Desing optimization

How to cite: ESENBOĞA, B., EKİNCİ, F., (2025). Design Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motors: An Analytical Review and Case Study. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(4), 763-777.

ABSTRACT

Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSMs) are widely used in industrial and electric vehicle applications for their high efficiency, compact size, and precise controllability. However, cogging torque remains a key issue, causing vibration, noise, and performance loss, especially at variable speeds. This study presents a Finite Element Analysis (FEA)-based parametric optimization approach to improve the magnetic and structural performance of a 20-kW, 138-V, 6-pole PMSM. Instead of heuristic algorithms, the method refines key geometric parameters such as magnet thickness, pole embrace, and pole offset that strongly affect flux distribution, torque, and vibration. Using ANSYS Maxwell, simulations analyze their effects on efficiency, air-gap flux density, and cogging torque. Results indicate a decrease in cogging torque from 7.56 Nm to 4.74 Nm and an approximate 15% enhancement in efficiency, leading to improved torque smoothness and more uniform magnetic flux distribution. The study highlights the importance of precise geometric optimization for higher performance and lower noise.

Sabit Mıknatıslı Senkron Motorların Tasarım Optimizasyonu: Analitik Bir İnceleme ve Durum Çalışması

Makale Bilgileri

Geliş : 18.04.2025

Kabul : 27.05.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1679067

Sorumlu Yazar

Burak ESENBOĞA

besenboga@atu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Sabit mıknatıslı senkron motor

Elektromanyetik analiz

Parametrik optimizasyon

Dişli torku

Tasarım optimizasyonu

Atf şekli: ESENBOĞA, B., EKİNCİ, F., (2025). Sabit Mıknatıslı Senkron Motorların Tasarım Optimizasyonu: Analitik Bir İnceleme ve Durum Çalışması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(4), 763-777.

ÖZ

Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlar (SMSMler), yüksek verimlilikleri, kompakt boyutları ve hassas kontrol edilebilirlikleri nedeniyle endüstriyel ve elektrikli araç uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, vuru torku, özellikle değişken hızlarda titreşim, gürültü ve performans kaybına neden olan önemli bir sorun olmaya devam etmektedir. Bu çalışma, 20 kW, 138 V, 6 kutuplu bir SMSM'nin manyetik ve yapısal performansını iyileştirmek için Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) tabanlı bir parametrik optimizasyon yaklaşımı sunmaktadır. Sezgisel algoritmalar yerine, yöntem akı dağılımını, torku ve titreşimi güçlü bir şekilde etkileyen mıknatıs kalınlığı, kutup kucaklaması ve kutup ofseti gibi temel geometrik parametreleri iyileştirir. ANSYS Maxwell kullanılarak yapılan simülasyonlar, verimlilik, hava boşluğu akı yoğunluğu ve vuru torku üzerindeki etkilerini analiz eder. Sonuçlar, vuru torkunda 7.56 Nm'den 4.74 Nm'ye bir düşüş ve verimlilikte yaklaşık %15'lik bir artış olduğunu, bunun da iyileştirilmiş tork düzgünlüğüne ve daha düzgün manyetik akı dağılımına yol açtığını göstermektedir. Çalışma, daha yüksek performans ve daha düşük gürültü için hassas geometrik optimizasyonun önemini vurgulamaktadır.

1. INTRODUCTION

PMSMs are commonly used in many areas such as automotive, aerospace, robotics, and industrial applications due to their high efficiency, fast torque responsiveness, and advantages of compact design [1-3]. PMSMs offer higher energy efficiencies and a wider torque-speed band than induction motors, making them especially prominent in low- and high-speed applications [1]. The design of PMSMs, however, is quite complicated and optimization techniques are required to achieve the most suitable motor parameters for the given operating conditions [2,4]. The main aim of the optimization process is to fine-tune motor parameters to strike a balance between various performance metrics, including minimizing torque ripple, managing thermal conditions, and ensuring cost-effectiveness. For this reason, optimization is necessary to increase the energy efficiency and power density of the motor, especially in high-performance applications such as electric vehicles and aviation.

Jeong et al. focused on the optimized design of PMSMs with hybrid-type permanent magnets, which not only improved performance but also enhanced reliability [4]. Lee et al. succeeded in enhancing the magnetic performance of the motor by using modified particle swarm optimization (PSO) and mesh adaptive direct search (MADS) methods in PMSM design [5]. Candelo-Zuluaga et al. emphasized the importance of optimization in PMSM design to reach the target torque-speed-efficiency map and demonstrated how this process improved the overall performance of the motor [6]. Dang et al. conducted a design optimization study on a nonsalient high-speed PMSM tailored for electric vehicle applications. Initially, they developed a one-dimensional analytical model, which was subsequently validated for the most critical point of the driving cycle using finite element analysis. The paper details the design methodology and presents results through a specific application [7]. Giangrande et al. demonstrated the design and testing of PMSMs for aerospace electromechanical actuator (EMA) applications, emphasizing the need for robust and lightweight designs [8]. Wang et al. presented in their studies that metaheuristic algorithms such as genetic algorithms (GA), PSO and MADS are effective in optimizing surface PMSM designs [9]. Qiang et al. explored the use of fuzzy PID controllers in PMSM servo control systems, demonstrating their effectiveness in achieving precise control [10]. Hou et al. proposed a composite super-twisting sliding mode control strategy based on a novel disturbance observer, which significantly improved speed regulation in PMSMs [11]. Additionally, Liu et al. addressed flux-weakening control in dual three-phase PMSM drive systems, focusing on copper loss minimization to enhance efficiency [12]. In direct drive applications, machine learning methods such as support vector regression (SVR) are being increasingly used to improve torque density and to minimize torque ripple. These techniques, in conjunction with sophisticated models that incorporate high-order space harmonics, provide more precise performance predictions and efficient design optimization [13]. In PMSM design optimization, improving efficiency and gear torque characteristics are among the focal points. Methods such as Kriging models and genetic algorithms have shown outstanding performance in dealing with these issues. By using finite element analysis (FEA) and rotor shape optimization, the efficiencies and the dynamic performance of electric vehicle electric compressors can be significantly improved [14].

PMSM design optimization is a procedure to increase the performance and efficiency of the motor. In this optimization procedure, various algorithms and techniques are used. As shown in Figure 1, evolutionary algorithms like Genetic Algorithms (GA), Particle Swarm Optimization (PSO) and Differential Evolution (DE) use population-based searching strategies to obtain better results in motor design. Goal-based optimization algorithms optimize motor parameters to reach a given goal performance or efficiency value. On the other hand, heuristic algorithms use problem domain-specific information and experiences to produce fast and efficient solutions. By a combination of these methods, high performance and efficiency can be achieved in PMSM optimization.

In this study, the design and optimization of a PMSM are performed using ANSYS Maxwell, a finite element analysis software for electromagnetic systems. Unlike the optimization algorithm frequently employed in the literature, this study adopts a parametric optimization methodology. The effectiveness of the parametric optimization method is both computational efficiency and the ability to systematically optimize many design parameters. This method offers significant advantages in enhancing motor performance, reducing torque ripples, and minimizing electromagnetic losses. Similarly, Wiesheu et al. demonstrated substantial improvements in reducing material costs, torque ripples, and losses through

spline-based rotor and stator shape optimization within an isogeometric analysis framework [15]. Chen and Lee performed a detailed parametric sensitivity analysis on an Interior PMSM with a V-shaped magnet structure, revealing how rotor geometric variations impact key electromagnetic characteristics such as average torque, torque ripple, cogging torque, power density, power factor, and efficiency across different speed ranges [16]. In conclusion, parametric optimization serves as a powerful tool in PMSM design, facilitating informed decision-making and enabling designers to achieve targeted performance metrics while potentially reducing development and production costs.

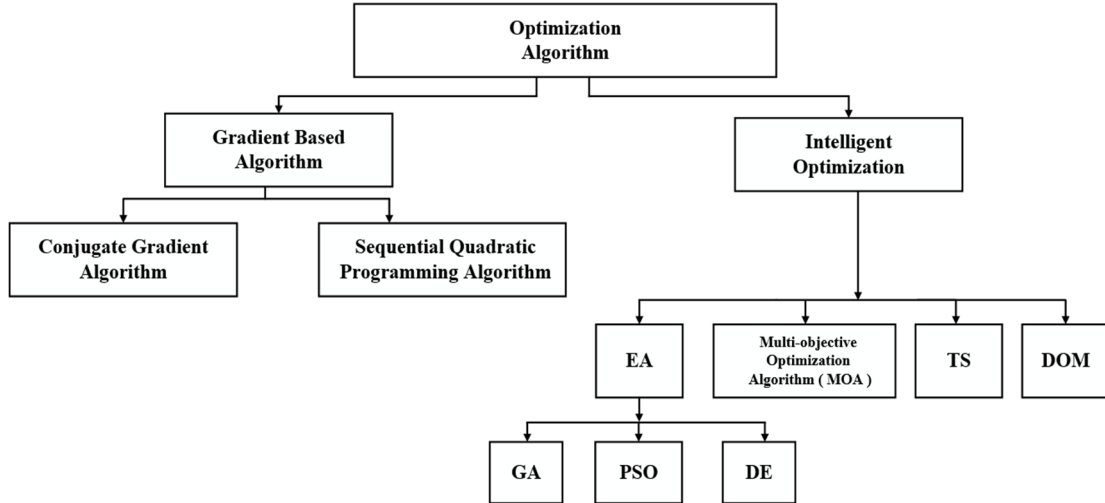


Figure 1. Optimization algorithm for PMSM designs

The study introduces a parametric optimization strategy focused on critical geometrical parameters that have a direct influence on the motor's magnetic field distribution specifically, magnet thickness, pole embrace, and pole offset. The proposed optimization scheme enhances the overall performance efficiency of the PMSM while simultaneously achieving a substantial reduction in cogging torque, one of the main sources of vibration and noise in electric motors. By methodically adjusting these key parameters, the study ensures an improved balance between electromagnetic torque generation and mechanical stability, leading to a more stable and efficient operation.

2. OPTIMIZATION METHODS PERFORMED IN THE PMSM FIELD

2.1. Genetic Algorithm

PMSMs are widely used in various industrial applications due to their high efficiency, power density, and reliability. However, designing an optimal PMSM requires a balance between multiple conflicting objectives, such as efficiency maximization, weight reduction, and cost minimization. Traditional design methodologies often fall short in addressing the complexity of this multi-objective problem. Therefore, advanced optimization techniques such as Genetic Algorithms (GAs) have gained popularity for PMSM design optimization.

Cvetkovski and Petkovska utilized GA for optimizing specific power density, demonstrating its effectiveness in balancing performance metrics [17]. Similarly, Mutluer and Bilgin compared GA with PSO in PMSM design, concluding that GA provides robust and globally optimal solutions [18]. Avdeev and Osipov applied GA for PMSM parameter identification under noisy conditions, showing that GA-based optimization improves accuracy and robustness [19]. Furthermore, Guo et al. (2010) introduced hybrid and interval-based GA approaches, which enhanced solution precision and convergence speed [20]. Additional studies highlight the use of GA in high-speed PMSM designs, focusing on power density and loss minimization [21]. Karnavas and Korkas implemented GA for optimizing radial flux PMSM, demonstrating improved efficiency and reduced material costs [22]. In another study, Mallik et al. used GA to design an energy-efficient induction motor, highlighting its applicability to PMSMs as well. They found that GA could effectively optimize efficiency and cost parameters while adhering to manufacturing constraints [23].

Genetic Algorithm is a powerful tool for PMSM design optimization, offering a robust and flexible approach to addressing multiobjective design challenges. The literature indicates that GA not only improves performance metrics such as efficiency and cost but also enables innovative hybrid optimization strategies.

2.2. Differential Evolution Algorithm

This section discusses the fundamental principles of DE, its application in PMSM optimization, and evaluates its effectiveness in comparison with other algorithms. Optimization techniques for PMSMs have evolved significantly over the years. Sizov et al. employed a multi-objective DE algorithm for optimizing PM AC synchronous machines, addressing multiple stator and rotor geometric variables. They demonstrated that DE achieves better efficiency and lower torque ripple compared to conventional methods [24]. Another study by Caponio et al. explored the application of Memetic Differential Evolution (MDE) in PMSM control system design, showing significant improvements in convergence speed and solution quality [25]. Zhao et al. introduced a combined approximation model with DE to optimize modular linear PM vernier machines, demonstrating enhanced performance in high-precision direct-drive applications [26]. Furthermore, Zhang et al. implemented DE in parametric modeling and optimization of spoke and V-type PM machines, highlighting its capability to systematically compare different motor topologies [27]. DE is a population-based optimization algorithm that operates through mutation, crossover, and selection operators to iteratively improve solutions. The mutation step involves creating new individuals by adding weighted differences between existing population members. The crossover step combines parent and mutated individuals to introduce diversity, while the selection step ensures that only the fittest individuals survive to the next generation [28]. DE is well-suited for PMSM optimization due to its ability to handle nonlinear constraints and multi-objective trade-offs effectively. Unlike Genetic Algorithms, DE employs direct mutation strategies without requiring crossover probabilities, making it computationally efficient and robust against local optima.

2.3. Particle Swarm Optimization

Kennedy and Eberhart first proposed PSO in 1995 [29]. Particles can reach in the direction of the optimal solution in the search space using this approach, which is predicated on the concept of swarm intelligence. In the design of permanent magnet synchronous motors, PSO is also utilized. By examining design optimization techniques for electrical devices, Lei et al. showed the efficacy of PSO in this area [30]. Zhang et al. shown how well it works to solve challenging optimization issues. Their research showed that PSO's capacity to strike a balance between exploration and exploitation has led to its widespread use in machine learning, artificial intelligence, and engineering. The authors also underlined the value of hybrid PSO techniques, which incorporate additional metaheuristic algorithms to improve solution accuracy and convergence speed [31]. Gu et al. proposed an optimization of a PMSM design to preserve a constant power speed range. An increased constant power speed range provided by the recommended optimization method has resulted in lower losses and increased efficiency over the torque-speed range [32]. Bhagubai et al. identified geometric factors such rotor radius, stator outer ring width, magnet width and length, airgap size, and shaft radius as decision variables [33]. Gong et al. offered a better PSO variant known as genetic PSO in which the original PSO's convergence rate has been increased by using genetic operators [34]. Essential parameters and feasible models for optimization are provided by the design process. As seen in Figure 2, the optimization process improves these designs using a variety of methods and techniques to get the highest performance and efficiency.

Two crucial aspects to enhancing electrical machine performance and cutting expenses are design and optimization. Process planning, inverter and controller design, electromagnetic properties, motor type, structure, material and size selection, and thermal management are all part of the design process. Optimization models are developed using the data gathered during the design stage. Using single or multi-objective models, conventional numerical techniques, clever algorithms, and hybrid approaches, the optimization process enhances the design. Optimization is more effective when multilevel approaches, transdisciplinary methods, and surrogate models are used. These two processes operate in a cycle whereby design improves optimization and optimization improves designs. This combination, particularly when combined with clever algorithms, expedites design processes and successfully resolves technical difficulties.

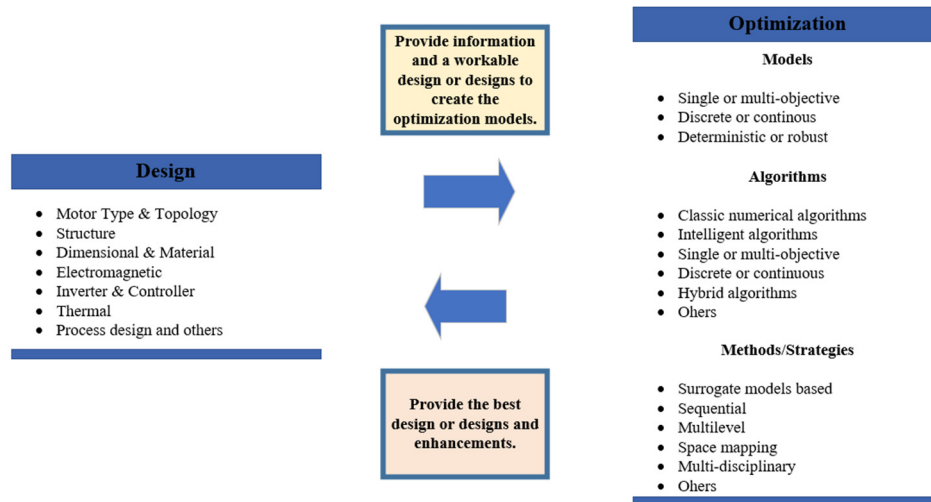


Figure 2. Electrical machine design and optimization

2.4. Tabu Search Algorithm

Tabu Search (TS) is a metaheuristic search method employing local search methods for mathematical optimization. It was created by Fred W. Glover in 1986 [35] and formalized in 1989 [36, 37]. TS guides a local heuristic search procedure to explore the solution space beyond local optimality, emphasizing adaptive memory and responsive exploration [35]. TS applications include electric motor optimization. Yazdani-Asrami et al. designed a Permanent Magnet Brushless DC Motor using a modified TS optimizer, considering losses, volume, and cost [38]. Idoumghar et al. minimized torque ripple in a three-phase switched-reluctance machine, demonstrating TS's effectiveness in improving motor performance [39]. By improving the current TS method, Ho et al. presented an improved Tabu Search (ITS) algorithm to optimize electromagnetic devices. In addition to using techniques like systematic diversification, memory retention of investigated subspaces, and an accelerated neighborhood search procedure, the ITS also includes an aspiration criterion. Thus, the ITS reached convergence in 1,842 iterations, about five times less than the number of iterations needed for the Simulated Annealing (SA) technique [40].

The solution process of the Tabu Search algorithm is illustrated in Figure 3. This process includes local search methods starting from an initial solution, barriers to local minimum, cycling problems, and strategies for reaching the global minimum. Local minimum, which are points in the solution space where the objective function reaches a reasonably low value but frequently do not correspond to the optimal solution, are distinct from global minimum. Figure 3 shows how a local minimum might trap an early solution, impeding its progress toward the global minimum.

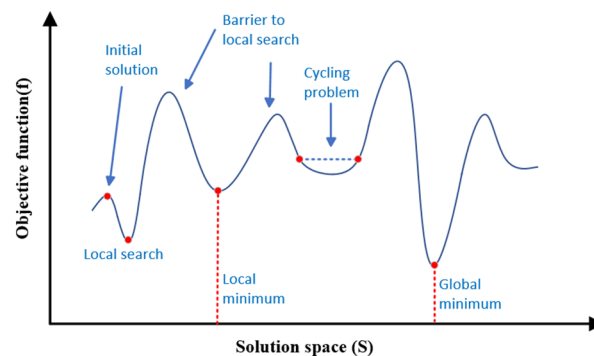


Figure 3. Tabu search algorithm solution process.

An algorithm's ability to find better solutions may be hampered by obstacles in the solution space, and conventional optimization algorithms frequently encounter these difficulties and prematurely converge at local minimum. The problem of cycling, in which the algorithm alternates between spots without making much progress, can also arise in optimization procedures. This reduces search efficiency and makes it more

difficult to explore new regions of the solution space. These issues are successfully addressed by sophisticated algorithms such as TS, which avoid trapping in local minimum, prevent cycling, and intelligently guide the search process. TS improves the algorithm's capacity to go past barriers and arrive at the global minimum by more effectively traversing the solution space. These methods are essential to engineering optimization, especially in applications like electric motor optimization, where they enhance system performance, lower expenses, and lessen unintended consequences in challenging optimization issues.

2.5. Multi-Objective Algorithm

PMSMs are extensively used in industry due to their high efficiency and their successful performance in various applications. However, it is challenging to optimize the layout of these engines as they have conflicting objectives. These targets include maximizing efficiency and torque while also minimizing flyback and torque swelling. To help overcome these difficulties, academics and engineers have developed multi-objective algorithms (MOAs) to optimize the design and performance of PMSMs. By considering the competing goals of efficiency, cost, torque performance and stability simultaneously, MOAs help to carefully balance these trade-offs to create designs that meet specific performance requirements while maintaining reliability and productivity.

Parekh et al. presented a hybrid representation that integrates data-driven and physics-based methodologies. Their novel approach leverages deep neural networks to forecast motor motion and optimize execution, resulting in a significant decrease in computational requirements compared to classical optimization methods. This work emphasizes the potential of integrating artificial intelligence with MOAs to improve the design flow and offers a more efficient way for motor optimization [41]. Huber et al. explored the formation of unsteady PMSM designs with machine learning techniques. Their work is focused on optimizing targets such as constant quality, which is essential for sustaining consistent motor performance. Despite encountering difficulties with instability, their work has highlighted the importance of power and stability as critical directions in motor optimization. This highlights the role of MOAs in tackling complex, multi-dimensional design challenges [42]. Gauthey et al. developed a multi-material optimization topology optimization approach for PMSM design. Their approach has facilitated the discovery of modern rotor and stator geometries, resulting in significant improvements in the motor performance. This work has resulted in novel designs that increase overall efficiency and functionality by showing how MOAs can effectively manage material distribution and structural optimization [43]. Wiesheu et al. has proposed a spline-based optimization strategy for rotor and stator designs. Their method sought to minimize material costs, decrease torque fluctuation and mitigate the mechanical failures. This approach, which is in line with the principles of MOAs, shows the potential to achieve practical and cost-effective engine design solutions while maintaining high performance standards. The spline-based method's emphasis on material efficiency and robustness underlines the MOAs' versatility in meeting various optimization objectives [15]. Figure 4 is a cross-sectional representation of the basic components and layout of an electric motor. The motor's static and moving components are expressed in different colors. The stator (orange color) is the stationary part of the motor, which generates the magnetic field and makes the rotor spin. The air gap (yellow) is between the stator and the rotor, allowing the transmission of magnetic flux. The rotor design area (red color) is the rotating component of the motor and generates the mechanical movement as a consequence of magnetic interaction. The torque matching band (black) is a region critical to optimizing the motor's torque performance. The windings and circuit elements (colored green) are located inside the stator, allowing the electric current to be conducted and the magnetic field to be created. Figure 4 is used to analyze the arrangement of the structural components in motor design and to optimize performance.

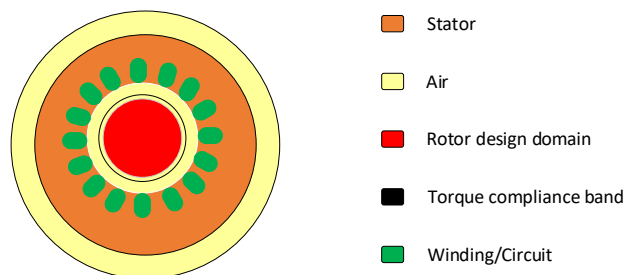


Figure 4. Schematic representation of the motor structure

These studies illustrate the potentially transformative impact of MOAs on PMSM design optimization. By integration of advanced computational techniques, machine learning and hybrid approach, the researchers have obtained substantial improvements in engine performance, cost-efficiency and safety. The capability of MOAs to balance competing targets such as material efficiency, stability and torque performance positions them as essential tools for modern engineering challenges.

2.6. Deterministic Optimization Method

Deterministic Optimization Method (DOM) has been used for electric vehicles and machinery since the 1940s. DOM has a simpler structure compared to some other methods. Instead of modifying multiple parameters simultaneously, it follows a sequential process that is repeated until the most efficient result is obtained. Efficient results are defined as the attainment of optimal values in terms of efficiency, power, torque, and various other parameters [44]. Figure 5 shows the flowchart of the DOM algorithm to analyze a PMSM.

DOM is a method of changing the air gaps between the rotor and stator, changing the fixed parts on the rotor and reducing the magnetic losses in the motor. These changes are parameters that vary depending on the type of motor and where it is used. Each one serves many different purposes. To date, many studies have been carried out on many different machines, from household machines to business machines, and all of these studies have a different purpose. Compared to stochastic measurements, DOM is more preferable as it is a more accurate way of configuring the machines and motors under study. Ahmad et al. used the DOM method to optimize the design of electric machines by taking the design parameters in order and using Finite Element Analysis (FEA) method to modify the air gaps in the motor, the thickness and thinness of the materials in the rotor and stator. In addition, they made design changes to increase torque production and to prevent the loss in magnetic flux [43]. ION et al. compared these two methods for the improvement of electrical devices in their study [45].

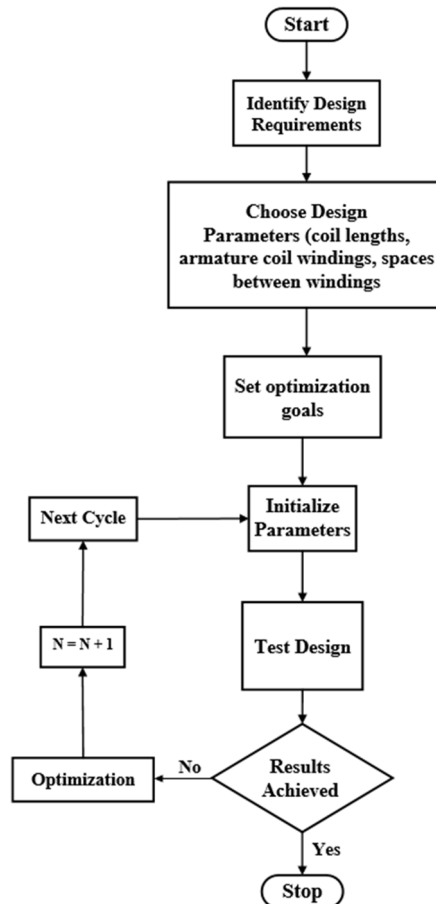


Figure 5. Flowchart of the DOM algorithm

Liu et al. proposed a design proposal using robust and deterministic optimization methods together to improve torque performance in spoke-type permanent magnet machine designs. A design was made using Monte Carlo analysis (MCA) and Design for Six Sigma (DFSS) analysis methods. As a result, they reduced the fluctuations in torque performance [46]. Wang et al. used particle swarm optimization (PSO) and deep deterministic policy gradient (DDPG) algorithms for speed control of PMSMs. First, they used the PSO algorithm to design a PI controller based on the characteristics of the motor. In the second stage, they included the DDGP algorithm and completed the online learning process quickly. They have achieved success by maintaining the balance between speed and control by counteracting the delays in the system and the inability to maintain the load [47].

3. CASE STUDY

PMSMs have notable benefits compared to conventional motors, mainly due to their compact size, reduced weight, and superior efficiency and power performance. Advances in the development of high-energy-efficiency motors have emphasized the significance of minimizing harmonic distortions in torque-time curves and variations in rotor speed. Since torque under no-load conditions contributes to speed instability and noise, its reduction is a crucial design goal, especially for applications that run at low speeds and light loads [48]. In this study, the analytical and magnetic design processes are carried out using ANSYS RMxprt and Maxwell-3D software tools. The motor being analyzed is a three-phase PMSM, featuring a 6-pole rotor and a 36-slot stator. The designed PMSM model is illustrated in Figure 6.

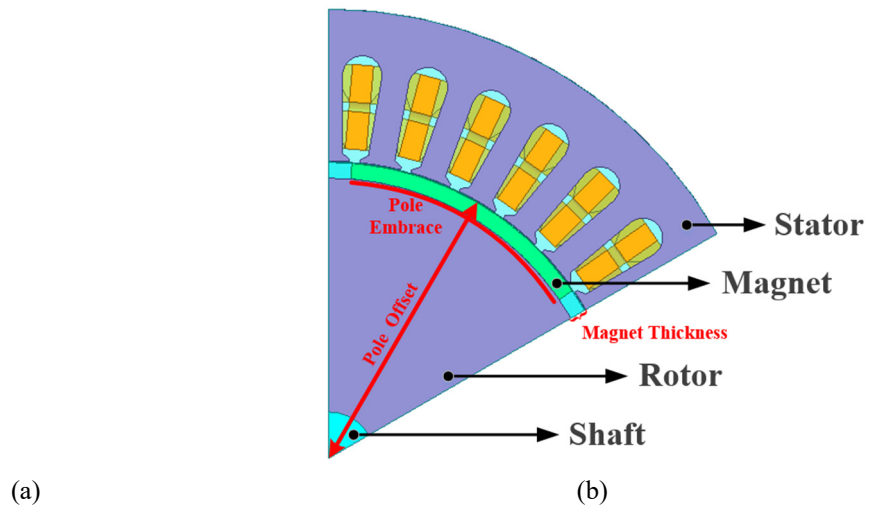


Figure 6. Designed PMSM a) 2D view, b) The pole piece of a full motor

The optimization process considers key design factors, including magnet thickness, pole embrace, and pole offset. These variables play a crucial role in shaping the motor's torque characteristics, minimizing cogging effects, and optimizing the magnetic field distribution. By integrating parametric optimization techniques for magnet thickness, pole embrace, and pole offset, the overall motor performance can be significantly improved. Magnet thickness plays a crucial role in determining the magnetic flux linkage, air-gap flux density, and torque production of the motor. Pole embrace (or pole arc ratio) represents the ratio of the pole arc to the pole pitch and directly affects the air-gap flux distribution and torque production. Pole offset refers to the angular displacement of the permanent magnets on the rotor. It is a key parameter for reducing torque ripple and cogging torque, ensuring smoother operation. By integrating parametric optimization techniques for magnet thickness, pole embrace, and pole offset, the overall motor performance can be significantly improved [49].

Parametric optimization involves systematically adjusting key design parameters to enhance motor performance metrics such as torque production, efficiency, and reduction of torque ripples. Key parameters typically considered in this optimization process include magnet thickness, pole embrace, and pole offset. Nominal design data of the PMSM is given in Table 1. PMSM optimization is carried out using the parameters listed in Table 2.

To systematically determine the optimal values of these parameters, the parametric optimization process is implemented using an iterative approach. Finite Element Analysis (FEA)-based simulations are used to analyze and refine the design. The optimization process consists of multiple iterative simulations and analysis steps to determine the optimal values for pole offset, magnet thickness, and pole embrace. Initially, the variable ranges are defined based on prior knowledge and design constraints. Then, parametric analysis is conducted using electromagnetic simulations to assess the effects of different parameter combinations on motor performance. The optimization process evaluates key performance indicators, including efficiency, air-gap flux density, total losses, and cogging torque. Higher efficiency ensures lower power losses and improved energy conversion, while optimal air-gap flux density enhances smooth torque generation and minimizes saturation effects. Additionally, reducing total losses improves overall motor performance. Lastly, minimizing cogging torque leads to smoother operation and reduced torque ripple, resulting in a more stable and efficient PMSM design.

The initial nominal efficiency of the PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) is 70.46%. Through parametric optimization, parameters have been determined to increase efficiency, reduce cogging torque, and achieve the optimum air gap flux density. Figure 7 presents the 3D efficiency map. In this optimization process, two key factors are focused on reduction of cogging torque and achieving optimum air gap flux density. Cogging torque arises from irregularities in the motor's tooth structure, causing torque ripple. Reducing this ripple improves the smoothness and efficiency of the motor's operation. Optimizing the magnetic flux density in the air gap of the motor enhances its efficiency. This optimization ensures the motor operates with less energy loss, thus improving its overall performance. As a result, by optimizing these parameters, a more efficient PMSM design is obtained.

Table 1. Nameplate data of designed PMSM

Nominal data	Value
Rated Output Power (kW)	20
Rated Voltage (V)	138
Nominal Efficiency (%)	70.46
Number of Poles	6
Stator data	Parameters
Number of Stator Slots	36
Outer Diameter of Stator (mm)	340
Inner Diameter of Stator (mm)	225
Length of Stator Core (mm)	86
Stacking Factor of Stator Core	0.95
Slot Area (mm ²)	481.357
Rotor data	Parameters
Minimum Air Gap (mm)	0.5
Inner Diameter (mm)	35
Length of Rotor (mm)	400
Polar Arc Radius (mm)	112
Pole Offset (mm)	0
Mechanical Pole Embrace	0.75
Max. Thickness of Magnet (mm)	8
Permanent magnet	Parameters
Residual Flux Density (Tesla)	0.96
Coercive Force (kA/m)	690
Maximum Energy Density (kJ/m ³)	183
Type of Magnet	XG196/96

Table 2. Limits of parameter adjustments

Parameter range	Pole embrace (mm)	Magnet thickness (mm)	Pole offset (mm)
Minimum	0.45	4	0
Maximum	0.95	9	26

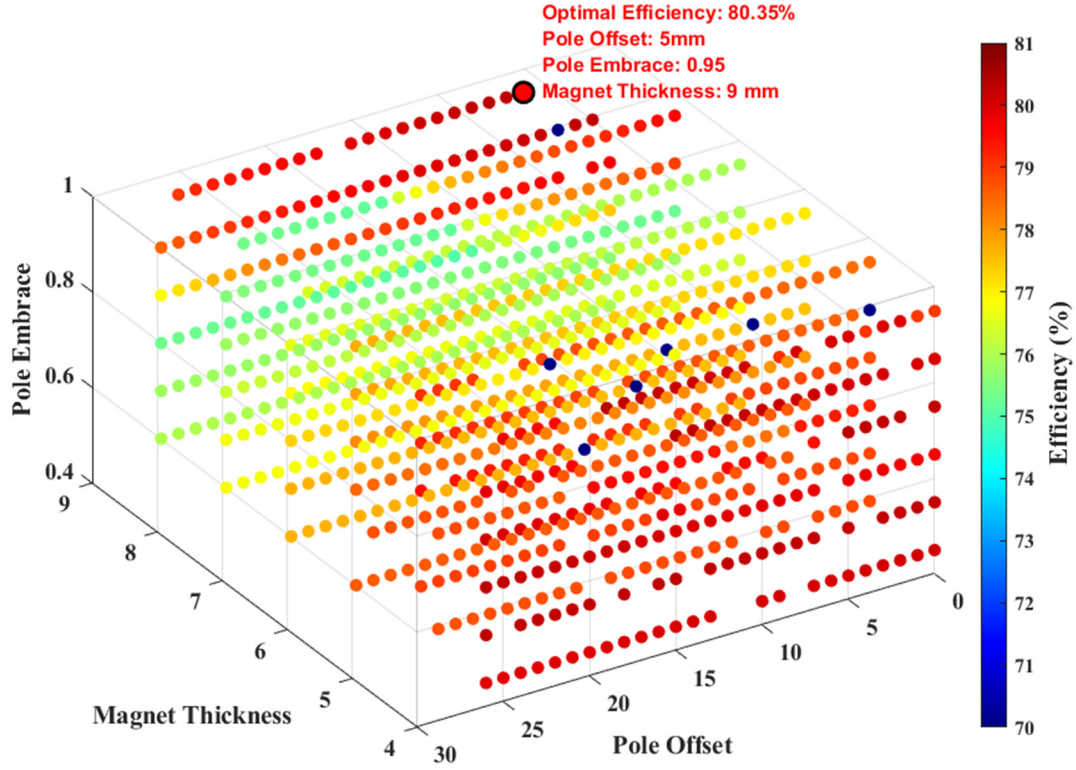


Figure 7. 3D efficiency map of the optimized PMSM

After parametric optimization, the optimal values for efficiency, cogging torque, and air gap flux density were determined to be a Pole Offset of 5 mm, a Pole Embrace of 0.95, and a Magnet Thickness of 9 mm. The maximum efficiency achieved after optimization is shown in Figure 8.

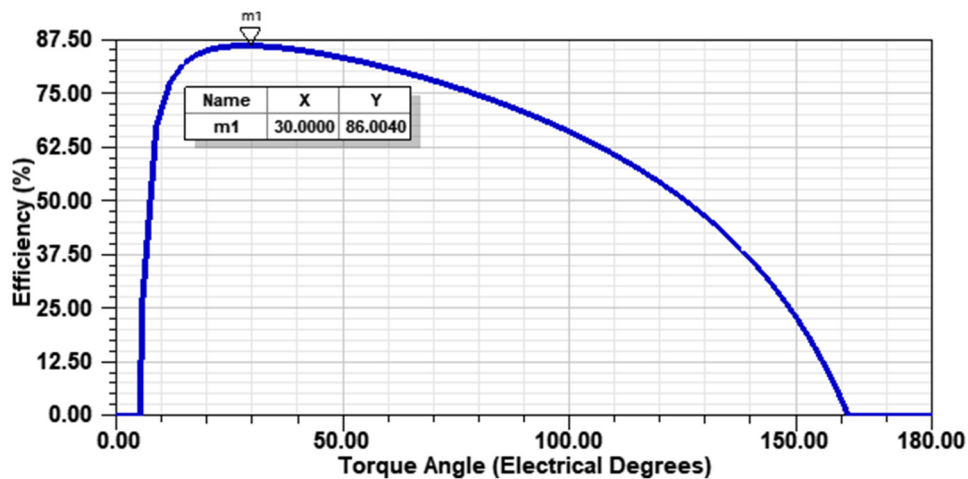
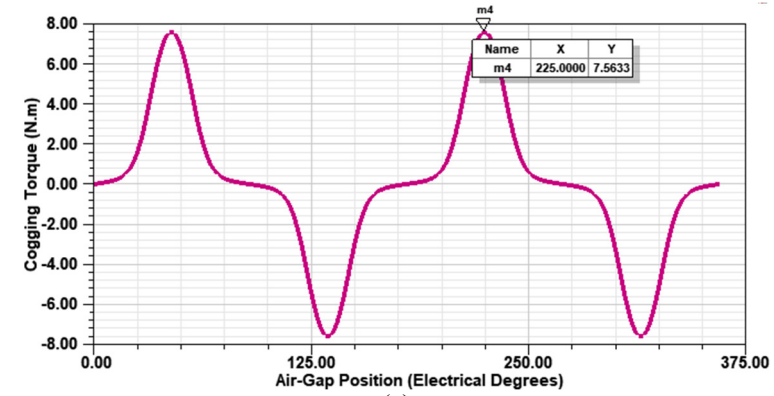
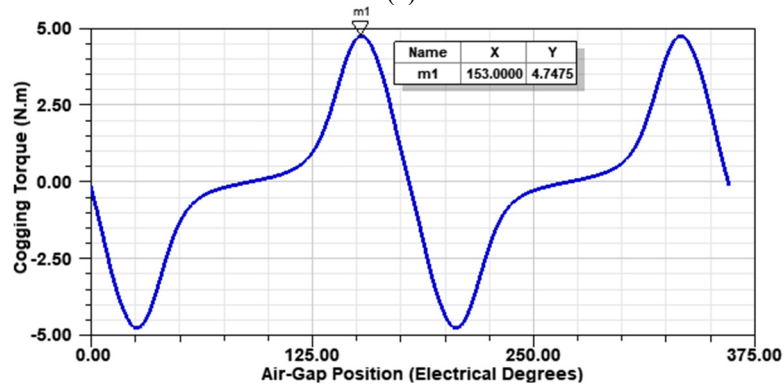


Figure 8. The maximum efficiency of the optimal PMSM

The cogging torque and air gap flux density values are thoroughly analyzed using optimized design parameters. Figure 9 illustrates the reduced cogging torque, while Figure 10 presents the optimized air gap flux density.

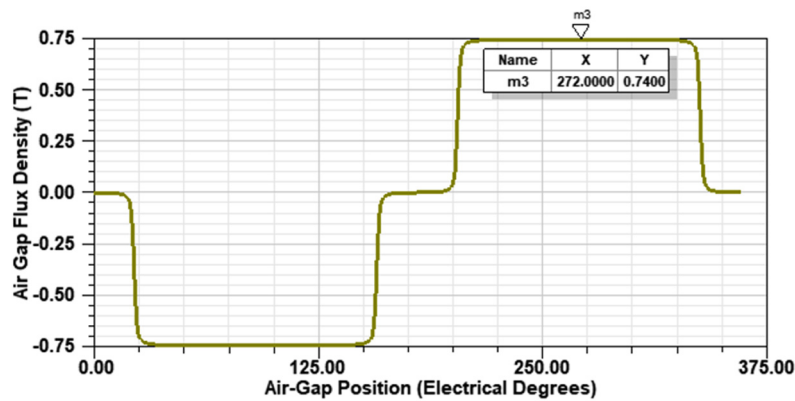


(a)

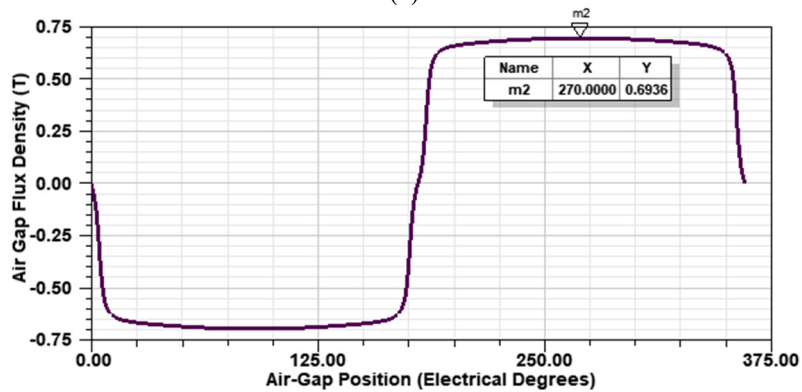


(b)

Figure 9. Cogging torque a) nominal design b) optimal design



(a)



(b)

Figure 10. Air gap flux density a) nominal design b) optimal design

The cogging torque, which is a major source of unwanted vibration and acoustic noise in PMSMs, has been significantly reduced from 7.56 Nm to 4.74 Nm through the applied optimization process. This reduction enhances the smoothness of torque delivery, contributing to quieter and more stable motor operation, especially at low speeds. Additionally, the air-gap flux density has been effectively optimized, leading to a more uniform magnetic flux distribution across the air gap. This improvement not only enhances the torque production capability of the motor but also reduces the risk of local magnetic saturation, which can degrade motor efficiency and cause thermal issues. The combined reduction in cogging torque and refinement of the flux density profile highlights the success of the design approach in achieving a high-performance, low-noise motor configuration. Moreover, following the parametric optimization process, the motor's efficiency experienced a significant improvement, increasing by approximately 15%. This enhancement reflects the effectiveness of optimizing key design parameters such as pole offset, magnet thickness, and pole embrace in reducing losses and improving electromagnetic performance. The increase in efficiency indicates a more effective energy conversion, resulting in reduced power consumption, and better overall motor performance.

The optimization process in this study led to a more uniform air-gap flux density, enhancing torque production and reducing the risk of local magnetic saturation. In comparison, Chen et al. conducted a parametric sensitivity analysis on an Interior PMSM with a V-shaped magnet structure, revealing how rotor geometric variations impact key electromagnetic characteristics such as average torque, torque ripples, cogging torque, power density, power factor, and efficiency across different speed ranges [16]. While both studies emphasize the importance of flux distribution, the current study's integration of analytical modeling with parametric optimization provides a comprehensive approach to enhancing flux uniformity. The efficiency of the motor in this study improved by approximately 15% post-optimization, a significant enhancement. In contrast, Çömezoğlu and Partal reported efficiency improvements of about 1.5% in their study on PMSMs for light electric vehicles [50]. The substantial efficiency gain in the current study underscores the effectiveness of optimizing key design parameters such as pole offset, magnet thickness, and pole embrace. Kim and Baek conducted an optimization of a 30-kW interior PMSM designed for electric vehicle applications, aiming to enhance torque characteristics through modifications to the stator and rotor geometry. Their methodology combined parametric sensitivity analysis with the progressive quadratic response surface method (PQRS) [51]. The cogging torque presented an approximate performance compared to this study. This comparison highlights the strength of the parametric optimization method employed in this study, particularly considering that the results were achieved without the use of more intricate hybrid optimization techniques.

4. CONCLUSIONS

This study presents a FEA-based parametric optimization approach aimed at improving the magnetic-structural characteristics of a 20-kW, 138-V, 6-pole adjustable-speed permanent magnet synchronous motor for electric vehicle applications. The optimization focuses on refining magnet thickness, pole embrace, and pole offset without altering the motor's original topology. These parameters are critical as they directly influence the electromagnetic performance, torque production, and mechanical stability of the motor. The results of parametric optimization reveal a notable increase in motor efficiency, from 70.46% to 80.35%. This significant improvement demonstrates the sensitivity of PMSM performance to these structural design parameters. Proper adjustment of pole offset, magnet thickness, and pole embrace leads to an optimal distribution of the magnetic flux in the air gap, thereby reducing losses and improving operational smoothness. The study confirms that careful tuning of these variables can lead to better energy conversion, reduced cogging torque, and enhanced thermal and vibrational performance. Looking ahead, future work will explore hybrid optimization strategies that combine parametric optimization with advanced multi-objective optimization algorithms. This integration is expected to provide more comprehensive design solutions that balance efficiency, cost, and performance under multiple constraints and objectives.

5. REFERENCES

1. Candelo-Zuluaga, C., Riba, J.R., Espinosa, A.G. & Blanch, P.T. (2021). Customized PMSM design and optimization methodology for water pumping applications. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 37(1), 454-465.

2. Boztaş, G., Yıldırım, M. & Aydoğmuş, Ö. (2020). Design and optimization of a PMSM for obtaining high-power density and high-speed. *Turkish Journal of Science and Technology*, 15(2), 61-70.
3. Karnavas, Y.L. & Korkas, C.D. (2014). Optimization methods evaluation for the design of radial flux surface PMSM. In *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 1348-1355.
4. Jeong, C.L., Kim, Y.K. & Hur, J. (2019). Optimized design of PMSM with hybrid-type permanent magnet for improving performance and reliability. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(5), 4692-4701.
5. Lee, J.H., Kim, J.W., Song, J.Y., Kim, Y.J. & Jung, S.Y. (2015). A novel memetic algorithm using modified particle swarm optimization and mesh adaptive direct search for PMSM design. *IEEE Transactions on Magnetics*, 52(3), 1-4.
6. Candelo-Zuluaga, C., Espinosa, A.G., Riba, J.R. & Blanch, P.T. (2020). PMSM design for achieving a target torque-speed-efficiency map. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(12), 14448-14457.
7. Dang, L., Bernard, N., Bracikowski, N. & Berthiau, G. (2017). Design optimization with flux weakening of high-speed PMSM for electrical vehicle considering the driving cycle. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(12), 9834-9843.
8. Giangrande, P., Madonna, V., Sala, G., Kladas, A., Gerada, C. & Galea, M. (2018). Design and testing of PMSM for aerospace EMA applications. *IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2038-2043.
9. Wang, F., Li, J., Li, Z., Ke, D., Du, J., Garcia, C. & Rodriguez, J. (2021). Design of model predictive control weighting factors for PMSM using Gaussian distribution-based particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(11), 10935-10946.
10. Qiang, G., Junfeng, H. & Wei, P. (2017). PMSM servo control system design based on fuzzy PID. In *2017 2nd International Conference on Cybernetics, Robotics and Control (CRC)*, 85-88.
11. Hou, Q., Ding, S. & Yu, X. (2020). Composite super-twisting sliding mode control design for PMSM speed regulation problem based on a novel disturbance observer. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 36(4), 2591-2599.
12. Liu, S., Song, Z., Liu, Y., Chen, Y. & Liu, C. (2022). Flux-weakening controller design of dual three-phase PMSM drive system with copper loss minimization. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 38(2), 2351-2363.
13. Dhulipati, H., Ghosh, E., Mukundan, S., Korta, P., Tjong, J. & Kar, N.C. (2019). Advanced design optimization technique for torque profile improvement in six-phase PMSM using supervised machine learning for direct-drive EV. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 34(4), 2041-2051.
14. Baek, S.W. & Lee, S.W. (2020). Design optimization and experimental verification of permanent magnet synchronous motor used in electric compressors in electric vehicles. *Applied Sciences*, 10(9), 3235.
15. Wiesheu, M., Komann, T., Merkel, M., Schops, S., Ulbrich, S. & Garcia, I.C. (2024). Spline-based rotor and stator optimization of a permanent magnet synchronous motor. In *2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 1-6.
16. Chen, H. & Lee, C.H. (2019). Parametric sensitivity analysis and design optimization of an interior permanent magnet synchronous motor. *IEEE Access*, 7, 159918-159929.
17. Cvetkovski, G. & Petkovska, L. (2010). Specific power optimal design of permanent magnet synchronous motor using GA. *Przegľad Elektrotechniczny*, 86(12), 24-27.
18. Mutluer, M. & Bilgin, O. (2012). Design optimization of PMSM by particle swarm optimization and genetic algorithm. In *2012 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA)*, 1-4.
19. Avdeev, A. & Osipov, O. (2019). PMSM identification using genetic algorithm. In *2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED)*, 1-4.
20. Guo, P., Wang, X. & Han, Y. (2010). The enhanced genetic algorithms for the optimization design. In *2010 3rd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI)*, 7, 2990-2994.
21. Yu, R. & Zhang, C. (2010). Optimal PID controller design in PMSM based on improved genetic algorithm. In *2010 The 2nd International Conference on Industrial Mechatronics and Automation (ICIMA)*, 2, 123-126.
22. Karnavas, Y.L. & Korkas, C.D. (2014). Optimization methods evaluation for the design of radial flux surface PMSM. In *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 1348-1355.

23. Mallik, S., Mallik, K., Barman, A., Maiti, D., Biswas, S.K., Deb, N.K. & Basu, S. (2017). Efficiency and cost optimized design of an induction motor using genetic algorithm. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(12), 9854-9863.
24. Sizov, G.Y., Zhang, P., Ionel, D.M., Demerdash, N.A. & Rosu, M. (2013). Automated multi-objective design optimization of PM AC machines using computationally efficient FEA and differential evolution. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(5), 2086-2096.
25. Wu, L., Wang, H.Y., Lu, F.X. & Jia, P. (2008). An anytime algorithm based on modified GA for dynamic weapon-target allocation problem. In *2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*, 2020-2025.
26. Zhao, W., Yao, T., Xu, L., Chen, X. & Song, X. (2020). Multi-objective optimization design of a modular linear permanent-magnet vernier machine by combined approximation models and differential evolution. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(6), 4634-4645.
27. Zhang, P., Ionel, D.M. & Demerdash, N.A. (2013). Morphing parametric modeling and design optimization of spoke and V-type permanent magnet machines by combined design of experiments and differential evolution algorithms. In *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 5056-5063.
28. Yin, Z., Gong, L., Du, C., Liu, J. & Zhong, Y. (2019). Integrated position and speed loops under sliding-mode control optimized by differential evolution algorithm for PMSM drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(9), 8994-9005.
29. Kennedy, J. & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN)*, 4, 1942-1948.
30. Lei, G., Zhu, J., Guo, Y., Liu, C. & Ma, B. (2017). A review of design optimization methods for electrical machines. *Energies*, 10(12), 1962.
31. Zhang, Y., Wang, S. & Ji, G. (2015). A comprehensive survey on particle swarm optimization algorithm and its applications. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015(1), 931256.
32. Gu, W., Zhu, X., Quan, L. & Du, Y. (2015). Design and optimization of permanent magnet brushless machines for electric vehicle applications. *Energies*, 8(12), 13996-14008.
33. Bhagubai, C.P.P., Sarrico, J.G., Fernandes, J.F.P. & Costa Branco, P.J. (2020). Design, multi-objective optimization, and prototyping of a 20 kW 8000 rpm permanent magnet synchronous motor for a competition electric vehicle. *Energies*, 13(10), 2465.
34. Gong, Y.J., Li, J.J., Zhou, Y., Li, Y., Chung, H.S.H., Shi, Y.H. & Zhang, J. (2015). Genetic learning particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 46(10), 2277-2290.
35. Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & Operations Research*, 13(5), 533-549.
36. Glover, F. (1989). Tabu search-Part I. *ORSA Journal on Computing*, 1(3), 190-206.
37. Glover, F. (1990). Tabu search-Part II. *ORSA Journal on Computing*, 2(1), 4-32.
38. Yazdani-Asrami, M., Alipour, M. & Gholamian, S.A. (2015). Optimal ECO-design of permanent magnet brushless DC motor using modified tabu search optimizer and finite element analysis. *Journal of Magnetism*, 20(2), 161-165.
39. Idoumghar, L., Raminosa, T. & Miraoui, A. (2009). New tabu search algorithm to design an electric motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(3), 1498-1501.
40. Ho, S.L., Yang, S., Ni, G. & Wong, H.C. (2001). An improved tabu search for the global optimizations of electromagnetic devices. *IEEE Transactions on Magnetics*, 37(5), 3570-3574.
41. Parekh, V., Flore, D., Schöps, S. & Theisinger, P. (2023). Multi-objective optimization of electrical machines using a hybrid data-and physics-driven approach. *arXiv Preprint*, arXiv:2306.09096.
42. Huber, M.C., Fuhrländer, M. & Schöps, S. (2022). Multi-objective yield optimization for electrical machines using gaussian processes to learn faulty design. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 59(2), 1340-1350.
43. Gauthey, T., Gangl, P. & Hassan, M.H. (2021). Multi-material topology optimization with continuous magnetization direction for permanent magnet synchronous reluctance motors. *arXiv Preprint*, arXiv:2107.04825.
44. Omar, M.F.B., Sulaiman, E.B., Soomro, I.A., Ahmad, M.Z.B. & Aziz, R. (2023). Design optimization methods for electrical machines: A review. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 18(4), 2783-2800.

45. Ion, I.G., Bontinck, Z., Loukrezis, D., Römer, U., Lass, O., Ulbrich, S., Schöps, S. & De Gersem, H. (2018). Robust shape optimization of electric devices based on deterministic optimization methods and finite-element analysis with affine parametrization and design elements. *Electrical Engineering*, 100(4), 2635-2647.
46. Liu, G., Wang, Y., Chen, Q., Xu, G. & Song, C. (2020). Multiobjective deterministic and robust optimization design of a new spoke-type permanent magnet machine for the improvement of torque performance. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(12), 10202-10212.
47. Wang, C.S., Guo, C.W.C., Tsay, D.M. & Perng, J.W. (2021). PMSM speed control based on particle swarm optimization and deep deterministic policy gradient under load disturbance. *Machines*, 9(12), 343.
48. Vlachou, V.I., Sakkas, G.K., Xintaropoulos, F.P., Pechlivanidou, M.S.C., Kefalas, T.D., Tsili, M.A. & Kladas, A.G. (2024). Overview on permanent magnet motor trends and developments. *Energies*, 17(2), 538.
49. Bouali, K. (2024). Optimization of PMSM design parameters using genetic algorithms and FEM: A study on cogging torque reduction and magnetic flux distribution enhancement. *Journal of Electrical Systems*, 20(3), Article 3.
50. Çömezoglu, İ.G. & Zorlu Partal, S. (2022). Implementation and experimental validation of efficiency improvement in PM synchronous hub motors for light electric vehicles. *Energies*, 15(21), 7953.
51. Kim, H.J. & Baek, S.W. (2024). Optimal shape design to improve torque characteristics of interior permanent magnet synchronous motor for small electric vehicles. *Microsystem Technologies*, 1-15.



Yarık Açılan İçi Boş Silindirin Art İzindeki Akışın Farklı Geliş Açılarında Deneysel Araştırılması

Muhammed Murat AKSOY^{1,a}

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Osmaniye, Türkiye

^aORCID: 0000-0001-7594-9462

Makale Bilgileri

Geliş : 30.06.2025

Kabul : 11.10.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1730991

Sorumlu Yazar

Muhammed Murat AKSOY

muhammedmurataksoy@osmaniye.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Yarık

Akış karakteristiği

PIV

Silindir

Atıf şekli: AKSOY, M.M., (2025). Yarık Açılan İçi Boş Silindirin Art İzindeki Akışın Farklı Geliş Açılarında Deneysel Araştırılması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(4), 779-788.

ÖZ

Bu çalışmada, yarık içi boş dairesel silindirlerin art izindeki akış karakteristikleri ve sürüklenme katsayıları deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler, silindir çapına ($D=50$ mm) göre belirlenen Reynolds sayısı $Re = 10\ 000$ koşulunda yürütülmüş; yarık oranları ise $w/D=0,04$ (2 mm), 0,16 (8 mm) ve 0,20 (10 mm) olmak üzere üç farklı yarık genişliği olarak belirlenmiştir. Her bir yapılandırma için akışın 30° , 45° ve 60° geliş açıları için parçacık görüntülemeli hız ölçüm (PIV) tekniği kullanılarak art iz bölgesindeki akış istatistikleri ve türbülans dağılımları elde edilmiştir. Ayrıca, rüzgar tüneline yarık açılan silindirlerin sürüklenme katsayıları belirlenmiş ve yalın silindir kullanımı durumunda elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, hem yarık oranının hem de akışın geliş açısının art izindeki akış yapısını etkilediğini ortaya koymaktadır. Artan geliş açısı ile birlikte sürüklenme katsayısı değerleri yalın silindire göre arttığı gözlemlenmiştir.

Experimental Investigation of Wake Flow of a Hollow Cylinder with Slot at Various Angles of Incidence

Article Info

Received : 30.06.2025

Accepted : 11.10.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1730991

Corresponding Author

Muhammed Murat AKSOY

muhammedmurataksoy@osmaniye.edu.tr

Keywords

Slot

Flow characteristic

PIV

Cylinder

How to cite: AKSOY, M.M., (2025). Experimental Investigation of Wake Flow of a Hollow Cylinder with Slot at Various Angles of Incidence. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(4), 779-788.

ABSTRACT

In this study, the flow characteristics and drag coefficients in the wake of hollow circular cylinders with slots were experimentally investigated. The experiments were carried out for the Reynolds number $Re = 10\ 000$ based on the cylinder diameter ($D=50$ mm); three different slot widths were selected as slot ratios $w/D = 0.04$ (2 mm), 0.16 (8 mm), and 0.20 (10 mm). For each configuration, flow and turbulence statistics in the wake region were obtained by using particle image velocimetry (PIV) technique at 30° , 45° and 60° angles of incidence of the flow. In addition, the drag coefficients of slotted cylinders were measured in the wind tunnel and compared with the bare case. The results show that both the slot ratio and the angle of incidence of the flow affect the flow structure in the wake. It was observed that the drag coefficient values increased with increasing angle of incidence compared to the bare cylinder.

1. GİRİŞ

Temel geometrilerin özellikle silindirler etrafındaki akışın incelenmesi, hem temel akışkanlar dinamiği araştırmaları hem de uygulamalı mühendislik alanları açısından büyük bir öneme sahiptir. Ayrıca, dairesel kesitli silindir etrafındaki akış yapısının deneysel olarak incelenmesi, akış kontrolü, sürüklenme kuvvetinin ve türbülanslı akış yapılarının anlaşılması yaygın olarak çalışılan konulardır [1,2]. Bu tür çalışmalar, hem temel bilimsel açıdan hem de endüstriyel uygulamalarda enerji verimliliği, yapısal dayanıklılık ve akış kaynaklı titreşimlerin önlenmesi gibi kritik alanlar için önem arz etmektedir [3,4].

Küt cisimlerin arkasında, belirli Reynolds (Re) sayılarında oluşan periyodik girdap kopmaları von Karman girdap caddesi oluşumu olarak kendini gösterir. Bu girdap yapısı, cisim arkasında daimî olmayan basınç dağılımlarına ve dolayısıyla sürüklenme kuvvetinin artmasına neden olur. Bu nedenle, küt cisim etrafındaki akışın kontrolü mühendislikte önemli bir araştırma konusu olmaya devam etmektedir [5].

Son yıllarda, silindir etrafındaki akış kontrolü için çeşitli pasif ve aktif yöntemler geliştirilmiştir. Pasif yöntemler arasında, silindirin yüzeyine veya çevresine yerleştirilen delikler, yarıklar, dış delikli silindirler ve çeşitli geometrik modifikasyonlar yer almaktadır. Aktif yöntemler ise, yüzeye hava üfleme, plazma aktüatörleri veya titreşimli elemanlar gibi dışarıdan enerji gerektiren uygulamaları kapsamaktadır [6,7]. Bu bağlamda, içerisine yarık açılmış içi boş dairesel silindirler etrafındaki akış yapısını incelemek önem arz etmektedir.

Silindir üzerinde akışa paralel olarak açılmış yarığın akış yapısının kontrolü üzerindeki etkinliği Gao ve arkadaşları [8] tarafından deneysel olarak araştırılmıştır. Parçaçık görüntülemeli hız ölçüm (PIV) yöntemi ile gerçekleştirilen bu çalışmada yarık genişliği silindir çapının (D) %5'inden %15'ine kadar değiştirilerek art izindeki akış değişimi Reynolds sayısının $Re=26700$ olduğu durum için incelenmiştir. Yarıktan geçen akışın oluşturduğu jet akışın silindirin arkasında girdap kopma sürecini etkin bir şekilde manipüle ederek, silindirin sürüklenme katsayısı düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Ayrıca, jet akışın silindir art izinde iki durumlu (flip-flop [9]) akış yapısı oluşturduğu anlık akış yapıları ile ortaya çıkarılmıştır. Yarıktan gelen jet akışının art iz bölgesinde momentumu artırmasından dolayı silindirin kayma tabakasındaki girdap kopmalarını bozduğu ve akış kontrolünü sağlamaya yardımcı olduğu söylenebilir. Yarık açılmış içi boş dairesel kesitli silindirlerin art iz bölgesinde akış kontrolü sağladığı, başka bir çalışmada da deneysel olarak sunulmuştur [10].

Başka benzer bir çalışma da ise, Gao ve arkadaşları [11] tek bir yarık oranını (%7,5D) kullanarak 0° den 90° dereceye kadar farklı akış geliş açılarındaki akış karakteristiklerini incelemişlerdir. Açı arttıkça iki durumlu akış örüntü modellerinin kaybolduğu ve art izindeki girdap odak noktalarının silindire yaklaştığı gözlemlenmiştir. Yalın silindire kıyasla geliş açısı 45° olduğu durum en az etki göstermiştir. Ayrıca, geliş açısı 30° den sonra sürüklenme katsayısı doğrusal bir eğilim ile artış göstermiş ve her zaman yalın silindire göre yüksek değer almıştır. Böylelikle, geliş açısının farklı olması durumları geliş açısının 0° ile kıyaslandığında akış karakteristiklerinde değişiklik olmasına rağmen sürüklenme kuvvetini artırdığı ortaya çıkmıştır.

Bu çalışmalara ek olarak, Kim ve arkadaşları [12] hem yarık açıklığının hem de eksenel olarak düzenlenmiş deliklerin sürüklenme kuvveti ve silindir art izindeki akış yapıları üzerine etkileri farklı geliş açılarında irdelemiştir. Dairesel silindir üzerinde açılan eksenel deliklerin, aynı boyuttaki yarık oranına kıyasla daha geniş bir geliş açısı aralığında sürüklenme katsayısının azalmasını sağlamıştır. Sürüklenme oranı yarık açılan silindirde maksimum %24 azalmışken; delikli silindirde bu azalma %19 ile sınırlı kalmıştır. Bu çalışmada sonuç olarak delikli ve yarıklı silindirler kıyaslandığında, yüksek rijitliğin kritik olmadığı sınırlı geliş açısı aralıklarında yarıklar tercih edilebilirken; daha geniş geliş açısı aralığında güçlü dayanıklılık gerektiren uygulamalarda eksenel delikli sistemin daha uygun bir seçenek olarak öne çıkmakta olduğu sunulmuştur.

Literatürdeki bu çalışmalar doğrultusunda delik açılmış içi boş dairesel silindirlerin art izindeki akış yapısı da ayrı bir araştırma konusu olmuştur [13,14]. İki sıra delikli boş silindirlerin art izi bölgesindeki akış karakteristiği, $Re=6900$ için delik çapı (d), delikler arası mesafe ve açı gibi farklı parametrelerin etkisi Firat ve arkadaşları [13] tarafından incelenmiştir. Delik çapı ve aralarındaki mesafeden bağımsız olarak, 0° yönlendirmesinde çıkan jet akışı büyük ölçekli girdap oluşumunu engellemiştir. Girdap kopmaları tamamen bastırılamasa bile, silindir kaynaklı kayma tabakalarının etkileşimi önemli ölçüde azalmıştır. En yüksek

delik çapı (0,2D) ve delikler arasındaki mesafe en düşük durumda (2d) iken girdap oluşumu en etkili şekilde silindirden uzağa taşımıştır. Ayrıca, 0° ile 45° arasındaki geliş açılarında akış karakteristiğinin silindir açısına duyarlı olduğu ortaya çıkarılmıştır. Böylelikle, Firat ve arkadaşları [14] delik çapı 0,2D ve delikler arasındaki mesafe 7d olan durumda, içi boş dairesel silindirin 0° ve 90° geliş açıları için art iz bölgesindeki akış yapısını ve sürüklenme katsayılarını analiz etmişlerdir. Geliş açısının 0° (akış yönünde) durumunda deliklerden çıkan akış, girdap oluşum uzunluğunu artırırken; 90° geliş açısında (enine yönlü delikler) bu uzunluğun azaldığı gözlemlenmiştir. Sürüklenme katsayısı açısından yalın silindirle kıyaslandığında, 0° geliş açısında yerleştirilen deliklerin avantajlı olduğu; buna karşın, 90° geliş açısında yerleştirilen deliklerde sürüklenme katsayısının arttığı belirlenmiştir.

Dairesel kesitli silindirin etrafına eşmerkezli olarak yerleştirilen ve farklı geçirgenlik oranlarında oluşturulan perfore silindirin etkisi hem deneysel hem de nümerik olarak detaylı şekilde incelenmiştir. Durhasan ve arkadaşları [15] yaptığı çalışmada yalın silindirin arkasında oluşan girdap kopmalarını, üzerine gömlek şeklinde yerleştirilen perfore silindir aracılığıyla incelemişlerdir. Geçirgenlik oranının %60'ın üzerinde olduğu durumlarda, silindirin çevresinde oluşan kayma tabakasının akış yönünde uzadığı tespit edilmiştir. Kuvvet ölçümleri, geçirgenlik ve çap oranına bağlı olarak sürüklenme katsayısının yalın silindire kıyasla %21 ile %87 arasında azaldığını göstermiştir. Ancak sürüklenme katsayısı, silindir çapı baz alınarak hesaplandığında, yalın silindire kıyasla daha yüksek; perfore silindirin çapı kullanıldığında ise benzer düzeyde bulunmuştur. Sun ve arkadaşları [16] ise dört farklı geçirgenlik oranına sahip perfore silindirler ile yalın silindirin art izinde oluşan akış yapısını incelemişlerdir. Geçirgenlik oranı arttıkça, perfore silindirin akış üzerindeki olumlu etkisinin de arttığı gözlemlenmiştir. Örneğin, %48 ve %67 geçirgenlik oranına sahip silindirlerde, maksimum türbülans kinetik enerjisi sırasıyla yalın silindirin %60'ı ve %20'si kadar ölçülmüştür. Bu sonuçlar, perfore silindirin gömlek şeklinde yalın silindirin üzerinde kullanıldığında girdap yapılarını oluşumunu engellerken aynı zamanda da gücünü zayıflattığı söylenebilir. An ve arkadaşları [17] tarafından gerçekleştirilen çalışmada girdap kaynaklı titreşimi azaltmak için perfore silindirin gömlek olarak etkili bir şekilde kullanılabileceğini, farklı geçirgenlik oranları için göstermişlerdir. Bununla birlikte, eğimli yerleştirmelerin bu titreşimleri daha karmaşık hale getirdiği de vurgulanmıştır. Ayrıca, yarım daire biçiminde kullanılan perfore silindirin de yalın silindirin arkasındaki girdap kopmalarını kontrol etmede etkili olduğu belirtilmiştir. Nitekim belirli geçirgenlik oranlarında ve yarım perfore silindirin uygun yay açılarıyla, maksimum Reynolds kayma gerilmesini yalın silindire kıyasla %96 oranında azaldığı ve kararsız akışın tamamen kontrol altına alındığı rapor edilmiştir [18]. Deneysel çalışmaların yanı sıra, yapılan bir sayısal çalışmada perfore silindirlerin akış kontrolü açısından etkili bir yöntem olduğu sunulmuştur [19].

Diğer taraftan dairesel silindirlere ek olarak, kare ve diyagonal kesitli silindirler üzerine farklı oranlarda açılan yarıklar da akış kontrolü perspektifinden detaylı olarak incelenmiştir [20,21]. Ayrıca, pasif yöntemlerle gerçekleştirilen akış kontrolü, yalnız silindir üzerindeki yüzey modifikasyonları ile sınırlı kalmamış [22], aynı zamanda kanat profillerine de başarıyla uygulanmıştır [23,24]. Böylelikle, literatür incelemesinden görüldüğü üzere, içi dolu silindire kontrol yöntemi olarak delik veya yarık uygulanması durumunda silindir sürüklenme katsayısının azaltılmasında ve silindir art izinde girdapların bastırılmasında etkili olduğu görülmektedir. Ancak içi boş silindir üzerine etkileri bilinmemektedir. Bu çalışma kapsamında ise, literatürdeki bu boşluğu doldurmak amacıyla, üç farklı yarık oranına ($w/D=0,04, 0,16$ ve $0,20$) sahip içi boş dairesel kesitli bir silindirin art iz bölgesindeki akış karakteristikleri, üç farklı akış geliş açısı ($\alpha=30^\circ, 45^\circ$ ve 60°) için deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler, silindir çapına göre hesaplanan $Re=10000$ değerinde gerçekleştirilmiş ve yarıklı silindirlerin sonuçları yalın silindirle karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ile hem akış geliş açısının hem de yarık oranının akış yapısı üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular, içi boş silindirlerde yarık açılması durumunda akış kontrolü ve ısı transferi uygulamalarında, farklı akış geliş açıları için önemli katkılar sağlayacaktır [25-27].

2. YÖNTEM

Bu çalışmada, su kanalında parçacık görüntülemeli hız ölçüm (PIV) yöntemi ile akış karakteristikleri ayrıca silindirler üzerine etki eden sürüklenme katsayıları ise rüzgar tüneline gerçekleştirilen kuvvet ölçüm deneyleri yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, 50 mm dış çapı (D) olan paslanmaz çelikten üretilmiş içi boş dairesel silindirler kullanılmıştır. Silindirler, 2 mm kalınlığında paslanmaz çelik levha kullanılarak imal edilmiştir. Yalın silindir (yarıksız) referans model olarak kullanılmakla birlikte, su jeti yardımıyla silindirlerin merkez hattı boyunca kesilerek yarık açılmış ve farklı yarık oranlarına sahip modeller hazırlanmıştır. Silindirlerin toplam uzunluğu 400 mm olup, yarıkların uzunluğu ise 390 mm olarak

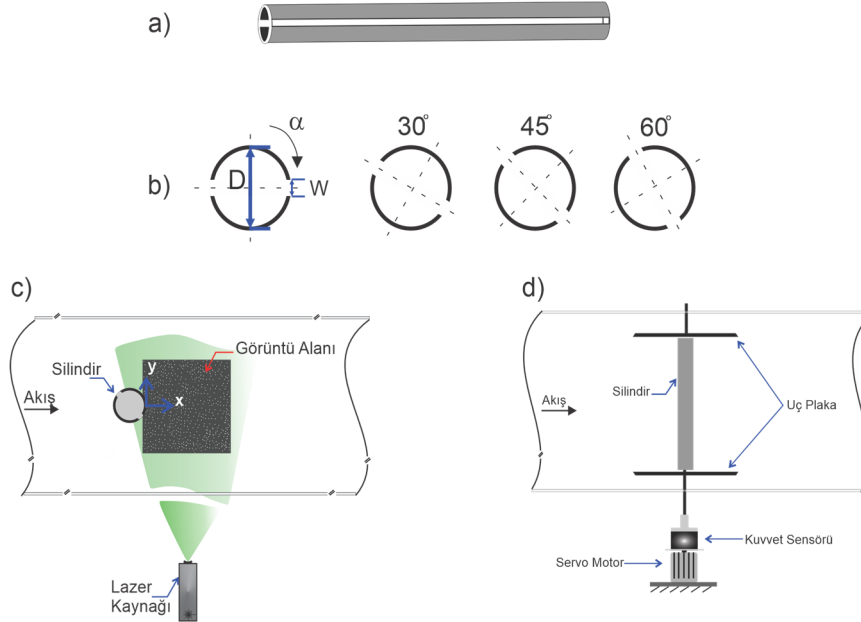
belirlenmiştir. Test edilen üç farklı durum için yarık genişlikleri (w) sırasıyla 2 mm, 8 mm ve 10 mm olarak seçilmiştir. Bu değerlerin ve silindir çapı ile boyutsuzlaştırılması ile tüm deneyler $w_1/D = 0,04$, $w_2/D = 0,16$ ve $w_3/D = 0,20$ oranlarında gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca, bu yarıklı silindirler üç farklı akış geliş açısı (ya da akışa göre hücum açısı), $\alpha = 30^\circ$, 45° ve 60° olacak şekilde akışa konumlandırılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Şekil 1a ve 1b’de sırası ile yarık açılmış içi boş silindirin ve farklı geliş açısı oryantasyonlarının şematik gösterimi sunulmuştur.

Şekil 1c’de ise su kanalı üzerine kurulan PIV düzeneği şematik olarak gösterilmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere, sistemin orijini silindirin uç noktasına yerleştirilmiştir. Görüntü alanı $145 \times 145 \text{ mm}^2$ ($2,9D \times 2,9D$) olacak şekilde ayarlanmıştır. PIV deneyleri sırasında türbülans şiddeti %1’in altında olacak şekilde silindir çapına göre Reynolds (Re) sayısının 10000 değeri için deneyler gerçekleştirilmiştir. Bunu gerçekleştirmek için, silindir çapına göre su kanalında serbest akım hızı $U_\infty = 0,23 \text{ m/s}$ ve rüzgar tüneline serbest akım hızı $U_\infty = 3,07 \text{ m/s}$ olacak şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca, seçilen Reynolds sayısı, alt kritik akış rejimindeki gerçek koşulları yansıtmak amacıyla belirlenmiştir [28–30].

Akış karakteristiklerinin belirlenmesinde, su içerisine karıştırılan gümüş kaplı parçacıklar çift darbeli Nd:YAG lazer kaynağı (100 mJ, 532 nm) ile aydınlatılmış; görüntüler ise 4 MP çözünürlüğe sahip CMOS kamera (2048×2048 piksel) ve Nikon 50 mm f/1.8 lens kullanılarak elde edilmiştir. Her deneyde 15 Hz frekansıyla 1000 görüntü alınmış, iki ardışık görüntü arası zaman farkı 1,75 ms olarak belirlenmiştir [31,32]. Görüntüler 32×32 piksel çözünürlükte ve %50 örtüşme oranı ile işlenmiş; böylece her alan için 127×127 vektörlük bir çözünürlük elde edilmiştir. Vektör alanlarının doğruluğu, FFT korelasyon yöntemi, Gauss fonksiyonu, yerel medyan filtresi ve yerel ortalama teknikleriyle sağlanmıştır. Görüntü işleme ve veri analizleri TSI tarafından geliştirilen Insight 4G yazılımı kullanılmıştır.

Şekil 1d’de kuvvet ölçüm düzeneği şematik olarak gösterilmiştir. Kuvvet ölçümleri, 1000 Hz örnekleme frekansı ile 20 saniye süresince veri toplayan bir rüzgar tüneline gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde, 50 N kapasiteli, 50 mN çözünürlüğe sahip bir kuvvet sensörü kullanılmıştır. Rüzgar tüneli deneyleri, PIV deneyleri ile tutarlı bir karşılaştırma yapılabilmesi için aynı Reynolds sayısında yürütülmüştür.

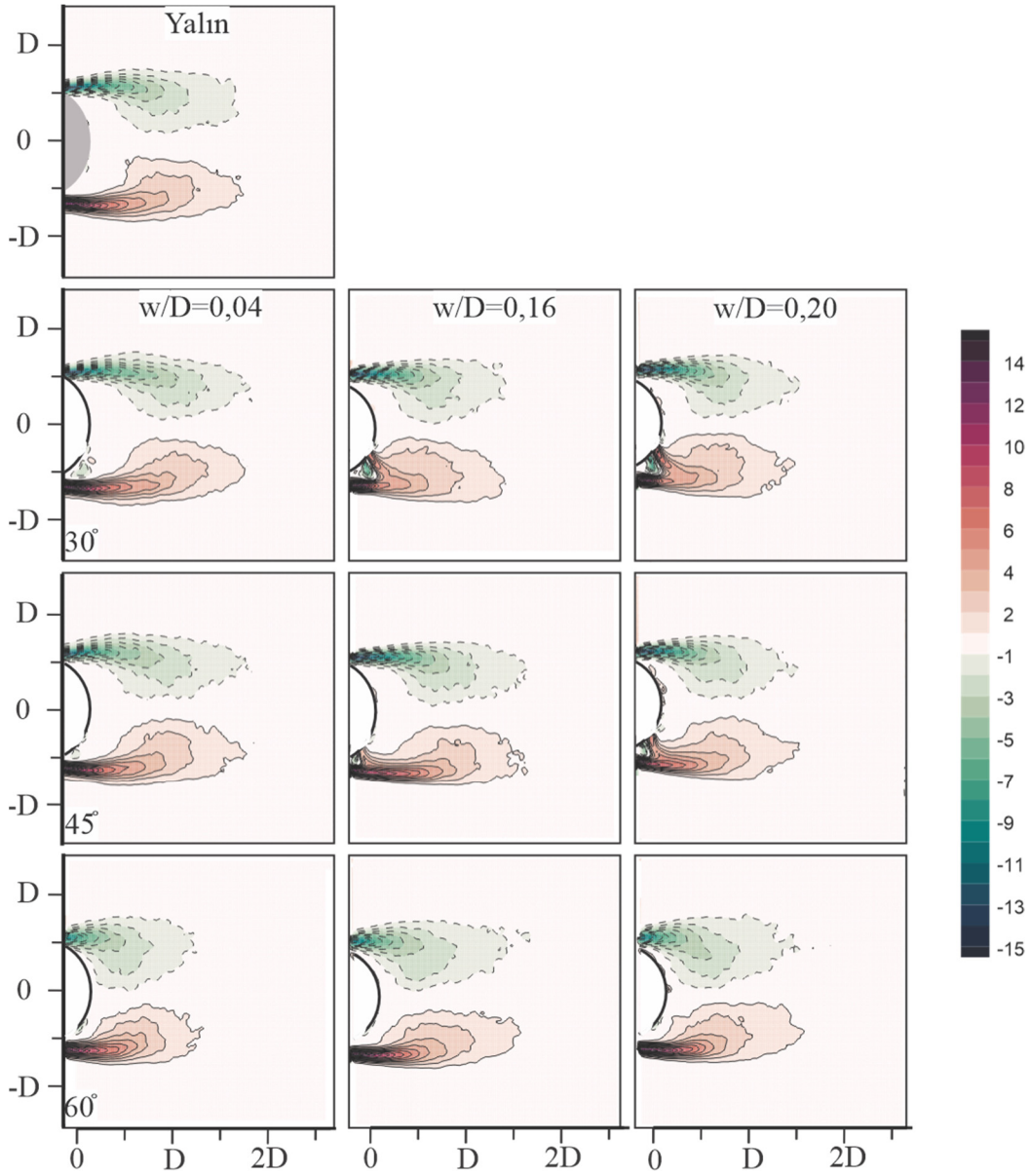


Şekil 1. Şematik deney düzeneği (a) yarık açılan içi boş silindir, (b) geliş açılarının gösterimi, (c) PIV düzeneği ve (d) kuvvet ölçüm sistemi

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

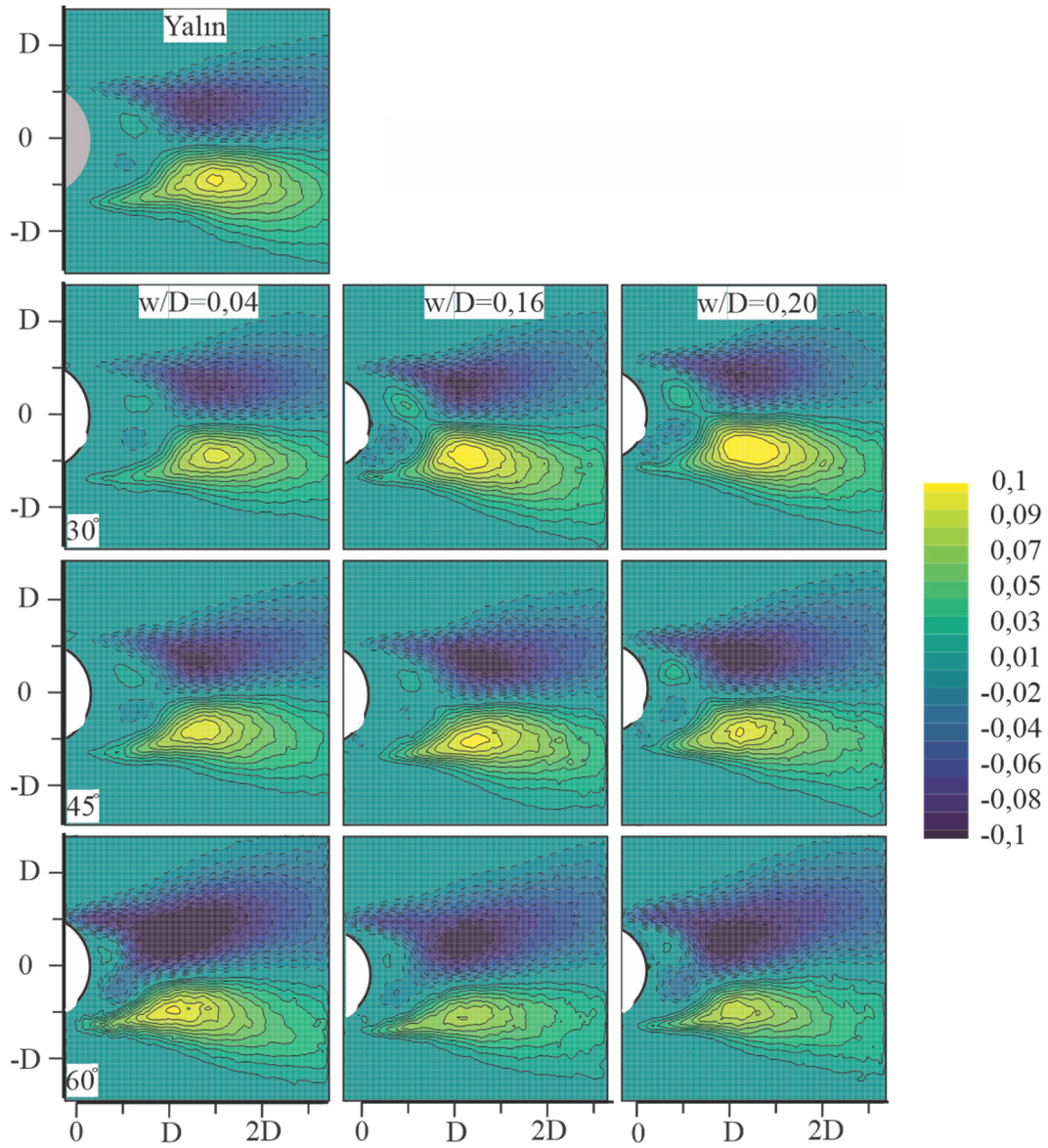
Bu kısımda, PIV ve kuvvet ölçümleri sonucu elde edilen bulgular silindirin art izindeki akış karakteristiklerini detaylı bir şekilde ortaya koymak amacıyla sunulmaktadır.

Şekil 2’de farklı yarık oranları ($w/D=0,04, 0,16$ ve $0,20$) ve akış geliş açıları ($30^\circ, 45^\circ$ ve 60°) için normalize edilmiş zaman ortalamalı girdap (ω) konturları sunulmuştur. Yalın silindir durumunda, silindir art izinde karakteristik von Karman girdap yapısının net bir şekilde oluştuğu ve pozitif-negatif girdaplı bölgelerinin simetrik bir dağılım sergilediği görülmektedir. İçi boş yarık açılmış silindirler saat yönünde döndürülerek $30^\circ, 45^\circ$ ve 60° olan durumların girdap konturları incelenmiştir. Yarıklı silindir konfigürasyonlarında, akış geliş açısı ve yarık oranının girdap yapısı üzerinde belirgin etkileri gözlenmektedir. Belirli yarık oranlarında, yarığın olduğu $y = -0,5D$ civarında (silindirin alt tarafı) oluşan jet etkisiyle hem pozitif hem de negatif girdap konturlarının oluşumu gözlemlenmiştir. 30° akış geliş açısında, $w/D=0,04$ oranı için girdap konturları yalın silindire benzer karakteristik gösterirken, yarık oranının artmasıyla ($w/D=0,16$ ve $0,20$) girdap yoğunluğunda azalma ve art iz bölgesinde simetrik olmayan bir yapı ortaya çıkmaktadır. 45° akış geliş açısında, yarık etkisi $w/D=0,04$ ve $0,16$ durumları için yalın silindire benzer bir durum gösterirken; $w/D=0,20$ oranında girdap konturları silindire yaklaşılmaya başlamış ve konturların genişliği azalmıştır. 60° akış geliş açısında ise, tüm yarık oranları için girdap yapısının en fazla değişime uğradığı görülmektedir. Bu durumda, yarığın akışa etkisi maksimum seviyeye ulaşmış olup girdap konturları bütün durumlar için silindir yüzeyine yaklaştığı gözlemlenmektedir. Ayrıca, yarıklı silindirlerin saat yönünde dönmelerinden dolayı negatif girdap konturlarının genişliği pozitif olanlara göre daha fazla olduğu bu açı değeriinde daha net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 2. Zaman ortalamalı girdap (ω) konturları

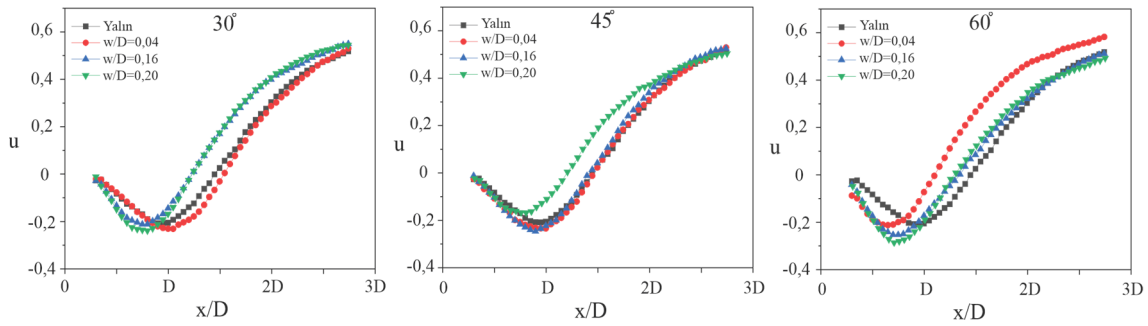
Şekil 3'te bütün yarık oranları ve akış geliş açıları için normalize edilmiş Reynolds kayma gerilmesi ($u'v'/U_\infty^2$) konturları gösterilmiştir. Yalın silindir durumunda, silindir art izinde yoğun Reynolds kayma gerilmesi bölgelerinin oluştuğu ve bu bölgelerin simetrik bir dağılım sergilediği görülmektedir. Maksimum kayma gerilmesi değerleri silindir yakın art iz bölgesinde ($x/D \approx 1,5$) yoğunlaşmıştır. 30° akış geliş açısında, $w/D = 0,04$ oranı için Reynolds kayma gerilmesi dağılımı yalın silindire benzer karakteristik göstermekte ancak yarık varlığının etkisiyle kayma gerilmesi yoğunluğunda bir azalma gözlenmektedir. Yarık oranının $w/D = 0,16$ ve $0,20$ değerlerine artmasıyla, kayma gerilmesi bölgelerinin genişlemeye başladığı ve yarığın yönlenme durumundan dolayı pozitif $u'v'$ değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, yarıktan geçen akışın momentum transferini etkilediğini ve türbülans yapısını modifiye ettiğini göstermektedir. 45° akış geliş açısında, yarıktan oluşan momentum transferinin etkisi bütün yarık oranları için yalın silindire benzer sonuçlar göstermesine rağmen; tüm durumlarda maksimum $u'v'$ lokasyonu silindir yüzeyine yaklaşmıştır. 60° akış geliş açısında ise, artan yarık oranları için pozitif Reynolds kayma gerilmesi değerlerinin azaldığı görülmektedir. Ancak, negatif kayma değerleri jetin etkisiyle hem silindir yüzeyine yaklaşmışlardır hem de genişlik oranları artmıştır.



Şekil 3. Reynolds kayma gerilmesi ($u'v'$) konturları

Farklı akış geliş açıları için silindir orijininden akış yönü normalize edilmiş hız dağılımı Şekil 4'te sunulmuştur. Bu şekil sayesinde, art iz bölgesindeki hız profilinin yarık oranına bağlı değişimini açıkça ortaya koymaktadır. Yalın silindir durumunda hız profili art izinde ters akış bölgesinden dolayı önce negatif

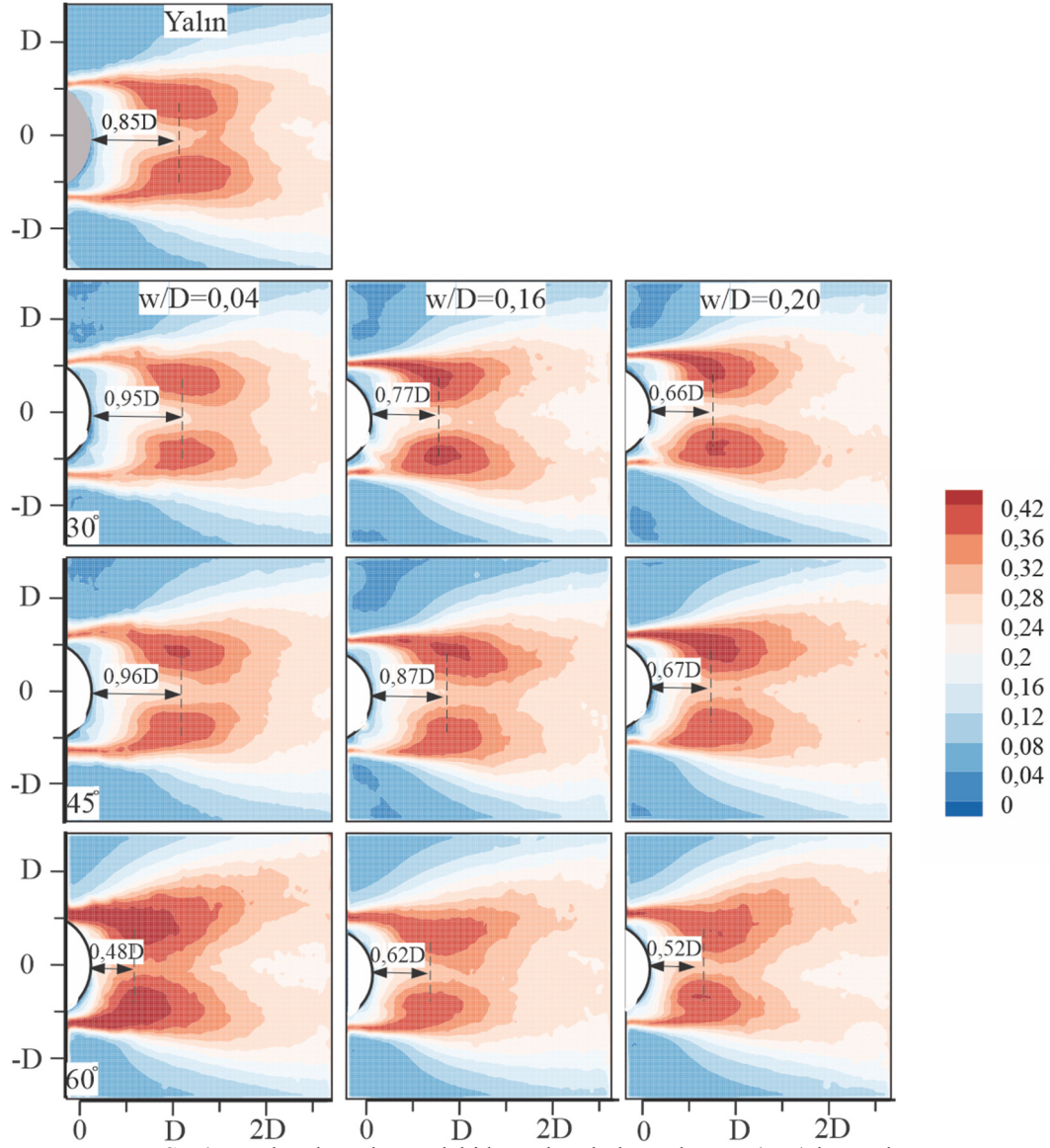
değerler aldığı daha sonra pozitif değerler olarak art izinin toparlandığı görülmektedir. 30° akış geliş açısında, $w/D=0,04$ konfigürasyonu, yalın silindire benzer bir davranış sergilemektedirler. Yarık oranının artmasıyla, hız profilleri art iz bölgesinde daha hızlı toparlandığı gözlemlenmektedir. 45° akış geliş açısına geldiğimizde, $w/D=0,04$ ve 0,16 yarık oranlarının hız profilleri yalın silindir ile yakın bir eğilim içinde oldukları gözlemlenmiştir. $w/D=0,20$ oranında minimum hız değerinin iyileşme olduğu görülürken, art izinin silindire daha yakın konumda toparlandığı gözlemlenmiştir. 60° akış geliş açısında ise, yarıklı silindirlere minimum hız daha düşük değerler almakla birlikte konumu silindir yüzeyine doğru kaymıştır. En düşük yarık oranı olan $w/D=0,04$ minimum hız değerleri artarak silindir art izinin toparlanması hızlanmıştır. Buna karşılık $w/D=0,16$ ve 0,20 profilleri daha düşük minimum değerler alması sonucu art izi daha yavaş bir toparlanma sergilemiştir. Dikkat çekici olan, bu akış geliş açısında yarıklı silindirlere hız profillerinin çok daha hızlı toparlanması olarak not düşülebilir. Sonuç olarak, yarıklı silindirlere hem yarık oranının hem de akış geliş açısının art izde oluşan ters akış bölgesinin büyüklüğü ve toparlanma mesafesi üzerinde belirleyici rol oynadığını ortaya konmuştur. Küçük yarık oranlarında özellikle yüksek açılarda, ters akış bölgesinin kısalması silindir yüzeyine yaklaştığı, büyük yarık oranlarında ise ters akış bölgesinin büyük geliş açıları için uzadığı gözlemlenmiştir.



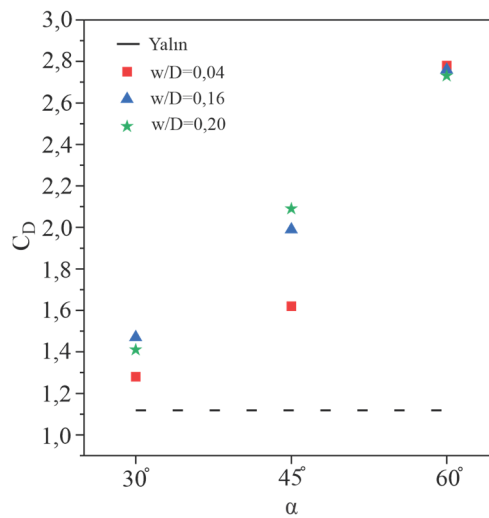
Şekil 4. Ortalama akış hızı (u) dağılımının 30°, 45° ve 60° geliş açıları için gösterilmesi

Şekil 5'te ise normalize edilmiş akış doğrultusundaki hızın karekök ortalaması (u_{rms}/U_∞) sunulmuştur. Ayrıca, şekil üzerinde maksimum u_{rms} lokasyonların uzunluğu girdap oluşum uzunluğunu göstermektedir [33]. Yalın silindir durumunda, maksimum u_{rms} değerlerinin konumu silindirin uç noktasında 0,85D mesafede yer almaktadır. u_{rms} konturları, silindir art izinde yoğun türbülans bölgelerinin simetrik dağılımını göstermektedir. 30° ve 45° akış geliş açılarındaki yarık etkisinin girdap oluşum uzunluğu üzerinde belirgin etkileri gözlemlenmektedir. 30° ve $w/D=0,04$ oranı için girdap oluşum uzunluğu 0,95D'ye artarken, $w/D=0,16$ ve 0,20 oranlarında sırasıyla 0,77D ve 0,66D'ye azalmaktadır. Bu durum, artan yarık oranının girdap oluşumunu silindire daha yakın bölgelerde oluşmasına neden olduğunu ve akış yapısını önemli ölçüde modifiye ettiğini göstermektedir. 45° için ise $w/D=0,04$ oranında girdap oluşum uzunluğu 0,96D seviyesinde kalırken, $w/D=0,16$ ve 0,20 oranlarında sırasıyla 0,87D ve 0,67D değerlerine ulaşmaktadır. Bu akış geliş açısında yoğun u_{rms} değerlerinin de yarığın pozisyonlanmasından dolayı silindirin üst tarafına doğru yöneldiği ve türbülans yoğunluğunun belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. 60° geliş açısında ise, yarık etkisinin en dramatik sonuçları ortaya çıkmaktadır. $w/D=0,04$ oranında girdap oluşum uzunluğu 0,48D'ye düşerek yalın silindire göre %42 oranında silindir yüzeyine yaklaştığını göstermektedir. $w/D=0,16$ ve 0,20 oranlarında ise sırasıyla 0,62D ve 0,52D değerleri elde edilmiştir. Bu akış geliş açısında, maksimum u_{rms} değerlerinin artan yarık oranı ile azaldığı belirlenmiştir.

Şekil 6'da ise sürüklenme katsayısı (C_D) değerleri yalın silindir ve yarık açılan silindirlere farklı akış geliş açıları için sunulmuştur. Yalın dairesel silindir için kesikli çizgi ile gösterilen değer literatürde benzer şartlar için görülmektedir [34–36]. Yarıklı silindir konfigürasyonlarında ise akış geliş açısı ve yarık oranına bağlı olarak belirgin değişimler gözlemlenmektedir. Artan akış geliş açısı ile birlikte C_D değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir. 60° akış geliş açısında ise, yarık geometrisinin akış üzerindeki etkisinin maksimum seviyeye çıktığını ve yarık oranından bağımsız olarak benzer sürüklenme karakteristiği sergilendiğini göstermektedir. Benzer şekilde literatürde, artan akış geliş açısı ile birlikte C_D değerinin arttığı gözlemlenmektedir [11]. Ayrıca, bu çalışmadan elde edilen C_D değerlerinin, yarık pozisyonun akışa göre dik ya da paralel konumlanmasından daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir [10]. Bunun nedeni, yarık aracılığıyla içi boş silindirlere daha fazla akış nüfuz etmesi sonucu silindir üzerinde ek bir basınç kaybına yol açmakta ve momentum transferindeki değişim nedeniyle artan açı ile birlikte C_D değerinin bir plato seviyesine ulaşmasıdır.



Şekil 5. Akış doğrultusundaki hızın karekök ortalaması (u_{rms}) konturları



Şekil 6. Sürüklenme katsayısı (C_D) dağılımı

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında yarık açılmış içi boş dairesel silindirin art izindeki akış yapısı akışın geliş açısına göre 30°, 45° ve 60° durumları deneysel olarak Reynolds sayısının (Re) 10000 olduğu durum için incelenmiştir. Yarıklar saat yönünde döndürülerek bu açı dereceleri elde edilmiş ve akış karakteristikleri ortaya çıkarılmıştır. Genel olarak elde edilen sonuçlar:

- Yarıklı silindirler, silindirin alt tarafında oluşturdıkları jet etkisiyle ek girdap konturları meydana getirmişlerdir. Küçük yarık oranlarında ($w/D=0,04$) girdap genişliği yalın silindire yakın kalırken, yüksek oranlarda ($w/D=0,16 - 0,20$) genişlik azalmış ve girdap konturlarının simetrik yapısı düzensizleşmiştir.
- Hız profillerine baktığımızda, 30° ve 45° akış geliş açılarında daha büyük yarık oranları için minimum hız değerlerinde iyileşme olduğu belirlenirken, art izinin silindire daha yakın konumda toplanmasına neden olmuş ve 60°'de $w/D=0,04$ için minimum hız değerleri artarak silindir art izinin toplanması hızlanmıştır.
- Artan yarık oranı, Reynolds kayma gerilmesi konturlarının genişliği artmış ve u_{rms} maksimum lokasyonunu silindir yüzeyine yaklaştırmıştır. Girdap oluşum uzunluğu, $w/D=0,04$ için 30° ve 45° akış geliş açılarında yalın silindire göre artarken, $w/D = 0,20$ 'de belirgin biçimde kısalmıştır. 60° akış geliş açısı için ise tüm yarık oranlarında girdap oluşum uzunluğu yalın silindire göre azalmış olduğu gözlemlenmiştir.
- Yarıktan içeri nüfuz eden akıştan dolayı içi boş silindir üzerine sürüklenme kuvvetinin arttığı gözlemlenmiştir. C_D değerleri akış geliş açısıyla birlikte artmış; 60°'de yarık oranından bağımsız olarak benzer sürüklenme seviyeleri elde edilmiştir.

Elde edilen bulgular, art iz akış karakteristiğini inceleme de yarık oranı ve akışın geliş açısının eşzamanlı optimizasyonunun önemini vurgulamaktadır.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışmada kullanılan PIV ölçümleri için laboratuvar imkânı sağlayan Sakarya Üniversitesi'nden Doç. Dr. Nehir Tokgöz'e ve rüzgar tüneli deneyleri için laboratuvar desteği veren Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi'nden Doç. Dr. Tahir Durhasan'a teşekkür ederim.

6. KAYNAKLAR

1. Rockwell, D. (1998). Vortex-body interactions. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 30(1), 199-229.
2. Karasu, İ. & Tümse, S. (2021). The turbulence intensity effect on the flow characteristics and aerodynamics of a circular cylinder. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(4), 901-912.
3. Rashidi, S., Hayatdavoodi, M. & Esfahani, J.A. (2016). Vortex shedding suppression and wake control: A review. *Ocean Engineering*, 126, 57-80.
4. Feshalami, B.F., He, S., Scarano, F., Gan, L. & Morton, C. (2022). A review of experiments on stationary bluff body wakes. *Physics of Fluids*, 34(1), 011301.
5. Thompson, M.C., Lewke, T. & Hourigan, K. (2021). Bluff bodies and wake-wall interactions. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 53(1), 347-376.
6. Choi, H., Jeon, W.-P. & Kim, J. (2008). Control of flow over a bluff body. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 40, 113-139.
7. Ran, Y., Deng, Z., Yu, H., Chen, W. & Gao, D. (2023). Review of passive control of flow past a circular cylinder. *Journal of Visualization*, 26(1), 1-44.
8. Gao, D.-L., Chen, W.-L., Li, H. & Hu, H. (2017). Flow around a circular cylinder with slit. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 82, 287-301.
9. Viets, H. (1975). Flip-flop jet nozzle. *AIAA Journal*, 13(10), 1375-1379.
10. Aksoy, M.M. (2025). Experimental investigation of wake flow characteristics of slotted hollow circular cylinder. *Ocean Engineering*, 341, 122584.

11. Gao, D.-L., Chen, W.-L., Li, H. & Hu, H. (2017). Flow around a slotted circular cylinder at various angles of attack. *Experiments in Fluids*, 58(10), 132.
12. Kim, J., Chae, S. & Kim, J. (2023). Flow control over a circular cylinder using a slot and axially arranged holes. *Ocean Engineering*, 287, 115794.
13. Firat, E., Ozkan, G.M. & Akilli, H. (2017). PIV measurements in the near wakes of hollow cylinders with holes. *Experiments in Fluids*, 58(5), 39.
14. Firat, E., Ozkan, G.M. & Akilli, H. (2019). Flow past a hollow cylinder with two spanwise rows of holes. *Experiments in Fluids*, 60(11), 163.
15. Durhasan, T., Pinar, E., Ozkan, G.M., Akilli, H. & Sahin, B. (2019). The effect of shroud on vortex shedding mechanism of cylinder. *Applied Ocean Research*, 84, 51-61.
16. Sun, C., Azmi, A.M., Zhu, H., Zhou, T. & Cheng, L. (2021). Experimental study on wake structures of a circular cylinder enclosed in a screen shroud using PIV. *Ocean Engineering*, 230, 109056.
17. An, M., Li, S., Sorokin, V., Chen, Z. & Flay, R.G.J. (2024). Experimental study of vortex-induced vibration of stay cables installed with two types of perforated shroud light devices. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 253, 105882.
18. Özkan, G.M., Durhasan, T. & Pinar, E. (2020). Kavisli delikli plaka ile girdap kaynaklı türbülanslı akışın kontrolü. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(4), 1021-1030.
19. Tunay, T. (2023). Numerical investigation of the passive flow control around a circular cylinder. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(1), 243-252.
20. Karasu, İ. (2020). Flow control over a diamond-shaped cylinder using slits. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 112, 109992.
21. Durhasan, T. (2020). Flow topology downstream of the hollow square cylinder with slots. *Ocean Engineering*, 209, 107518.
22. Ekinci, F., Durhasan, T. & Akilli, H. (2023). Silindir art izindeki daimi olmayan girdapların kılavuz plakalar yardımı ile bastırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(3), 593-601.
23. Güler, E., Pinar, E. & Durhasan, T. (2024). The effect of riblets on the aerodynamic performance of NACA 0018 airfoil. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(1), 119-132.
24. Eroğlu, A.E., Durhasan, T., Jafari, J.R. & Karasu, İ. (2025). Experimental investigation of local flexible surface on Aerodynamic Effects for Finite Wing with NACA0018 Section. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 40(1), 61-68.
25. Hsu, L.-C. (2021). Heat transfer of flow past a cylinder with a slit. *International Journal of Thermal Sciences*, 159, 106582.
26. Anh, D.T., Dan, T.C., Thanh, P.N., Tanim, A.H., Wright, D., Pham, N.T. & Nguyen Anh, T. (2025). Hydraulic performance and wave transmission through nature-inspired perforated hollow-base piles breakwater. *Ocean Engineering*, 322, 120423.
27. Taj, Z.U.D., Bista, S. & Balachandar, R. (2025). Passive flow control in the wake of bed-mounted cylinders: A review and new experimental insights. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 11, 1595832.
28. Lin, J.-C., Towfighi, J. & Rockwell, D. (1995). Instantaneous structure of the near-wake of a circular cylinder: On the effect of Reynolds number. *Journal of Fluids and Structures*, 9(4), 409-418.
29. Derakhshandeh, J.F. & Alam, M.M. (2019). A review of bluff body wakes. *Ocean Engineering*, 182, 475-488.
30. Lekkala, M.R., Latheef, M., Jung, J.H., Coraddu, A., Zhu, H., Srinil, N., Lee, B.-H. & Kim, D.K. (2022). Recent advances in understanding the flow over bluff bodies with different geometries at moderate Reynolds numbers. *Ocean Engineering*, 261, 111611.
31. Tokgoz, N. (2019). Experimental and numerical investigation of flow structure in a cylindrical corrugated channel. *International Journal of Mechanical Sciences*, 157-158, 787-801.
32. Durhasan, T. (2020). Passive flow control over an airfoil by control rod at low Reynolds number. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 13(06), 1819-1933.
33. Zhu, H., Zhao, H. & Zhou, T. (2019). Direct numerical simulation of flow over a slotted cylinder at low Reynolds number. *Applied Ocean Research*, 87, 9-25.
34. Breuer, M. (2000). A challenging test case for large eddy simulation: High Reynolds number circular cylinder flow. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21(5), 648-654.
35. Yuce, M.I. & Kareem, D.A. (2016). A numerical analysis of fluid flow around circular and square cylinders. *Journal AWWA*, 108(10), 546-554.
36. Najafi, L., Firat, E. & Akilli, H. (2016). Time-averaged near-wake of a yawed cylinder. *Ocean Engineering*, 113, 335-349.

Betonarme Binaların Yapısal Düzensizliklerinin 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine Göre İncelenmesi

Cemal TOLONAY^{1,a}, Beytullah TEMEL^{1,b}

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye

^aORCID: 0009-0009-3148-729X; ^bORCID: 0000-0002-1673-280X

Makale Bilgileri

Geliş : 30.04.2025

Kabul : 11.10.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1685970

Sorumlu Yazar

Cemal TOLONAY

cemaltolonay@gmail.com

Anahtar Kelimeler

Doğrusal analiz

Eşdeğer deprem yükü yöntemi

Türkiye bina deprem yönetmeliği 2018

Yapı düzensizlikleri

Atıf şekli: TOLONAY, C., TEMEL, B., (2025). Betonarme Binaların Yapısal Düzensizliklerinin 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine Göre İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(4), 789-802.

ÖZ

Bu çalışmada, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018)'in uygulanmasına ve aynı kat planına, açıklıkları bulunan farklı kat sayısına sahip yapıların analizlerine yer verilmiştir. İlk örnekte 11 katlı betonarme perde ve çerçeveli sistem Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi'ne göre analiz edilmiştir. İkinci örnekte kat planı ve açıklıkları birinci örnek ile aynı olan yapının kat sayısı 25'e çıkartılarak eşdeğer deprem yükü yöntemi sınır şartlarının ve uygulama sınırlamalarının neler olduğuna dikkat çekilmiştir. İki örneğinde ön boyutlandırılması ayrı ayrı yapılarak farklı taşıyıcı sistem kesitleri belirlenmiştir. İki örneğin modellenmesinde ve analizinde SAP2000 paket programı kullanılmıştır. Yönetmeliğin önerdiği ön boyutlandırma koşullarına uyulması ve betonarme perde oranlarına uyulması halinde kesitlerin bu çalışma için yeterli olduğu gözlenmiştir. Kat sayısının artırılmasıyla ön boyutlandırılması tekrar yapılan yapının Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi'nin sınır şartını sağlamadığı, düzensizlik durumlarını sağladığına dikkat çekilmiştir.

Investigation of Structural Irregularities of Reinforced Concrete Buildings According to 2018 Turkish Building Earthquake Code

Article Info

Received : 30.04.2025

Accepted : 11.10.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1685970

Corresponding Author

Cemal TOLONAY

cemaltolonay@gmail.com

Keywords

Equivalent earthquake load method

Structural irregularities

Turkish building earthquake code-2018

Linear analysis

How to cite: TOLONAY, C., TEMEL, B., (2025). Investigation of Structural Irregularities of Reinforced Concrete Buildings According to 2018 Turkish Building Earthquake Code. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(4), 789-802.

ABSTRACT

This study addresses the implementation of the Turkish Building Earthquake Code 2018 (TBEC 2018) and the analyses of structures with identical floor plans and span configurations but with different numbers of stories. In the first example, an 11-story reinforced concrete structure with shear walls and frames was analyzed using the Equivalent Seismic Load Method. In the second example, the number of stories of the structure, which had the same floor plan and spans as the first, was increased to 25 in order to emphasize the boundary conditions and application limitations of the Equivalent Seismic Load Method. Preliminary sizing was performed separately for both examples, and different cross-sections of the structural members were determined. The modeling and analysis of both examples were carried out using the SAP2000 software package. It was observed that, when the preliminary sizing criteria and the shear wall ratios recommended by the code were satisfied, the cross-sections were adequate for the purposes of this study. It was further highlighted that, with the increase in the number of stories and the repetition of preliminary sizing, the structure exceeded the boundary values of the Equivalent Seismic Load Method, although the irregularity conditions were still satisfied.

1. GİRİŞ

Son yıllarda Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği [1] üzerine yapılan akademik çalışmalar hız kazanmış ve farklı yapı tiplerine yönelik kapsamlı analizler gerçekleştirilmiştir. Örneğin, yüksek katlı binalarda doğrusal olmayan analiz yöntemlerinin uygulanması [2], bodrum perde düzenlerinin etkilerinin incelenmesi [3] ve düzensizlik tiplerinin performans üzerindeki rolü [4] literatüre önemli katkılar sunmaktadır.

Betonarme binalarda meydana gelen düzensizlikler özellikle düşeyde yumuşak kat, burulma düzensizliği, kütle ve rijitlik düzensizlikleri deprem sırasında yapının performansını olumsuz etkileyerek ciddi hasarlara ve hatta göçmelere yol açabilmektedir. Türkiye gibi yüksek sismik yapıya sahip bir ülkede, bu tür düzensizliklerin yapısal sistem içerisinde doğru şekilde tanımlanması ve projelendirme aşamasında gerekli önlemlerin alınması hayati öneme sahiptir.

Karasu [5], artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemi ile 3 katlı betonarme yapının deprem performansını incelemiş ve yöntemin düşük katlı yapılarda güvenilir sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Kürkcü [6], betonarme yüksek yapılarda doğrusal olmayan analizler gerçekleştirerek, yapının deformasyonlarının performans kriterleri üzerindeki etkilerini belirlemiştir. Özaydın [7], TBDY-2018 ve TS500-2000 kriterlerine göre $BYS=1$ olan bir yapının düzensizliklerini analiz etmiş, bu düzensizliklerin yapı performansını olumsuz yönde etkilediğini göstermiştir. Kapıdaş [8], TBDY-2018'e göre farklı BYS değerlerine sahip iki yapıyı ETABS programında karşılaştırmış ve özellikle yatay-düşey yükler altındaki davranış farklılıklarını vurgulamıştır. Akçora [2], TBDY-2018 kapsamında tasarlanan 30 katlı bir yüksek yapıda 11 adet gerçek deprem kaydıyla doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz yapmış, kayıtların 90° döndürülerek çift yönlü etkiler de dikkate alınması sonucunda yapı performansının farklı deprem yönlerinde değişiklik gösterdiğini ortaya koymuştur. Gökçeoğlu [3], 26 katlı bir yapıda bodrum perdelerinin sürekliliğini incelemiş, perdelerin özellikle çok katlı yapılarda yatay rijitlik ve dayanım açısından kritik rol oynadığını göstermiştir. İbiş [9], dayanıma göre tasarlanan betonarme bir yapıda mod birleştirme yöntemi ile görelî kat ötelemeleri ve ikinci mertebe etkilerini analiz etmiş, sonuçta düzensizliklerin yapı güvenliği üzerinde belirleyici olduğunu vurgulamıştır. Zengin [10], 31 katlı bir betonarme yapıyı TBDY-2018'e göre analiz etmiş, düzensizlik kontrollerini gerçekleştirmiş ve tasarım sürecinde yönetmelik kriterlerinin önemini ortaya koymuştur. Temiz [11], A1 ve A3 tipi düzensizliklere sahip 10 katlı betonarme bir yapıyı inceleyerek, şekil değiştirmeye dayalı tasarım yaklaşımının özellikle düzensiz yapılarda performansın doğru değerlendirilmesi açısından uygun olduğunu belirtmiştir. Karaca [12], bodrum katın deprem performansı üzerindeki etkisini incelemiş ve bodrumlu yapıların deprem performansının bodrumsuz yapılara kıyasla daha güvenli olduğunu göstermiştir. Sezgin [13], kolon süreksizliği içeren 7 katlı bir yapıyı hem DBYBHY-2007 hem de TBDY-2018'e göre analiz etmiş, yeni yönetmeliğin düzensizlik kontrollerinde daha güvenilir sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Sönmez [14], 16 katlı bir yapının iki farklı yönetmelik kapsamında analizlerini yaparak, TBDY-2018'in daha gerçekçi performans değerlendirmeleri sağladığını vurgulamıştır. Sağlam [15], 27 katlı bir betonarme yapının tasarımında doğrusal elastik ötesi analiz yöntemini kullanmış ve dayanıma göre tasarım yaklaşımının yüksek yapılarda kritik önem taşıdığını belirtmiştir. Nomoğlu [4], perde duvarların konum, yoğunluk ve geometri değişkenlerini dikkate aldığı analizlerinde, bu değişkenlerin yapı davranışını doğrudan etkilediğini ve uygun perde düzenlemeleri ile düzensizliklerin azaltılabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca bodrum katlarda perde kullanımının yapı performansını artırdığı sonucuna ulaşmıştır. Alhamoudialaloush [16], farklı spektral ivme düzeylerini dikkate alarak, artan ivme değerlerinin daha fazla perde duvar kullanımını gerektirdiğini ve tünel kalıp sistemlerinin bu bağlamda daha başarılı sonuçlar verdiğini göstermiştir. Özcan [17], bodrum katında perde bulunan ve bulunmayan betonarme yapıları karşılaştırarak, bodrumlu-perdeli sistemlerin deprem güvenliği bakımından daha avantajlı olduğunu ortaya koymuştur.

Bu çalışmada kat planı, açıklıkları aynı olan 2 farklı yüksekliğe (kat sayısına) sahip örnek problemin ön boyutlandırması ve deprem hesapları yapılmıştır. Çerçeve-perdeli 11 katlı yapının analizlerinde eşdeğer deprem yükü yöntemi kullanılmıştır. İkinci örnek olan 25 katlı çerçeve-perdeli yapıda ise $BYS=1$ olması ve eşdeğer deprem yükü yönteminin sınır şartlarının sağlanmadığı hesaplarla gösterilmiştir. Eşdeğer deprem yükü sınır şartını sağlamayan 25 katlı yapı yapısal düzensizlikleri sağladığı vurgulanmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada yer verilen iki örnek problemin analizlerine ilişkin kılavuz olarak TBDY-2018'in [1] Öngörülen hesaplama yöntemleri ve inşaat kurallarına ilişkin kullanılan kavramlar ve temel ilkeler açıklanmaktadır. Deprem tehlikesi haritalarında, yapının tasarımında dikkate alınacak herhangi bir deprem yer hareketi düzeyine göre spektral parametreler belirlenmiştir. Harita, kapsamlı analizlerle birlikte 6-8 km'lik bölgelere ayrılmıştır. Deprem tehlike haritalarına web adresi <https://tdth.afad.gov.tr> [18] üzerinden erişilerek gerekli bilgilere ulaşılabilmesi için giriş yaptıktan sonra zemin sınıfı değeri, deprem yer hareketi düzeyi ve yapının konumu web adresine tanımlanmıştır.

Çizelge 1. Bina önem katsayısı (I) [1]

Bina kullanım sınıfı	Binanın kullanım amacı	Bina önem katsayısı (I)
BKS = 1	Deprem sonrası kullanımı gereken binalar, insanların uzun süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar, değerli eşyanın saklandığı binalar ve tehlikeli madde içere binalar a) Deprem sonrasında hemen kullanılması gerekli binalar b) Okullar, diğer eğitim bina ve tesisleri, yurt ve yatakhaneler, askeri kışlalar, cezaevleri, vb. c) Müzeler d) Toksik, patlayıcı, vb. özellikleri olan maddelerin bulunduğu veya depolandığı binalar	1,5
BKS = 2	İnsanların kısa süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar	1,2
BKS = 3	Diğer binalar (Konut, işyerleri, oteller, bina türü endüstri yapıları, vb.)	1,0

Öncelikle binanın kullanım amacına göre Çizelge 1 kullanılarak bina önem katsayısı (I) ve bina kullanım sınıfı (BKS) katsayısı bilgilerine ulaşılmıştır. Çizelge 1'den elde edilen veriler ile Çizelge 2' den deprem tasarım sınıfı (DTS) belirlenmektedir.

Çizelge 2. Deprem tasarım sınıfı [1]

DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde kısa periyot spektral ivme katsayısı (S_{DS})	Bina kullanım sınıfı	
	BKS=1	BKS= 2, 3
$S_{DS} < 0,33$	DTS = 4a	DTS = 4
$0,33 \leq S_{DS} < 0,5$	DTS = 3a	DTS = 3
$0,50 \leq S_{DS} < 0,75$	DTS = 2a	DTS = 2
$0,75 \leq S_{DS}$	DTS = 1a	DTS = 1

Deprem hesabı açısından, bina yüksekliği, binanın tabanından ölçülen toplam yüksekliği olarak tanımlanır. Deprem etkisi altında yapılan tasarımlar, binaların yüksekliklerine göre sekiz farklı Bina Yükseklik Sınıfı'na (BYS) ayrılmaktadır. Bu sınıflandırmalara dahil olan binaların yükseklik aralıkları, deprem tasarım sınıflarına bağlı olarak Çizelge 3'te belirtilmiştir.

Deprem etkisi altında istenmeyen davranışlara yol açabilecek ve inşa edilmesinden kaçınılması gereken yapılar, düzensiz binalar olarak tanımlanmaktadır. Bu binaların düzensizlik kontrolleri, TBDY 2018'de belirtilen ilkelere göre gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3. Net yüksekliğe göre BYS tayini [1]

Bina yükseklik sınıfı	Bina yükseklik sınıfları ve deprem tasarım sınıflarına göre tanımlanan bina yükseklik aralıkları [m]		
	DTS = 1, 1a, 2, 2a	DTS = 3, 3a	DTS = 4, 4a
BYS = 1	$H_N > 70$	$H_N > 91$	$H_N > 105$
BYS = 2	$56 < H_N \leq 70$	$70 < H_N \leq 91$	$91 < H_N \leq 105$
BYS = 3	$42 < H_N \leq 56$	$56 < H_N \leq 70$	$56 < H_N \leq 91$
BYS = 4	$28 < H_N \leq 42$	$42 < H_N \leq 56$	
BYS = 5	$17,5 < H_N \leq 28$	$28 < H_N \leq 42$	
BYS = 6	$10,5 < H_N \leq 17,5$	$17,5 < H_N \leq 28$	
BYS = 7	$7 < H_N \leq 10,5$	$10,5 < H_N \leq 17,5$	
BYS = 8	$H_N \leq 7$	$H_N \leq 10,5$	

Dayanıma göre tasarım yaklaşımı dikkate alınarak deprem yükü katsayılarının bulunmasında Eşitlik 1 ve 2 kullanılacaktır. Burada H_N net bina yüksekliği, bina taban kotundan çatı döşemesine kadar ölçülen mesafe olarak tanımlanmıştır.

$$R_a(T) = \frac{R}{I} \quad T > T_B \quad (1)$$

$$R_a(T) = D + \left(\frac{R}{I} - D\right) \frac{T}{T_B} \quad T \leq T_B \quad (2)$$

Düğüm noktasına etkiyen tekil yükler Eşitlik 3 ile tanımlanır.

$$w_j^{(S)} = w_{Gj}^{(S)} + n w_{Qj}^{(S)} \quad ; \quad m_j^{(S)} = \frac{w_j^{(S)}}{g} \quad (3)$$

Bu bölümde ele alınan binaların deprem hesaplarında, modal analiz yöntemlerinden herhangi biri (mod birleştirme yöntemi veya mod toplama yöntemi) kullanılabilir. Eşdeğer deprem yükü yönteminin uygulanabileceği binalar, Çizelge 4'te yer almaktadır.

Ele alınan (X) deprem doğrultusunda, binanın tamamına etki eden toplam eşdeğer deprem yükü, taban kesme kuvveti $V_{tE}^{(X)}$ Eşitlik 4 kullanılarak hesaplanacaktır.

$$V_{tE}^{(X)} = m_t S_{aR}(T_p^{(X)}) \geq 0,04 m_t I S_{DS} g \quad (4)$$

Çizelge 4. Eşdeğer deprem yükü uygulanması için izin verilen aralıklar [1]

Bina türü	İzin verilen bina yükseklik sınıfı	
	DTS = 1, 1a, 2, 2a	DTS = 3, 3a, 4, 4a
Her bir katta burulma düzensizliği katsayısının $\eta_{bi} \leq 2,0$ koşulunu sağladığı ayrıca B2 türü düzensizliğinin olmadığı binalar	BYS ≥ 4	BYS ≥ 5
Diğer tüm binalar	BYS ≥ 5	BYS ≥ 6

Yapının sahip olduğu hâkim doğal titreşim periyodunun bulunması için modal analizleri SAP2000 yazılımı üzerinden yapılmıştır. Deprem hesabında dikkate alınacak olan hâkim doğal titreşim periyodu $T_p^{(X)}$ 'nin ampirik hâkim doğal titreşim periyodu değeri T_{pA} 'nin 1.4 katından fazla olmaması gerektiği göz önünde bulundurulacaktır.

$$T_{pA} = C_t H_N^{3/4} \quad (5)$$

Taşıyıcı sistemi yalnızca betonarme çerçevelerden oluşan yapılarda $C_t=0.1$ değeri kullanılacaktır.

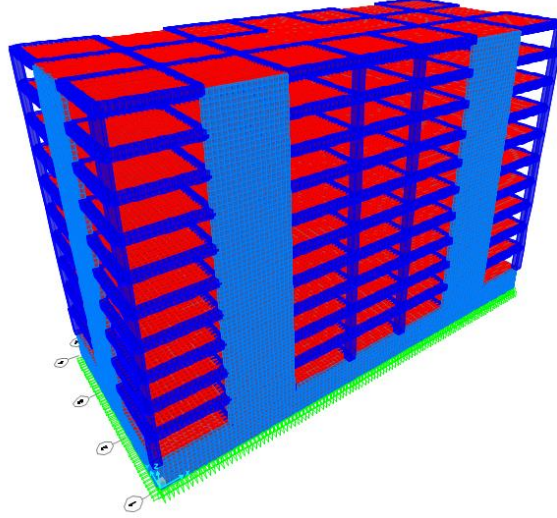
İncelenen (X) deprem doğrultusu için, her bir i. katta ikinci mertebe etkilerini temsil eden gösterge değeri $\theta_{II,i}^{(X)}$ Eşitlik 6 kullanılarak bulunacaktır.

$$Q_{II,i}^{(X)} = \frac{(\Delta_i^{(X)})_{ort} \sum_{k=i}^N w_k}{V_i^{(X)} h_i} \quad (6)$$

Perdelerin yerleşiminde mümkün olduğunca yapı cephelerine yakın ve simetrik konumlandırmaya özen gösterilmelidir. Kesit geometrisi olarak öncelikli tercih dikdörtgen veya dairesel perde/kolon elemanları olmalıdır. Yapısal sistem tasarımında, kolon yerine perde elemanlarının kullanımı her zaman daha avantajlı olup öncelikli tercih edilmelidir. Deprem etkisinin hâkim olduğu her doğrultuda, en az iki adet perde bulunması gerekmektedir. Yapının her iki deprem yönünde de $A_{perde} \geq 0,0015 n A_{yapı}$ ve $A_{perde}/A_{yapı} \geq 0,008$ koşulları yaklaşık sağlanacak kadar perde bulunmalıdır [21].

3. SAYISAL UYGULAMALAR

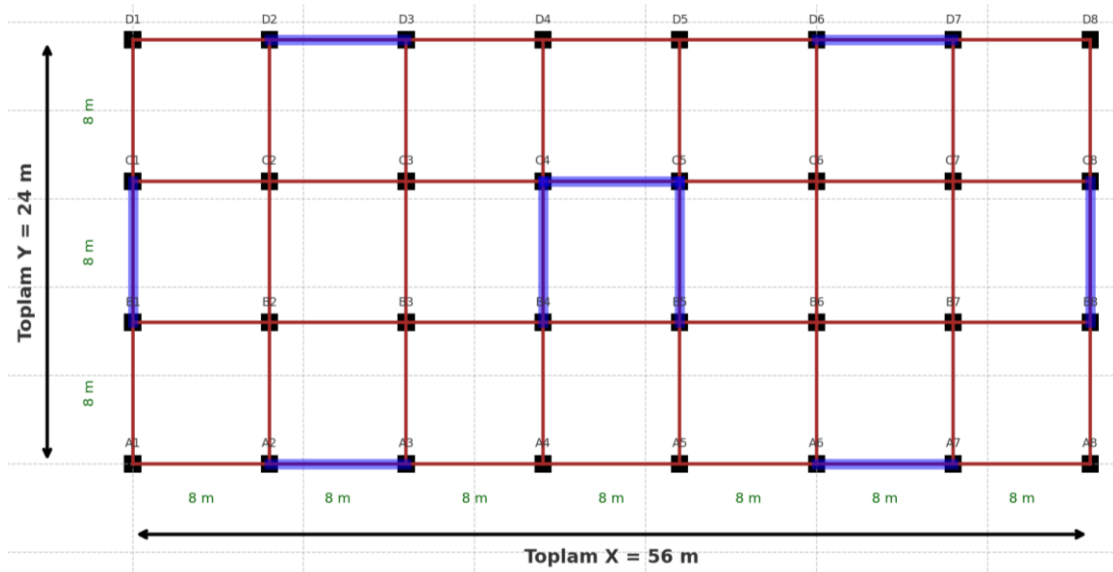
3.1. Betonarme Çerçeve ve Perdeli Elemanlardan Oluşan 10 Ofis Katı ve 1 Bodrum Katlı Toplam 11 Katlı Sistem



Şekil 1. Yapının üç boyutlu görünüşü [19]

İncelenen yapı, zemin altında bir bodrum kat ve üzerinde on adet ofis katı olmak üzere toplam 11 kattan oluşmaktadır. Bodrum katı, tüm çevresi boyunca perde duvarlarla çevrilidir. Yapının merkezinde boşluksuz olarak yerleştirilmiş üç adet perde duvar bulunmakta olup, dış kenarlarda da altı adet boşluksuz perde yer almaktadır; böylece toplamda dokuz adet perde elemanı yapısal sisteme entegre edilmiştir. Kat yüksekliği her katta 3,5 metre olup, yapının X yönündeki uzunluğu 56 metre, Y yönündeki uzunluğu ise 24 metredir. Yapının en üst kotu zemin seviyesinden itibaren 35 metre olarak belirlenmiştir. Taşıyıcı sistem yalnızca betonarme çerçeve elemanlarından oluşmakta, perdeler yalnızca rijitlik ve dayanım artırımı amacıyla kullanılmaktadır. Yapının yer aldığı zemin bölgesinin sınıflandırması ise TBDY-2018'e göre ZC yerel zemin sınıfı olarak tanımlanmıştır. Beton sınıfı: C35, çelik sınıfı: B420C seçilmiştir.

Beton malzemesi öz ağırlığı 25 kN/m^3 alınmıştır. Donatı malzemesi özgül ağırlığı ise $78,5 \text{ kN/m}^2$ alınmıştır. Yer hareketi sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 2. Yapının ofis kat planı

$S_S = 0,528$ $F_S = 1,289$ $S_1 = 0,131$ $F_1 = 1,500$ $S_{DS} = 0,680$ $S_{D1} = 0,197$ $T_A = 0,058s$ $T_B = 0,289s$ $T_L = 6s$ olarak bulunmuştur.

BKS =3, I =1, DTS =2, $H_N = 35m$, BYS =4

Yapının performans hedefleri, Deprem Tasarım Sınıfı (DTS) ve göz önüne alınan deprem düzeyi (DD) esas alınarak belirlenmiştir. Bu kapsamda, DTS = 2 ve DD-2 düzeyi için öngörülen performans hedefi "Kontrollü Hasar" (KH) performans düzeyi olarak seçilmiş ve değerlendirme ile tasarım süreci, "Dayanıma Göre Tasarım" (DGT) yaklaşımına göre yürütülmüştür. Deprem yüklerinin tamamı, süneklik düzeyi yüksek moment aktaran betonarme çerçeveler ile boşluksuz perde duvar elemanları tarafından karşılanan sistem kapsamında değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda, taşıyıcı sistem davranış katsayısı $R=7$ ve dayanım fazlalığı katsayısı $D=2,5$ olarak alınmıştır. Ayrıca, bina için belirlenen Bina Yükseklik Sınıfı (BYS) değeri 4 olup, bu değer $BYS \geq 2$ koşuluna uymaktadır.

Performans hedeflerinin belirlenmesinde Deprem Tasarım Sınıfı (DTS) ve seçilen deprem düzeyi (DD) esas alınmıştır. DTS = 2 ve DD-2 seviyesi için, yapıdan beklenen normal performans hedefi "Kontrollü Hasar" (KH) performans düzeyi olarak belirlenmiş; bu doğrultuda değerlendirme ve tasarım süreci "Dayanıma Göre Tasarım" (DGT) yaklaşımı çerçevesinde yürütülmüştür.

Yapı Sisteminin Ön Boyutlandırma Yaklaşımları

Kolon 1 ve 2'nci katlar için 90cm diğer katlarda 80cm çapında alınmıştır. Döşeme kalınlığı 200mm seçilmiştir. Kiriş boyutları $H > 3 * 20cm$ olacağından kiriş yüksekliği $h=70cm$ seçilmiştir. Kiriş genişliği $B= 60cm$ seçilmiştir.

Perdeler, uzun kenarının kısa kenara oranı en az 6 katı olan düşey taşıyıcı elemanlardır. Perdeye etkiyen maksimum eksenel basınç yükü (N_{dm}) göz önünde bulundurularak $A_c \geq N_{dm}/(0,35 * f_{ck})$ koşulunun sağlanması gerekmektedir.

Düşey yükler dikkate alındığında perdede oluşan normal kuvvet (N_{dm}) 19940 kN olarak hesaplanmıştır. Perde kalınlığı 0,4m olup perde brüt en kesit alanı $A_c = 0,4m * 14,0m = 5,6m^2$ olarak hesaplanmıştır.

$$N_{dm}/(A_c * f_{ck}) = 19940/(5,6 * 35000kN/m^2) = 0,102$$

İzin verilen oranın 0,35'ten büyük olması ve 0,102 değerinin bu sınırın altında kalması nedeniyle, söz konusu durumun TBDY 2018'de belirtilen şartları karşıladığı görülmektedir. Bunun yanı sıra, yapının her iki deprem doğrultusunda da $A_{perde} \geq 0,0015nA_{yapı}$ ve $A_{perde}/A_{yapı} \geq 0,008$ kriterlerine yaklaşık olarak uyum sağlaması beklenmektedir. Bu bağlamda $A_{yapı}$ yapının tabandaki izdüşüm alanını, n ise kat sayısını ifade etmektedir. [1]

$$A_{perde} \geq 0,0015nA_{yapı} ; 28,8m^2 \geq 20,16m^2$$

$$A_{perde}/A_{yapı} \geq 0,008 ; 0,0214 \geq 0,008 \text{ koşulları sağlanmıştır.}$$

Çizelge 5. Kat bazında kütle dağılımı

Kat No	Ağırlığı w_i (kN)	Kütleleri m_i (t)
10	14616	1490
9	17808	1816
8	17808	1816
7	17808	1816
6	17808	1816
5	17808	1816
4	17808	1816
3	17808	1816
2	18046	1840
1	18046	1840
Toplam	-	17882

Tek bodrumdan oluşan bodrum kat kütlesi 1851 ton hesaplanmıştır.

Modal analiz sonucunda $T_p^{(X)} = 0,92s$ $T_p^{(Y)} = 1,02s$ olarak bulunmuştur.

$$T_p^{(X)} = 0,92s \leq 1,4 T_{pA} = 1,414s$$

$$T_p^{(Y)} = 1,02s \leq 1,4 T_{pA} = 1,414s$$

$T_B \leq T_p^{(X)} \leq T_L$ arada kaldığı için S_{D1} / T formülünden hesaplanır.

$$S_{ae}(T_p^{(X)}) = 0,2141 g$$

$$S_{ae}(T_p^{(Y)}) = 0,1931 g$$

Yatay tasarım spektrumu köşe periyodu, T_B 'den fazla bulunduğundan R / I bağıntısı ile deprem yükü azaltma katsayısı hesaplanır.

$$R_a(T_p^{(X)}) = 7$$

$$R_a(T_p^{(Y)}) = 7$$

Buna göre azaltılmış tasarım spektral ivmesi $S_{ae}(T_p^{(X)}) / R_a(T_p^{(X)})$ formülünden

$$S_{aR}(T_p^{(X)}) = 0,0306g$$

$$S_{aR}(T_p^{(Y)}) = 0,0276g$$

Yatay elastik tasarım spektral ivmeleri $S_{ae}(T)$, doğal titreşim periyoduna göre yerçekimi ivmesi cinsinden hesaplanmıştır.

$$V_{tE}^{(X)} = 5366 \geq 4771 \text{ koşulunu sağlamaktadır.}$$

$$V_{tE}^{(Y)} = 4840 \geq 4771 \text{ koşulunu sağlamaktadır.}$$

Alt Bölüm

Bodrum kütlesi: 1851 t

$$R_{alt}: 1,5$$

$$D_{alt}: 1,5$$

$$S_{aR}(0) = \frac{0,4 \times 0,680}{1,5} = 0,181g$$

$$V_{tE}^{(X,Y)} = 3285 \text{ kN Olarak hesaplanmıştır.}$$

Binanın N'inci katına etkiyen eşdeğer deprem yükü değeri $\Delta F_{NE}^{(X)} = 0.0075 NV_{tE}^{(X)}$ eşitliğine göre

$$\Delta F_{NE}^{(X)} = 402 \text{ kN}$$

$$\Delta F_{NE}^{(Y)} = 363 \text{ kN olarak bulunmuştur.}$$

$$F_{iE}^{(X)} = (V_{tE}^{(X)} - \Delta F_{NE}^{(X)}) \frac{m_i H_i}{\sum_{j=1}^N m_j H_j} \quad (7)$$

$$F_{iE}^{(X)} = 4964 \text{ kN}$$

$$F_{iE}^{(Y)} = 4477 \text{ kN}$$

Çizelge 6. Kat bazında etki eden eşdeğer deprem yükleri

Kat No	h_i (m)	H_i (m)	m_i (ton)	$m_i H_i$ (ton.m)	$F_{iE}^{(X)}$ (kN)	$F_{iE}^{(Y)}$ (kN)
Kat 10	3,5	35	1490	52150	765	690
Kat 9	3,5	31,5	1816	57204	839	757
Kat 8	3,5	28	1816	50848	746	673
Kat 7	3,5	24,5	1816	44492	653	589
Kat 6	3,5	21	1816	38136	559	505
Kat 5	3,5	17,5	1816	31780	466	420
Kat 4	3,5	14	1816	25424	373	336
Kat 3	3,5	10,5	1816	19068	280	252
Kat 2	3,5	7	1840	12880	189	170
Kat 1	3,5	3,5	1840	6440	94	85
				338422	4964	4477

Yapıda yalnızca bir bodrum katının bulunması nedeniyle, hesaplamalarda eşdeğer deprem yükü olarak $V_{tE}^{(X,Y)} = 3285 \text{ kN}$ değeri esas alınacaktır.

TBDY-2018'in 4.5.10 numaralı maddesi uyarınca, kat döşemeleri rijit diyafram kabulüyle modellendiğinde, kat kütle merkezlerine uygulanan yatay deprem etkileri, her iki yönde de $\pm 5\%$ eksantrik olacak şekilde kaydırılarak analiz edilmelidir. Bu kapsamda deprem analizleri, hem $+5\%$ hem de -5% eksantrisite durumları için gerçekleştirilmiştir. Yapının X yönündeki analizlerinde, en elverişsiz sonuçlar -5% eksantrisite durumu için elde edildiğinden bu sonuçlar dikkate alınmıştır. Y yönü geometrik olarak simetrik olduğundan dolayı, eksantrisite etkileri her iki yönde de aynı sonuçları vermiş ve tüm EYÜ analizlerinde katsayı 1,0 olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle, Y yönüne ilişkin değerlendirmelerde yalnızca $+5\%$ eksantrisite durumuna ait veriler sunulmuştur.

Çizelge 7. EXÜ- 5% durumunda A1 düzensizliği kontrolü

Kat	di (min)	di (max)	Δi (min)	Δi (max)	Δi (ort)	η_{bi}
10	0,00969	0,01284	0,00097	0,00132	0,00115	1,15
9	0,00871	0,01152	0,00103	0,00139	0,00121	1,15
8	0,00768	0,01012	0,00108	0,00145	0,00126	1,15
7	0,00660	0,00867	0,00111	0,00149	0,00130	1,15
6	0,00548	0,00717	0,00112	0,00150	0,00131	1,14
5	0,00436	0,00567	0,00110	0,00146	0,00128	1,14
4	0,00325	0,00420	0,00103	0,00137	0,00120	1,14
3	0,00221	0,00283	0,00092	0,00120	0,00106	1,13
2	0,00129	0,00162	0,00074	0,00096	0,00085	1,12
1	0,00054	0,00066	0,00048	0,00059	0,00054	1,11
B	0,00006	0,00006	0,00006	0,00006	0,00006	1,03

Çizelge 8. EYÜ- 5% durumunda A1 düzensizliği kontrolü

Kat	di (min)	di (max)	Δi (min)	Δi (max)	Δi (ort)	η_{bi}
10	0,01184	0,01667	0,00122	0,00173	0,00148	1,17
9	0,01061	0,01493	0,00128	0,00182	0,00155	1,17
8	0,00933	0,01310	0,00133	0,00189	0,00161	1,17
7	0,00799	0,01121	0,00136	0,00193	0,00164	1,17
6	0,00663	0,00928	0,00136	0,00193	0,00164	1,17
5	0,00527	0,00735	0,00132	0,00187	0,00160	1,17
4	0,00395	0,00547	0,00124	0,00175	0,00149	1,17
3	0,00271	0,00372	0,00109	0,00154	0,00132	1,17
2	0,00161	0,00218	0,00089	0,00123	0,00106	1,16
1	0,00072	0,00094	0,00059	0,00079	0,00069	1,15
B	0,00013	0,00015	0,00013	0,00015	0,00014	1,06

Yapı üzerinde yapılan incelemeler sonucunda, tüm η_{bi} değerlerinin 1,2'den küçük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, yapıda A1-burulma düzensizliği tespit edilmemiştir.

Örnek binada toplam alan: 1344m², boşluk alanı: 64m²; $0,0476 \leq 0,333$ şartları sağlamıştır. Döşeme süreksizliği bulunmamaktadır.

Rijitlik düzensizliği katsayısı η_{ki} , herhangi bir i katındaki ortalama görelî kat ötelemesinin bir üst kattaki oranına bölümü ile tanımlanır ve bu katsayının 2,0'dan büyük olması durumunda rijitlik düzensizliği ortaya çıkar. Yapı üzerinde yapılan incelemeler sonucunda, her iki deprem doğrultusunda $+5\%$ ve -5% eksantrisite ile toplamda 6 farklı durum dikkate alınarak komşu katlar arasındaki rijitlik düzensizliği analiz edilmiştir. Yapının simetrik yapısı nedeniyle yalnızca $+5\%$ eksantrisite durumu için elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Çizelge 9. EXÜ- 5% durumunda B2 düzensizliği kontrolü

Kat	hi (cm)	$\Delta i_{(ort)}$	$(\Delta i/h_i)_{ort}$	$\eta_{ki}(\Delta i/h_i)_{ort} / (\Delta i+1/h_{i+1})_{ort}$	$\eta_{ki}(\Delta i/h_i)_{ort} / (\Delta i-1/h_{i-1})_{ort}$
10	350	0,00112	0,0000032	-	0,94621
9	350	0,00119	0,0000034	1,0568	0,95813
8	350	0,00124	0,0000035	1,0436	0,97107
7	350	0,00127	0,0000036	1,0297	0,99301
6	350	0,00128	0,0000036	1,0070	1,02141
5	350	0,00126	0,0000036	0,9790	1,06593
4	350	0,00118	0,0000033	0,9381	1,12881
3	350	0,00104	0,0000029	0,8859	1,24761
2	350	0,00084	0,0000024	0,8015	1,57598
1	350	0,00053	0,0000015	0,6345	-

Çizelge 10. EYÜ+%/5 durumunda B2 düzensizliği kontrolü

Kat	h _i (cm)	Δi _(ort)	(Δi/h _i) _{ort}	η _{ki} (Δi/h _i) _{ort} / (Δ _{i+1} /h _{i+1}) _{ort}	η _{ki} (Δi/h _i) _{ort} / (Δ _{i-1} /h _{i-1}) _{ort}
10	350	0,00148	4,23429E-06	-	0,95121
9	350	0,00155	4,45143E-06	1,05128	0,96710
8	350	0,00161	4,60286E-06	1,03401	0,97814
7	350	0,00164	4,70571E-06	1,02234	1
6	350	0,00164	4,70571E-06	1	1,02937
5	350	0,00160	4,57143E-06	0,97146	1,06951
4	350	0,00149	4,27429E-06	0,93500	1,13333
3	350	0,00132	3,77143E-06	0,88235	1,24176
2	350	0,00106	3,03714E-06	0,80530	1,53170
1	350	0,00069	1,98286E-06	0,65286	-

Yapı üzerinde yapılan incelemeler sonucunda, tüm η_{ki} değerlerinin 2,0'dan küçük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, yapıda B2 düzensizliği bulunmamaktadır.

Gevrek malzemeden yapılmış, boşluklu veya boşluksuz dolgu duvarları ile cephe elemanlarının, çerçeve elemanlarına esnek derz veya bağlantı olmaksızın tamamen bitişik olması durumunda, aşağıda verilen eşitliğe uygun olmaları gerekir. Bu analizde, κ katsayısı 1 olarak alınmış ve sınır değeri 0,008'dir. λ katsayısının hesaplanabilmesi için, DD-3 deprem yer hareketine ait elastik tasarım spektral ivmesinin, DD-2 yer hareketine ait elastik tasarım spektral ivmesine bölünmesi gerekmektedir.

DD-3 yer hareketi aynı konum itibari ile tdth.gov.tr 'den alınan sonuçlar: S_s=0,187 S₁=0,051 S_{DS}=0,243 S_{D1}=0,076

$$\lambda^{(X)}=0,386$$

λ^(Y)=0,386 sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 11. EXÜ durumunda görel kat ötelemesi kontrolü

Kat	d _i (max)	Δi (max)	δ _{i,max}	h _i	λ _i	λ _i x (δ _{i,max}) / h _i
10	0,01224	0,00125	0,00881	350	0,386	0,000009
9	0,01098	0,00133	0,00931	350	0,386	0,000010
8	0,00965	0,00138	0,00969	350	0,386	0,000010
7	0,00827	0,00142	0,00997	350	0,386	0,000011
6	0,00684	0,00143	0,01003	350	0,386	0,000011
5	0,00541	0,00139	0,00979	350	0,386	0,000010
4	0,00401	0,00130	0,00916	350	0,386	0,000010
3	0,00270	0,00115	0,00807	350	0,386	0,000008
2	0,00155	0,00091	0,00642	350	0,386	0,000007
1	0,00063	0,00057	0,00402	350	0,386	0,000004
B	0,00006	0,00006	0,00045	350	0,386	0,000001

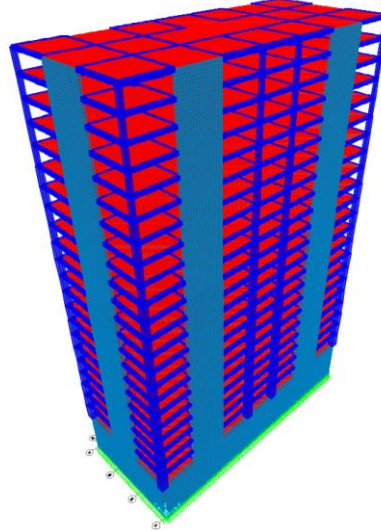
EXÜ, EXÜ+%/5, EXÜ-%5, EYÜ, EYÜ+%/5 ve EYÜ-%5 için kontrol edilen maksimum değeri 0,008 değeri altında kalmıştır.

Herhangi bir i 'inci kattaki kolon ve perdelerde her iki deprem yönünde de ikinci mertebe gösterge değeri Θ_{II,i}^(X) hesaplanmıştır. Hesaplanan Θ_{II,i}^(X) değeri $0,12 * \frac{2,5}{0,5*7} = 0,0857$ 'den küçük olması gerekmektedir. İncelenen örnekte Θ_{II,i}^(X,Y) değerlerinin X yönünde maksimum değeri 0,0094 ve Y yönünde maksimum değeri 0,0104 çıkarak değerlerinin 0,0857'den değerinden küçük olduğu görülmüştür. Örnekte X ve Y deprem doğrultularına göre iç kuvvetlerin ikinci mertebe büyütme katsayısı ile çarpılarak artırılması gerekmemektedir.

3.2. Betonarme Çerçeve ve Perdeli Elemanlardan Oluşan 22 Ofis Katı ve 3 Bodrum Katlı Toplam 25 Katlı Sistem

Tasarımı gerçekleştirilen yapı, üç bodrum ve yirmi iki ofis katı olmak üzere toplam yirmi beş kattan oluşmaktadır. Bodrum katları, çevresi boyunca betonarme perde duvarlarla sarılmıştır. Ayrıca yapı merkezinde üç adet ve dış kenarlarda altı adet boşluksuz perde yer almakta olup, toplamda dokuz adet perde

elemanı ile rijitlik sağlanmıştır. Kat yükseklikleri her katta 3,5 metre olarak düzenlenmiştir. Yapının X yönündeki uzunluğu 56 metre, Y yönündeki uzunluğu ise 24 metre olup, yapı tepe kotu 77 metreye ulaşmaktadır. Taşıyıcı sistem, perde duvarlar ve betonarme çerçeve elemanlarının birlikte çalıştığı karma sistem olarak tasarlanmıştır. Yerel zemin sınıfına yönelik değerler önceki örnek ile aynı alınmıştır. Kullanılan beton sınıfı ve özgül ağırlıklar da daha önceki örnek ile tutarlıdır. Yapının ofis kat planı bir önceki örnek ile aynıdır.



Şekil 3. Yapının üç boyutlu görünüşü [19]

BKS=3 I=1 DTS=2 ve bina yüksekliği yüksek yapıya uyduğu için $H_N=77m$ BYS=1 olarak çizelgelerden elde edilmiştir. DTS=2 ve DD-2 için normal performans hedefi KH değerlendirme/tasarım yaklaşımı DGT seçilmiştir.

Binanın ön boyutlandırılması

Döşeme ve kiriş boyutları önceki uygulamaya kat yükseklikleri ve döşeme açıklıkları aynı olduğu için eşit alınmıştır. Kolon için ayrı bir hesaplama uygulanmıştır.

Perde ön boyutlandırılmasına göre $0,35 \geq 0,204$ 'ün altında olduğu için TBDY 2018'de verilen koşula uymaktadır.

$$A_{perde} \geq 0,0015nA_{yapı} ; 50,4 m^2 \geq 44,35 m^2$$

$$A_{perde}/A_{yapı} \geq 0,008 ; 0,0375 \geq 0,008 \text{ değerinin altında kalmaktadır.}$$

Çizelge 12. Kolon bazında etki eden yükler ve kesitler

Kat No	Kat Kotu (m)	G+Q (kN)	1,4G+1,6Q (kN)	$A_c \geq N_{1,4G1,6Q} / 0,9f_{cd} (m^2)$	Seçilen Boyutu (cm)	Kolon	Seçilen Boyutu (cm)	Kiriş
22	77	1000	1312	0,06	60/60		40/60	
21	73,5	1040	2637	0,13	60/60		40/60	
20	70	1040	3962	0,19	60/60		40/60	
19	66,5	1040	5287	0,25	60/60		40/60	
18	63	1040	6612	0,32	60/60		40/60	
17	59,5	1040	8094	0,39	80/80		40/60	
16	56	1040	9576	0,46	80/80		40/60	
15	52,5	1040	11058	0,53	80/80		40/60	
14	49	1040	12540	0,60	80/80		40/60	
13	45,5	1040	14065	0,67	100/100		50/70	
12	42	1040	15590	0,74	100/100		50/70	
11	38,5	1040	17115	0,82	100/100		50/70	
10	35	1040	18640	0,89	100/100		50/70	
9	31,5	1040	20165	0,96	100/100		50/70	

Çizelge 12. Devamı

8	28	1040	21647	1,03	120/120	50/70
7	24,5	1040	23129	1,10	120/120	50/70
6	21	1040	24611	1,17	120/120	50/70
5	17,5	1040	26093	1,24	120/120	50/70
4	14	1040	27575	1,31	120/120	50/70
3	10,5	1040	29057	1,39	140/140	50/70
2	7	1040	30539	1,46	140/140	50/70
1	3,5	1040	32021	1,53	140/140	50/70
B1	0	1040	33503	1,60	140/140	50/70
B2	-3,5	1040	34985	1,67	140/140	50/70
B3	-7	1040	36467	1,74	140/140	50/70

Bina toplam kütlesi 39846 ton ve bodrum katların toplam kütlesi 6009 ton olarak bulunmuştur.

A1 ve B2 düzensizlikleri verilen koşulları sağlaması durumunda, DTS=2 ve BYS $\geq$ 4 bina koşulları için eşdeğer deprem yükü yöntemi uygundur. Sağlamaması durumunda mod birleştirme yöntemi seçilecektir.

Modal analizlerin hesabında SAP2000 paket programı kullanılarak binanın tamamının hâkim doğal titreşim periyodu X ve Y yönlerinde bulunmuştur. Ayrıca yalnızca üst bölüm için de hesaplar yapılarak bağıntı yardımıyla sonuçların yeterliliği incelenmiştir. Buna göre binanın tamamının $T_p^{(X)} = 2,51s$ yalnızca üst bölüm için $T_p^{(X)} = 2,48s$ bulunmuştur.

X ve Y yönlerinde $\frac{T_{p,tüm}}{T_{p,üst}} \leq 1,1$ koşulu sağlanmıştır.

$T_{pA} = 1,82s$ olarak hesaplanmıştır.

$T_p^{(X)} = 2,51s \leq 1,4 T_{pA} = 2,555s$

$T_p^{(Y)} = 2,24s \leq 1,4 T_{pA} = 2,555s$

X ve Y yönünde koşulu sağlamaktadır.

Azaltılmış tasarım spektral ivmesi $S_{ae}(T_p^{(X)}) / R_a(T_p^{(X)})$ formülünden

$S_{aR}(T_p^{(X)}) = 0,0112g$

$S_{aR}(T_p^{(Y)}) = 0,0126g$

$V_{te}^{(X)} = 4383 \geq 10632$ koşulunu sağlamamaktadır.

$V_{te}^{(Y)} = 4911 \geq 10362$ koşulunu sağlamamaktadır.

Eşdeğer deprem yükü yönteminden devam edilemez. Mod birleştirme yöntemi ile devam edilecektir.

Çizelge 13. Üst bölüme etki eden eşdeğer deprem yükleri

Kat	h_i (m)	H_i (m)	m_i (ton)	$m_i H_i$ (ton.m)	$F_{ie}^{(X)}$ (kN)	$F_{ie}^{(Y)}$ (kN)
Kat 22	3,5	77	1262	97198	257	288
Kat 21	3,5	73,5	1680	123502	327	366
Kat 20	3,5	70	1680	117621	311	349
Kat 19	3,5	66,5	1680	111740	295	331
Kat 18	3,5	63	1680	105859	280	314
Kat 17	3,5	59,5	1720	102356	271	303
Kat 16	3,5	56	1720	96335	255	285
Kat 15	3,5	52,5	1720	90314	239	268
Kat 14	3,5	49	1720	84293	223	250
Kat 13	3,5	45,5	1866	84898	225	252
Kat 12	3,5	42	1866	78367	207	232
Kat 11	3,5	38,5	1866	71837	190	213
Kat 10	3,5	35	1866	65306	173	194
Kat 9	3,5	31,5	1866	58775	155	174
Kat 8	3,5	28	1929	54004	143	160
Kat 7	3,5	24,5	1929	47253	125	140
Kat 6	3,5	21	1929	40503	107	120
Kat 5	3,5	17,5	1929	33752	89	100
Kat 4	3,5	14	1929	27002	71	80
Kat 3	3,5	10,5	2003	21031	56	62
Kat 2	3,5	7	2003	14021	37	42
Kat 1	3,5	3,5	2003	7010	19	21
Toplam	-	-	-	1532976	4054	4543

Çizelge 14. Alt bölüme etki eden eşdeğer deprem yükleri

Kat No	h _i (m)	H _i (m)	m _i (ton)	m _i H _i (ton.m)	F _{IE} ^(X,Y) (kN)
Kat 3	3,5	10,5	2003	21031	3612
Kat 2	3,5	7	2003	14021	2408
Kat 1	3,5	3,5	2003	7010	1204
Toplam	-	-	-	42062	-

TBDY 2018'e göre, perde duvarların taşıyıcı sistemde oluşan toplam taban devrilme momentinin %40 ila %70'lik kısmını karşılaması gerekmektedir. Bu oranın sağlanıp sağlanmadığını değerlendirmek amacıyla, analiz sonrasında perde kesitlerine etkiyen moment değerleri "section cut" yöntemiyle elde edilmiştir. Ayrıca yönetmelikte, taşıyıcı sistemde yer alan herhangi bir tek perdenin üstlendiği taban devrilme momenti M_{DEV} değerinin, ilgili doğrultudaki toplam taban devrilme momenti M_O değerinin üçte birinden büyük olmaması gerektiği belirtilmiştir. Yapının taban kısmında oluşan toplam devrilme momentleri X yönünde 231573 kN-m Y yönünde 206647 kN-m bulunmuştur.

Çizelge 15. Perdelerde meydana gelen momentler

	Section cut no	M2 kN-m	M3 kN-m
Exü	1	-	46151
Exü	2	-	46026
Exü	3	-	12824
Eyü	1	29913	-
Eyü	2	17808	-
Eyü	3	17811	-
Eyü	4	29945	-
Toplam	-	95477	105001

X yönünde:

$$\frac{M_{DEV}}{M_O} = \frac{105001}{231573} = \%45$$

Y yönünde:

$$\frac{M_{DEV}}{M_O} = \frac{95477}{206647} = \%46$$

X ve Y yönünde TBDY 'de belirtilen M_{DEV}/M_O 'ın %40 ila %70 arasında olması gerektiği koşulu sağlanmıştır.

X doğrultusunda maksimum momentin etkidiği perde için:

$$\frac{M_{DEV}}{M_O} = \frac{46151}{206647} = \%22$$

Y doğrultusunda maksimum momentin etkidiği perde için:

$$\frac{M_{DEV}}{M_O} = \frac{46151}{231573} = \%20$$

Tek bir perdenin aldığı M_{DEV} , M_O 'ın 1/3'ünden fazla olmayacaktır koşulunu sağlamıştır.

İncelenen yapının burulma düzensizliği kontrollerinde EXÜ, EXÜ+%5, EXÜ-%5, EYÜ, EYÜ+%5 ve EYÜ-%5 için maksimum değeri 1,14 olarak bulunmuştur. η_{bi} değerlerinin tamamı 1,2'den küçük çıkmıştır.

Yapıda A1-burulma düzensizliği bulunmamaktadır.

Analizleri yapılan binada toplam alan: 1344m², boşluk alanı: 64m²

0,0476 ≤ 0,333 döşeme süreksizliği şartlarını sağlamıştır.

TBDY-2018 kapsamında, bina kat planlarında dışa taşkın olarak yer alan çıkmaların, bulundukları doğrultuda kat planı uzunluğunun %20'sini aşmaması gerektiği belirtilmektedir. Bu çalışma kapsamında analiz edilen yapıda, kat planının dışına çıkan herhangi bir çıkma bulunmamakta ve yönetmelikte tanımlanan geometrik sınırlamalara tamamen uyulmaktadır.

İncelenen örnek yapıda katlar arasındaki etkili kesme alanlarının sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, yapıdaki B1 tipi düzensizliğin oluşmadığını göstermektedir.

İncelenen yapının komşu katları arası rijitlik düzensizliği kontrollerinde $EX\ddot{U}$, $EX\ddot{U}+\%5$, $EX\ddot{U}-\%5$, $EY\ddot{U}$, $EY\ddot{U}+\%5$ ve $EY\ddot{U}-\%5$ için maksimum değeri 1,6 olarak bulunmuştur. İncelenen yapıda η_{ki} değerlerinin tamamı 2,0'dan küçük çıkmıştır. Yapıda B2 düzensizliği bulunmamaktadır.

Yapının görelî kat ötelemelerinin sınırlandırılması kontrollerinde $EX\ddot{U}$, $EX\ddot{U}+\%5$, $EX\ddot{U}-\%5$, $EY\ddot{U}$, $EY\ddot{U}+\%5$ ve $EY\ddot{U}-\%5$ için maksimum değeri 0,000034 olarak bulunmuştur. Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen değerler, 0,008 sınır değerinin altında kalmıştır. X ve Y doğrultularında ve eksantrisite etkisi altında, esnek derz bulunmaksızın birleşim sağlanan dolgu elemanlarına göre yapılan görelî kat ötelemesi kontrolleri yapı genelinde uygunluk göstermiştir.

İncelenen örnekte $\Theta_{II,i}^{(X,Y)}$ değerlerinin X yönünde maksimum değeri 0,0355 ve Y yönünde maksimum değeri 0,0829 çıkararak değerlerin tamamı 0,0857'den küçük çıkmıştır. Yapıda X ve Y doğrultusunda iç kuvvetlerin ikinci mertebe büyütme katsayısıyla çarpılarak artırılması gerekmemektedir.

4. SONUÇLAR

Çalışmada, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018) esas alınarak, aynı kat planına ve açıklık düzenine sahip fakat farklı kat sayıları ve taşıyıcı sistem gruplarına ait iki yapının analizleri gerçekleştirilmiştir. Örnek yapı olarak seçilen 11 katlı yapı ve 25 katlı yapı için sabit bir koordinat bölgesi tanımlanmış ve ilgili deprem yer hareketi düzeyleri belirlenmiştir. Bu parametrelere ilişkin veriler, tdth.afad.gov.tr üzerinden temin edilmiştir. Elde edilen spektral ivme değerleri doğrultusunda, ilgili yönetmelik kapsamında Bina Yükseklik Sınıfı (BYS), Deprem Tasarım Sınıfı (DTS), bina önem katsayısı (I), hedef performans düzeyleri ve analizde kullanılacak doğrusal hesap yöntemi tanımlanmıştır. Ön tasarım süreci açıklamalı olarak gerçekleştirilmiş, ön tasarım sürecinde kolon boyutları statik yükün minimumunda tutulması için kademeli olarak artırılarak taşıyıcı sistemi test edilmiştir. Yapılar SAP2000 paket programı kullanılarak modellenmiş ve analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, yönetmelikte tanımlanan düzensizlik kontrollerinin yalnızca sınır şartların sağlanması durumunda değil, aynı zamanda sınır değerlerin ihlal edilmesi halinde de yapısal davranış üzerinde önemli farklılıklar oluşturabileceğini göstermektedir. Ayrıca devrilme momenti kontrollerinin yapılmaması, taşıyıcı sistemin güvenilirliği açısından kritik riskler oluşturabilmektedir. Bu nedenle, mühendislik uygulamalarında perde kullanım oranlarının ve yerleşimlerinin titizlikle ele alınması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Her iki örnekte de TBDY 2018'de önerilen ön boyutlandırma kurallarına ve minimum perde oranı koşullarına ($A_{perde} \geq 0,0015nA_{yapı}$ ve $A_{perde}/A_{yapı} \geq 0,008$) uyulması, yapısal düzensizliklerin (A1 burulma, B2 rijitlik düzensizliği vb.) sınır değerler içinde kalmasını sağlamıştır. Bu durum, tasarımın erken aşamasında yönetmelik kurallarına uygun hareket edilmesinin kritik önem taşıdığını göstermektedir. Kat sayısının artırılmasıyla ön boyutlandırılması tekrar yapılan yapının eşdeğer deprem yükü yönteminin sınır değerlerini aştığına ama düzensizlik durumlarını sağladığına dikkat çekilmiştir. Eşdeğer deprem yükünün sınır şartlarını sağlamayan yapılarda mod birleştirme yönteminin kullanılabileceği TBDY 2018'e göre belirtilmiştir.

5. KAYNAKLAR

1. TBDY-2018, (2019). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
2. Akçora, A.A. (2020). Betonarme yüksek binaların 2018 yılı Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine göre incelenmesi: 30 katlı bina örneği. *Yüksek lisans tezi*. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 141.

3. Gökçeoğlu, U. (2020). Betonarme bir yüksek binanın 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne göre performans esaslı tasarımı ve bodrum perde duvar yerleşiminin tasarıma etkisi. *Yüksek lisans tezi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 255.
4. Nomanoglu, Y.Z., Aslan, T.A. ve Temel, B., (2024). Farklı özelliklere sahip çok katlı binalarda deprem düzensizliklerinin irdelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(3), 647-666.
5. Karasu, O.T. 2011. Yumuşak kat düzensizliği bulunan betonarme bir yapının TDY 2007'ye göre performans analizi. *Yüksek lisans tezi*. Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, 137.
6. Kürkcü, F. (2019). 20 katlı betonarme bir yapının Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne göre tasarımı ve deprem performansının belirlenmesi. *Yüksek lisans tezi*. İstanbul Teknik Üniversitesi İstanbul, 203.
7. Özaydın, Y. (2019). 30 katlı betonarme yüksek bir binanın 2018 TBDY kapsamında tasarımı ve performans analizi. *Yüksek lisans tezi*. İstanbul Teknik Üniversitesi İstanbul, 105.
8. Kapıdaş, İ.F. (2019). Betonarme yüksek binaların TBDY-2018 kapsamında analizi. *Yüksek lisans tezi*. Konya Teknik Üniversitesi, Konya, 144.
9. İbiş, T. (2021). Yeni yapılacak betonarme bir binanın TBDY 2018'e göre tasarım kontrolleri ve deprem performansının belirlenmesi. *Yüksek lisans tezi*. Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Burdur, 108.
10. Zengin, K.K. (2021). 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne göre yüksek binaların analiz ve tasarımı. *Yüksek lisans tezi*. İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 147.
11. Temiz, M.M. (2022). TBDY-2018'e göre tasarlanmış planda a1 ve a3 düzensizliği bulunan betonarme bir binanın performans analizi. *Yüksek lisans tezi*, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa, 144.
12. Karaca, B. (2022). Bodrumlu betonarme binaların Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e göre irdelenmesi. *Yüksek lisans tezi*. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 112.
13. Sezgin, M. (2022). Düşey düzensizliği bulunan betonarme bir binanın DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 esaslarına göre irdelenmesi. *Yüksek lisans tezi*. Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli, 149.
14. Sönmez, M.B. (2023). Betonarme bir yapının TBDY-2018 ve DBYBHY-2007 yönetmeliklerine göre tasarımı. *Yüksek lisans tezi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 145.
15. Sağlam, A.B. (2023). Betonarme yüksek bir yapının Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne göre tasarımı ve performans analizi. *Yüksek lisans tezi*. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, 90.
16. Alhamoudialaloush, M. (2024). Betonarme çerçeveli-perdeli binaların doğrusal olmayan analiz yöntemleri ile deprem performanslarının incelenmesi. *Yüksek lisans tezi*. Karabük Üniversitesi, Karabük, 134.
17. Özcan G. (2024). Bodrum perdeli ve bodrum perdesiz betonarme binanın eşdeğer deprem yükü yöntemi ile kıyaslanması. *Yüksek lisans tezi*. İstanbul Arel Üniversitesi, İstanbul, 152.
18. AFAD, (2018). *Türkiye deprem tehlike haritası*. www.afad.gov.tr.
19. SAP2000 V23, (2019). *Structural analysis program*, Computers and Structures Inc. Berkeley, California.
20. Türk Standardı 500-2000
21. Topçu, A. (2024). *Betonarme-II ders notları*. https://drive.google.com/drive/folders/1Kt8FHe9xKrmtvMIEr0rXTAV1PWud7aIG?usp=drive_link, Erişim tarihi: 14.01.2025.
22. Yüksel, E. ve Alpaslan, N. (2021). Planda düzensizliğe sahip betonarme binaların deprem davranışının incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(3), 1455-1472.
23. Bayraktar, A., Özcan, D.M. ve Hökelekli, E. (2020). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) düzensizlik kriterlerinin farklı zemin sınıflarındaki betonarme binaların performansına etkisi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(1), 210-227.
24. Ahmed, A.A., Öztürk, H. & Aslan, T.A. (2025). Farklı kat yüksekliklerindeki binaların TBDY 2018 ve Eurocode 8'e göre karşılaştırmalı analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 40(2), 265-272.
25. Samim, M.Y. ve Temel, B. (2023). Yaya üst geçitlerinin 2018 Deprem Yönetmeliğine göre analiz ve tasarımları. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(1), 143-156.

İklim Değişikliğinin Seyhan Havzası Su Kaynakları Üzerindeki Olası Risklerinin Meteorolojik Verilere Dayalı Olarak Değerlendirilmesi

Serpil SİNAN^{1,a}, Mesut BAŞIBÜYÜK^{1,b}

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye

^aORCID: 0009-0002-4055-7877; ^bORCID: 0000-0001-9527-903X

Makale Bilgileri

Geliş : 24.02.2025

Kabul : 04.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1645958

Sorumlu Yazar

Mesut BAŞIBÜYÜK

basibuyuk@cu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Risk analizi

AHP

CBS

Seyhan havzası

Su kaynakları

Atıf şekli: SİNAN, S., BAŞIBÜYÜK, M., (2025). İklim Değişikliğinin Seyhan Havzası Su Kaynakları Üzerindeki Olası Risklerinin Meteorolojik Verilere Dayalı Olarak Değerlendirilmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(4), 803-817.

ÖZ

Bu çalışmada, risk unsurlarının belirlenmesi için Coğrafi Bilgi Sistemleri [CBS] tabanlı Çok Kriterli Karar Verme [ÇKKV] yöntemlerinden Analitik Hiyerarşi Prosesi [AHP] yöntemi kullanılarak risk unsurlarının tespit edilmesi amaçlanmıştır.

Çalışma sonucunda, ana risk unsurları için yapılan AHP analizinde öncelik ağırlıkları sıralaması, %55,79 ile meteorolojik kuraklık, %26,33 ile şiddetli yağış, %12,19 ile sıcak hava dalgası, %5,69 ile topografya olarak bulunmuştur. Havzanın %11,7'sini kapsayan güney ve kıyı kesimlerinde çok yüksek meteorolojik kuraklık riski, %8,5'ini kapsayan orta kesimlerinde yüksek şiddetli yağış riski, %1,3'ini kapsayan güney ve kıyı kesimlerinde çok yüksek sıcak hava dalgası riski, %0,8'ini kapsayan güney orta kesimlerinde yüksek derecede topografya etkisi tespit edilmiştir. Elde edilen risk haritaları değerlendirildiğinde, havzada, en riskli alanların, meteorolojik kuraklık için Karataş, Seyhan, Yüreğir, Sarıçam ve Çukurova ilçelerinde, şiddetli yağış için Feke ve Aladağ ilçelerinde, sıcak hava dalgası için Karataş ilçesinin batı bölümünde bulunduğu, topografya yönünden en çok etkilenen alanın Çukurova ilçesinde bulunduğu belirlenmiştir.

Assessment of Possible Risks of Climate Change on Seyhan Basin Water Resources Based on Meteorological Data

Article Info

Received : 24.02.2025

Accepted : 04.03.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1645958

Corresponding Author

Mesut BAŞIBÜYÜK

basibuyuk@cu.edu.tr

Keywords

Risk analysis

AHP

GIS

Seyhan basin

Water resources

How to cite: SİNAN, S., BAŞIBÜYÜK, M., (2025). Assessment of Possible Risks of Climate Change on Seyhan Basin Water Resources Based on Meteorological Data. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(4), 789-817.

ABSTRACT

In this study, it is aimed to identify risk elements with Analytical Hierarchy Process [AHP], one of the Geographic Information Systems [GIS]-based Multi-Criteria Decision Making [MCDM] methods. As a result of the study, the order of priority weights in the AHP analysis for the main risk factors was found to be meteorological drought with 55.79%, heavy rainfall with 26.33%, heat wave with 12.19%, and topography with 5.69%. A very high meteorological drought risk was detected in the southern and coastal parts covering 11.7% of the basin, a high risk of heavy rainfall in the central parts covering 8.5%, a very high heat wave risk in the southern and coastal parts covering 1.3%, and a high degree of topography effect in the south central parts covering 0.8%. When the risk maps were evaluated, it was determined that the most risky areas in the basin were in Karataş, Seyhan, Yüreğir, Sarıçam and Çukurova for meteorological drought, in Feke and Aladağ for heavy rain, in the western part of Karataş for heat waves, and the most affected area in terms of topography was in Çukurova.

1. GİRİŞ

Son yüzyılda sanayi devrimiyle, üretim için hammadde gereksinimi artmış, yeraltındaki mineral kaynaklarının yoğun bir şekilde sanayide hammadde olarak kullanımı gerçekleşmiştir. Bu durum atmosferin yapısında da değişimlere sebep olmuştur [1,2].

Bu süreçte her geçen gün giderek artan enerji ihtiyacının karşılanabilmesi amacıyla fosil yakıtlar kullanılmış ve buna bağlı olarak atmosferdeki CO₂ oranı büyük ölçüde artmıştır. Atmosferin yapısındaki değişiklikler sıcaklık artışına sebep olmuştur [3-6]. Böylece, atmosferin yapısında meydana gelen değişim ile birlikte oluşan iklimsel değişimler, küresel iklim değişikliğini ortaya çıkartmıştır. Günümüzde küresel iklim değişikliği, bütün canlıların yaşamını etkileyecek, dünyanın üstesinden gelmek zorunda olduğu, ciddi ve dönüşü mümkün olmayan bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır [6,7].

Türkiye üzerinde, iklim değişimi ile ilgili gerek yapılan analizler gerekse geleceğe yönelik tahmin çalışmaları giderek hız kazanmıştır. Gelecek dönemlere ait tahminde bulunan iklim modelleri ve bu modellerde kullanılan sıcaklık, yağış, vb. değişkenlere ait veriler genellikle iki farklı yaklaşım ile oluşturulmuştur. Bunlar; geçmişe ait verilerin istatistiklerinin kullanılması ile geleceğe yönelik tahminlerin yapılması ve iklim senaryolarının kullanılmasıdır [8,9].

Dünyadaki su tüketiminin yaklaşık %70'i tarımda kullanılmakta olup bu oran ülkemizde %77'dir [10,11]. Bununla beraber ülkemizde kişi başına düşen su miktarı 2000 yılında 1652 m³ iken 2022 yılında 1322 m³'e kadar düşmüştür [12,13]. Ülkemiz bu değerlere bakıldığında su stresi yaşayan bir ülke konumundadır. Kişi başına düşen su miktarında yaşanan düşme eğilimi devam edip, bu değer 1000 m³'ün altına indiğinde ülkemiz su fakiri ülke konumuna gelecektir. Bu nedenle suyu etkin ve verimli kullanmak adına sürdürülebilir su kaynaklarının yönetimi oldukça önem arz etmektedir. Bu kapsamda, Merkepçi [14] Seyhan Havzası'nda yer alan Zamanti Nehri-Değirmenocağı, Zamanti Nehri-Ergenuşağı ve Eğlence Nehri-Eğribük istasyonlarının uzun dönem günlük akış değerlerini yapay sinir ağı modeli kullanarak incelemiştir.

Sonuç olarak, su kaynakları üzerindeki baskıların nasıl azaltılacağı, mevcut büyüme hızı, değişen su tüketim alışkanlıkları ve artan su talebi karşısında su kaynaklarının yıllar sonrasına nasıl aktarılacağı ve iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki olumsuz etkilerine nasıl uyum sağlanacağı yüzyılımızın en önemli insanlık sorunları arasında yer almaktadır.

Bu amaçla çalışmada, bu etkiler dikkate alınarak, iklim değişikliğinin Seyhan Havzası özelinde, su kaynaklarına etkisinin değerlendirilmesi, risk analizlerinin yapılması ve uyum faaliyetlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. YÖNTEM

2.1. Çalışma Alanının Özellikleri

Seyhan Havzası Türkiye'nin Doğu Akdeniz Bölgesi'nde Adana İlinin kuzeyinde 36° 30' ile 39° 15' kuzey enlemleri ve 34° 45' ile 37° 00' doğu boylamları arasında yer almaktadır. 22.152,5 km²'lik yüz ölçüme sahip Seyhan Havzası, doğuda Ceyhan, batıda Konya ve Berdan, kuzeyde Develi Havzası ve Kulmac Dağları, güneyde ise Akdeniz'e kadar uzanmaktadır.

2.2. Çalışma Alanının İklimi ve Su Kaynakları

Seyhan Nehri yağış alanı Akdeniz ve İç Anadolu coğrafi bölgelerinde yer almaktadır. Orta kesiminden Toros Dağları ile ikiye bölünmüş görünümde olan havzada güneyde, Akdeniz Bölgesi'nde Akdeniz İklimi, kuzeyde, İç Anadolu Bölgesi'nde karasal iklim özelliklerine rastlanır. Seyhan Havzası içerisine giren meteoroloji istasyonları arasında en yüksek sıcaklık Adana meteoroloji istasyonunda 44 °C olarak, havzadaki en düşük sıcaklık Tomarza meteoroloji istasyonunda -34,2 °C olarak ölçülmüştür. Havzadaki uzun yıllar ortalama sıcaklıklar ise Sarız'da 7,4 °C iken Adana'da 18,9 °C olarak gerçekleşmiştir. Sıcaklık istatistiklerinden görüleceği üzere havzanın güneyi ve kuzeyi arasında iklimsel olarak önemli farklılıklar vardır. Çalışma alanına ait konumsal görünüm ve önemli su kaynakları Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Seyhan Havzası'nın konumu ve önemli su kaynakları

2.3. Coğrafi Veri Temini

Çalışmada kullanılacak sayısal özellikteki veri setlerinin coğrafi projeksiyon sistemleri ve mekânsal çözünürlükleri CBS yazılımı kullanılarak standardize edilmiştir. Bu aşamada CORINE Arazi Örtüsü/Kullanımı verisinin hücresel çözünürlüğü ArcGIS 10.8 yazılımı Data Management bölümünde Resample İşlemi yapılarak ayarlanmıştır. Bu veriler ArcGIS 10.8 yazılımı ile bu çalışma için oluşturulan coğrafi veri tabanına “Raster” ve “Shape” formatlarında aktarılmış ve tek bir projeksiyon sistemine uyarlanmıştır. Türkiye geneli elde edilen verilerden Seyhan Havzası sınırları temel alınarak coğrafi veri tabanı oluşturulmuştur. Bu çalışmada kullanılan veriler ilgili kurum ve kuruluşlardan temin edilmiş olup Çizelge 1.’de verilmiştir. Meteoroloji Genel Müdürlüğünden Seyhan havzasına ait (1950-2022) iklim verileri temin edilmiştir. Bu veriler yıllık olarak sınıflandırılarak yıllık ortalama, minimum ve maksimum değerler hesaplanmıştır. Koordinatları bilinen meteorolojik gözlem istasyonlarından alınan nihai olarak istatistik veriler ArcGIS 10.8 yazılımı ile birlikte ters mesafe ağırlıklandırma (IDW) yöntemleri ile yüzey yayılımı uygulanarak mekânsal formata dönüştürülmüştür.

Çizelge 1. CBS veri tabanı

İklim Verileri	Topoğrafya
- Sıcaklık - Yıllık Ortalama Sıcaklık - Yıllık Maksimum Sıcaklık - Yıllık Ekstrem Sıcaklık - Yıllık Minimum Sıcaklık - Yağış - Yıllık Ortalama Yağış - Ocak Ayı Ortalama Yağış - Temmuz Ayı Ortalama Yağış - Nem - Yıllık Ortalama Bağıl Nem - Solar Radyasyon (Global Solar Atlas verileri)	Earth Explorer (USGS) sitesinden indirilen SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) DEM(Sayısal Yükseklik Modeli) verileri kullanılarak; - Yükseklik - Eğim Land Copernicus sitesinden indirilen CORINE (Cordination of Information on the environment) 2018 verilerinden Arazi Kullanım Haritası Earth Explorer (USGS) sitesinden indirilen Landsat 8-9 OLI Uydu görüntülerinden NDVI (Normalized Diffrence Vegetation Index- Normalleştirilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi)

2.4. Risk Analiz Metodolojisi

Çalışmanın risk unsurları ve bunlara etki eden alt kriterler, literatürde kabul gören araştırma sonuçlar doğrultusunda belirlenmiştir. Bu belirlemelere göre, iklim değişikliği su kaynakları riskleri genel olarak incelendiğinde, çalışma kapsamında, havza ölçeğinde su kaynaklarının en çok etkilendiği risk unsurları meteorolojik kuraklık, şiddetli yağış, sıcak hava dalgası ve topografyadır. Bunlara etki eden alt kriterler ise; meteorolojik kuraklık unsuru için, yıllık ortalama sıcaklık, yıllık maksimum sıcaklık, yıllık ekstrem sıcaklık, yıllık minimum sıcaklık, yıllık ortalama yağış olarak, şiddetli yağış unsuru için, yıllık ortalama yağış, Ocak ayı ortalama yağış, Temmuz ayı ortalama yağış olarak, sıcak hava dalgası unsuru için, bağıl nem, yıllık ortalama sıcaklık, solar radyasyon (güneş ışınlımı) olarak, topografya unsuru için, NDVI, arazi kullanımı, yükseklik, eğim olarak belirlenmiştir.

Kriterlerin belirlenmesi ile çalışmada kullanılacak sayısal özellikteki veri setlerinin coğrafi projeksiyon sistemleri ve mekânsal çözünürlükleri CBS yazılımı kullanılarak standardize edilmiştir. Bu aşamada CORINE Arazi Örtüsü/Kullanımı verisinin hücresel çözünürlüğü ArcGIS 10.8 yazılımı Data Management bölümünde Resample işlemi yapılarak ayarlanmıştır. Standardize edilmiş verilerden, ArcGIS 10.8 yazılımındaki reclassify aracı kullanılarak araştırma alanına ait yukarıda anlatılan kriterlere ait haritalar üretilmiştir. Çalışma alt kriter haritaları için ArcGIS 10.8 yazılımı Spatial Analyst modülü reclassify bölümünde yeniden sınıflandırma işlemi yapılmıştır. Alt kriterlerin ağırlıklandırılması ve sıralanması için ise [15] tarafından geliştirilmiş olan AHP algoritması kullanılmıştır. Araştırma kriterleri arasında [16], tarafından geliştirilen web tabanlı çevrimiçi (AHP-OS) sistemi kullanılarak AHP ikili karşılaştırmaları yapılmış ve ikili karşılaştırma tutarlılık CR değerleri oranı hesaplanmıştır.

Araştırma alt kriterlerinin AHP analizleri sonucu belirlenen kriter ağırlıkları kullanılarak ArcGIS 10.8 yazılımı “Spatial Analyst” araçları “Weighted Overlay” bölümünde bindirme işlemi yapılmış böylece Seyhan Havzasındaki ana risk unsurları meteorolojik kuraklık, şiddetli yağış, sıcak hava dalgası için risk potansiyelleri ve topografya için etkileri alansal olarak haritalandırılarak tespit edilmiştir.

2.5. Araştırma Kriterlerinin AHP Analizi

Dört adımda gerçekleştirilebilen AHP algoritması uygulamasında sırayla;

Adım 1. Problem tanımlanır. Karar için gerekli olan ölçütler belirlenerek, ölçüt öncelikleri tespit edilir.

Adım 2. Hiyerarşik bir yapı oluşturulur. Karar Probleminin hiyerarşik yapısının oluşturulması AHP'nin temelidir. Bu aşamada karar problemini tanımlayan ana unsurlar ve alternatifler belirlenir. Daha sonra araştırma problemi belirlenen amaca uygun şekilde unsurlar, alt kriterlere ve alternatiflere bölünür [15].

Adım 3. İkili karşılaştırma matrisi oluşturulur. 1 ile 9 arasında değerler alan bir önem derecesi ölçeği kullanılarak, önce temel ölçütler, varsa alt ölçütler ve son olarak tüm ölçütlerin dikkate alınarak ölçütlere göre karar seçeneklerinin karşılaştırıldığı matrisler oluşturulur. Karşılaştırma matrisleri köşegen elemanları 1 olan bir kare matristir.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} = 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} = 1/a_{1n} & a_{n2} = 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

a_{ij}, i. ölçüt ile j. ölçütün ikili karşılaştırma değeri olup, j i a değeri 1 a_{ij} den elde edilir. Bu özelliğe, karşılık olma özelliği denir. ij a değeri, “Ölçüt i değeri bir başka ölçüt j ye göre ne oranda tercih edilmelidir?” sorusunun cevabıdır. Karar seçenekleri her bir ölçüte göre ayrı ayrı karşılaştırılır. Karar matrisleri, aşağıda [15] tarafından önerilmiş olan 1-9 karşılaştırma ölçeği kullanılarak oluşturulur (Çizelge 2).

Çizelge 2. AHP önem değerleri [15]

Değeri	Tanım	Açıklama
1	Eşit önemli	İki seçenekte eşit derecede öneme sahiptir.
3	Biraz önemli	Bir kriterin diğerine karşı biraz daha üstün olduğu durumdur.
5	Fazla önemli	Bir kriter diğerine göre üstün sayılmıştır.
7	Çok fazla önemli	Bir kriter diğerine karşı oldukça üstün sayılmıştır.
9	Aşırı derece önemli	Bir kriterin diğerinden üstün olduğu çok nettir.
2,4,6,8	Ara değer	Ardışık iki değerlendirme arasındaki ara değerleri belirtir.

Adım 4. İkili karşılaştırma matrisi satır ve sütunları normalize edilir. Bu aşamada matrisin sütunlarında bulunan elemanlar, sütunların toplamına bölünerek her bir sütunun toplamı 1 olacak şekilde normalize edilirler.

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}, i, j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

eşitliği kullanılır.

Adım 5. Öncelik vektörü hesaplanır. Normalize edilmiş matrisin her bir satır toplamı, matrisin boyutuna bölünerek ortalaması alınır. Bulunan bu değerler her bir ölçüt için hesaplanan önem ağırlıklarıdır. Bu ağırlıklar, öncelik vektörünü oluşturur.

$$W_i = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{j=1}^n a'_{ij}, i, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

eşitliği kullanılır. Böylece, ölçütlerin birbirlerine göre önem değerlerini gösteren yüzde önem dağılımları elde edilir.

Adım 6. İkili karşılaştırma matrisinin tutarlılık oranı hesaplanır. Bu aşamanın amacı karar vericinin ikili karşılaştırmalardaki tercihlerinin tutarlılığının belirlenmesidir. İkili karşılaştırma yargısı sonucu oluşan bir A matrisinin tutarlı olup olmadığını belirleyebilmek için birçok yöntemden bir tanesi olan “Tutarlılık İndeksi (Consistency Index-CI)” adı verilen katsayının hesaplanması gerekir. CI katsayısı

$$I = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada,

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j}{w_i} \right) \quad (4)$$

$$A \times W = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21}=1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}=1/a_{1n} & a_{n2}=1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$d_i = \frac{x_i}{w_i}, i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (7)$$

Tutarlılığı değerlendirebilmek için “Rassal Indeks (Random Index-RI)” değerinin bilinmesi gerekir. n boyutlu karşılaştırma matrisleri için tanımlanan RI değerleri Çizelge 3’de verilmiştir.

Çizelge 3. Karşılaştırma matrislerinin boyutlarına göre RI değerleri

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,5	0,9	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5

CI ve RI değerleri belirlendikten sonra “Tutarlılık Oranı (Consistency Ratio-CR)” hesaplanır.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (8)$$

Bu aşamada tutarlılık oranının CR 0,10 değerini aşmaması gerekir. Bu değerin aşılması karar vericinin tutarsızlığını göstermekte olup bu durumda yapılan ikili karşılaştırmaların tekrar gözden geçirilmesi gerekmektedir.

Adım 7. Ölçütler için ikili karşılaştırma matrisi oluşturularak, karar seçeneklerinin öncelik vektörü hesaplanır. Bu öncelik vektörü, ölçütler için ağırlık vektörü olarak da tanımlanabilir.

Adım 8. Karar seçenekleri sıralanır. Ölçütler için elde edilen öncelik vektörleri birleştirilerek, tüm öncelikler matrisi elde edilir. Tüm öncelikler matrisi ile karar seçeneklerinin öncelik vektörü çarpılıp toplanarak sonuç vektörü elde edilir. Bu vektörde en yüksek ağırlığa sahip olan karar seçeneği problemin çözümü için tercih edilmesi gereken karar seçeneği olarak belirlenir.

Bu çalışmada, ana risk unsurlarının ve alt kriterlerin AHP ağırlıklarının, sıralarının ve tutarlılık oranlarının hesaplanması için Microsoft Excel ile AHP algoritmasına ilişkin yukarıda formülasyonları verilen

hesaplamalar yapılmış, hesaplanan sonuçların doğrulaması [17], tarafından geliştirilen web tabanlı çevrimiçi (AHP-OS) sisteminde doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Araştırma için belirlenmiş olan kriterler arasında 28 ikili karşılaştırma yapılmıştır. Bu karşılaştırmaların AHP ikili karşılaştırma tutarlılık oranı nicel araştırmalar için kriter kabul edilen CR 0,1 genel tutarlılık oranının altında olup meteorolojik kuraklık için $CR = 0,01$, şiddetli yağış için 0,02, sıcak hava dalgası için 0,06, topografya için 0,02 olarak belirlenmiştir. Toplam risk için ise 0,06 olarak hesaplanmıştır.

Çalışmanın veri analiz aşamasında, araştırma alt kriterlerinin AHP analizleri sonucu belirlenen kriter ağırlıkları kullanılarak ArcGIS 10.8 yazılımı “Spatial Analyst” araçları “Weighted Overlay” bölümünde bindirme işlemi yapılmıştır.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Risk unsurları için yapılan AHP ikili karşılaştırmalar 4 adet ana risk unsuru için Çizelge 4’de verilmiştir.

Çizelge 4. Risk ana unsurlar ikili karşılaştırma matrisi

Risk ana unsurlar	a	b	c	d
(a) Meteorolojik kuraklık	1	3	5	7
(b) Şiddetli yağış	1/3	1	3	5
(c) Sıcak hava dalgası	1/5	1/3	1	3
(d) Topografya	1/7	1/5	0	1

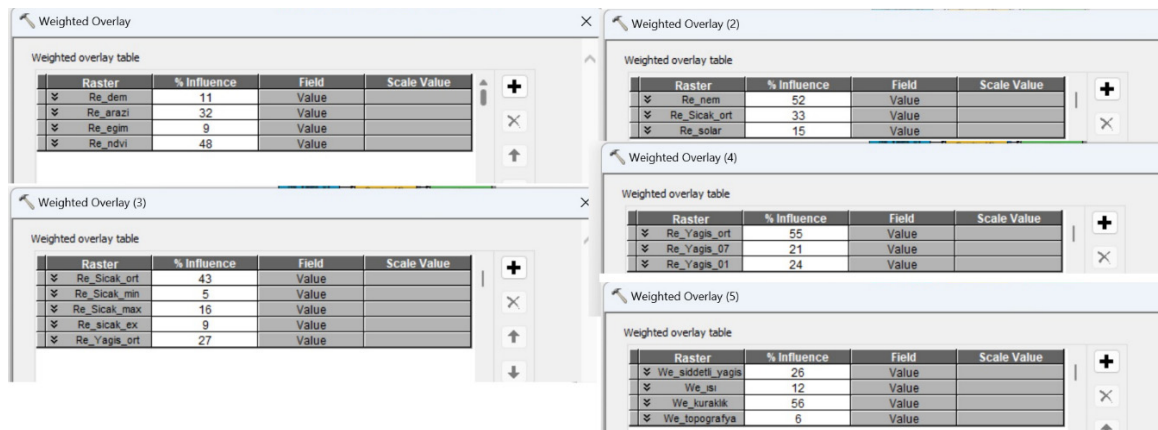
Ana risk unsurları için AHP analizinde elde edilen öncelik ağırlıklarının sıralanması ile ilgili sonuçlar Çizelge 5’de verilmiştir.

Seyhan Havzası için yapılan Meteorolojik Kuraklık, Şiddetli Yağış, Sıcak Hava Dalgası ve Topografya AHP analizleri neticesinde; Meteorolojik Kuraklık risk unsurunun, %55,79 ile en yüksek, topografya etki unsurunun ise % 5,69 ile en düşük ağırlığa sahip olduğu belirlenmiştir.

Uygulama sonucu elde edilen AHP önem değerleri Şekil 2’de verilmiştir. Bu analiz sonucunda, çok düşük riskli alanlar “1” düşük riskli alanlar için “2” orta riskli alanlar için “3” yüksek riskli alanlar için “4”, çok yüksek riskli alanlar için “5” önem sınıf kodu kullanılmış böylece araştırma sahasında meteorolojik kuraklık, şiddetli yağış, sıcak hava dalgası riski taşıyan ve topografya etkisi altında kalan alanlar haritalandırılarak tespit edilmiştir.

Çizelge 5. Risk ana unsurları öncelik ağırlık sıralaması

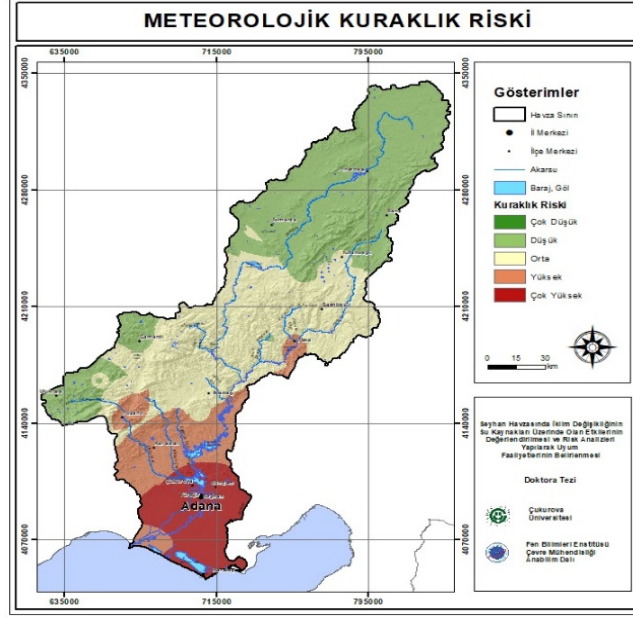
Parametreler	a	b	c	d	Toplam	Ağırlık	Öncelik ağırlığı (%)
(a) Meteorolojik kuraklık	0,6	0,66	0,54	0,44	2,23	0,56	55,79
(b) Şiddetli yağış	0,2	0,22	0,32	0,31	1,05	0,26	26,33
(c) Sıcak hava dalgası	0,12	0,07	0,11	0,19	0,49	0,12	12,19
(d) Topografya	0,09	0,04	0,04	0,06	0,23	0,06	5,69
Toplam	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	1,00	100,00



Şekil 2. AHP önem değerleri weighted overlay

3.1. Meteorolojik Kuraklık Riskinin Değerlendirilmesi

Şekil 3’de Seyhan Havzası’na ait meteorolojik kuraklık riskinin haritada gösterilen alansal dağılımlarına göre risk değerlendirmesi yapılmıştır.



Şekil 3. Seyhan Havzası meteorolojik kuraklık risk haritası

Seyhan havzası iklim değişikliğine bağlı olarak kuraklıktan önemli derecede etkilenecek havzaların başında gelmektedir.

İklim değişikliğine bağlı olarak sıcaklığın fazla ve yağışın az olduğu yerlerde su kaynakların miktarları kısıtlanırken tarım başta olmak üzere pek çok sektör olumsuz yönde etkilenmektedir. Bazı nehir havzalarında yağışlarda azalma, sıcaklıkta önemli bir artış ve dolayısıyla akışlarda azalma eğiliminin olduğu bilinmektedir. Örneğin, Gediz ve Büyük Menderes Havzalarındaki yerüstü sularının %50'sinin bu yüzyılda kaybolacağı ve dolayısıyla tarımda, yerleşimlerde ve sanayide su kullanıcıları için aşırı su kıtlığının yaşanacağı tahmin edilmektedir. Araştırmalar en kayda değer su açığının gözlemlendiği havzaların Fırat Dicle, Doğu Akdeniz ve Konya Kapalı Havzası olduğunu göstermektedir. Yapılan başka bir çalışmada, Büyük Menderes ve Gediz Havzalarında iklim değişikliğinin bölgesel ölçekte beklenen etkilerinin, havzalarda zaten mevcut olan su kıtlığı ve su tahsisi problemlerini kapsam ve boyut açısından daha da arttıracığı ifade edilmektedir [18].

Seyhan Havzası için hazırlanan kuraklık yönetim planı incelendiğinde ise, hafif kuraklık görülme oranı en yüksek %16,5 ile Tomarza'da, en düşük %13,8 ile Adana'da, orta şiddetli kuraklık görülme oranı en yüksek %12,5 ile Elbaşı'nda, en düşük %8,1 ile Karaisalı'da, şiddetli kuraklık görülme oranı en yüksek %8,1 ile Pozantı'da, en düşük %6,1 ile Elbaşı'nda görülmüştür. Havza içerisinde kalan istasyonların ortalamalarına göre havzada hafif kuraklık görülme oranı %14,8, orta şiddetli kuraklık görülme oranı %10,3 ve şiddetli kuraklık görülme oranı ise %7,0 şeklinde hesaplanmıştır [19].

Yapılan çalışmada, meteorolojik kuraklık analizi için yapılan alt kriter değerlendirilmesinde sıcaklık ve yağış sonuçları alt kriter haritaları bölümünde gösterildiği ve anlatıldığı gibi havzanın kuzey ve batı uç kesimlerinde düşük sıcaklık ve yağış yoğunluklarının ortaya çıktığı, güney, kıyı ve orta kesimlere doğru yüksek sıcaklık ve yağış yoğunluklarının yaşandığı görülmektedir. Bu sonuçlara göre gerçekleştirilen meteorolojik kuraklık analizi neticesinde ortaya çıkan risk dağılım haritalarına göre, Seyhan Havzasının 8.721,2 km²'lik, %39,4 ünü kapsayan havzanın kuzey bölümünde yer alan Pınarbaşı, Tomarza, Sarız, Tufanbeyli ilçelerinin, havzanın batı bölümünde yer alan Ulukışla ve Çamardı ilçelerinin düşük kuraklık riski taşıdığı, 2.590,5 km²'lik %11,7' sini kapsayan havzanın güney bölümü ve kıyı kesiminde yer alan Karataş, Seyhan, Yüreğir, Sarıçam ve Çukurova ilçelerinin çok yüksek kuraklık riski taşıdığı tespit edilmiştir.

Yukarıda bahsedilen bölgede yapılmış diğer çalışmalar ve elde edilen bulgular kıyaslandığında, kuraklığın havzadaki ve su kaynakları üzerindeki etkilerin benzer olduğu ve olası risklerin sonuçları açıkça anlaşılmaktadır.

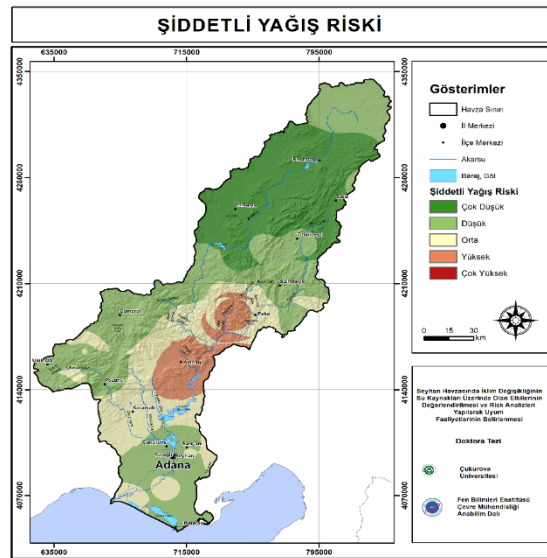
Çizelge 6. Meteorolojik kuraklık riski risk puanları ve alansal dağılımları

Meteorolojik kuraklık risk	Risk puanı	Alan (km ²)	Alansal dağılım (%)
Çok düşük	1	0,0	0,0
Düşük	2	8.721,2	39,4
Orta	3	7.840,9	35,4
Yüksek	4	3.000,0	13,5
Çok yüksek	5	2.590,5	11,7
Toplam		22.152,5	100,0

Çalışma bulgularına ve elde edilen harita sonuçlarına göre yoğunlukları hesaplanan alanlar için, çok yüksek riskli alan içinde kalan su kaynakları Seyhan Baraj Gölü, Akyatan Gölü, Seyhan Nehri, Körkün Çayı, Çakıt suyu olarak bulunmuştur. Yine yüksek riskli alanlar için bakıldığında Çatalan Baraj Gölü, Eğlence Çayı, Doğan Çayı ve Feke Baraj Gölü, Asmaca çayının uzantısı yer almaktadır (Şekil 3, Çizelge 6).

3.2. Şiddetli Yağış Riskinin Değerlendirilmesi

Şekil 4’de Seyhan Havzası’na ait şiddetli yağış riskinin haritada gösterilen alansal dağılımlarına göre risk değerlendirmesi yapılmıştır.



Şekil 4. Seyhan Havzası şiddetli yağış risk haritası

Son yıllarda, yapılan pek çok çalışmada, Seyhan Havzası'nda yapılan şiddetli yağış olaylarının arttığı ve bu iklim değişikliğinin ilerlemiş olduğu ortaya konmuştur. Özellikle kurak dönemlerin ardından gelen yoğun yağışlar, su kaynaklarının yönetimini son derece zorlaştırmaktadır. [20] çalışmalarında, Ege Bölgesi'nde yağış şiddeti kıyılarından iç kesimlere doğru azaldığını tespit etmişlerdir. Buna göre, denizel etkinin fazla olduğu kıyı Ege'de yüksek şiddetli yağışlar, iç kesimlerine göre daha fazla gerçekleşir. Afyon ve çevresi Ege Bölgesi'nde en az yağış düşen alanlardandır. Buradaki yağışların şiddetinin de oldukça hafif olduğu gözlenmiştir. Bölgenin güneyindeki dağlık alanda yağış şiddetleri oldukça yüksektir. Bölgenin güney kesimleri, ekstrem yağışlarının en fazla yaşandığı yerdir. Ayrıca bu alan bölgenin en fazla yağış alan bölümüdür. Bu alanda 100 mm ve üzerindeki şiddetli yağışlar, Ege Bölgesi'nin geri kalanına nazaran belirgin şekilde fazladır. Seyhan Nehri yağış alanının topografyası, bitki örtüsü ve yağış alanına giren nemli havanın akış yönü ile uyumlu olarak bulunmuştur. Yağış alanına güney ve güneybatıdan giren cephe sistemlerinin beraberinde getirdiği nemli hava kütleleri, alan üzerinde hareket ederken yağış alanının orta bölümünde yer alan Toros dağlarının orografik etkisi ile neminin önemli bir bölümünü bu bölgede yağış olarak bırakır. Bundan dolayı yağış alanının güney bölümündeki yağışlar yüksektir. Toros dağlarını aşan nemli hava kuzeye doğru ilerlerken taşıdığı nemin azalmış olması nedeniyle yağış alanının kuzey

kesimlerine daha az ölçüde yağış bırakır. Bunun sonucu yağış alanının kuzey bölümündeki yıllık ortalama yağışlar güney bölümündekilerden çok daha azdır [21].

Buna göre, şiddetli yağış risk haritasına göre elde edilen risk puanları ve alansal dağılımları Çizelge 7’de verilmiştir.

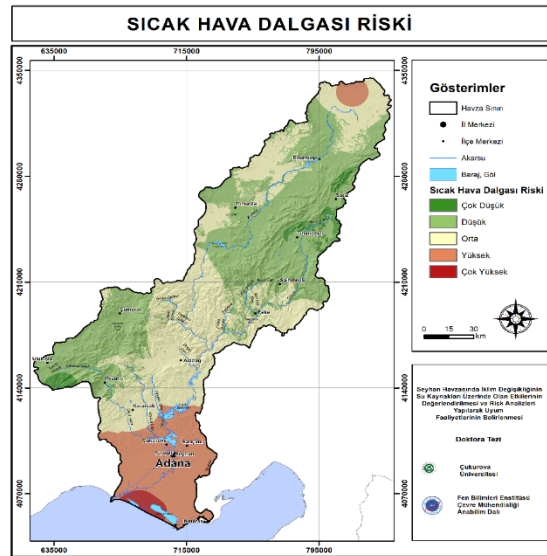
Çizelge 7. Şiddetli yağış riski risk puanları ve alansal dağılımları

Şiddetli yağış risk düzeyi	Risk puanı	Alan (km ²)	Alansal dağılımı (%)
Çok düşük	1	5.945,5	26,8
Düşük	2	9.383,6	42,4
Orta	3	4.945,7	22,3
Yüksek	4	1.877,7	8,5
Çok yüksek	5	0,0	0,0
Toplam		22.152,5	100,0

Yapılan çalışmada, şiddetli yağış riski değerlendirildiğinde, Seyhan Havzasının 5.945,5 km²’lik, %26,8’ini kapsayan havzanın kuzey bölümünde yer alan Pınarbaşı, Tomarza, Sarız ve Tufanbeyli ilçelerinin çok düşük şiddetli yağış riski taşıdığı, 1.877,7 km²’lik %8,5’ini kapsayan havzanın orta kesimlerinde yer alan Feke ve Aladağ ilçelerinin yüksek şiddetli yağış riski taşıdığı tespit edilmiştir (Şekil 4, Çizelge 7). Seyhan Havzası sınırları içinde yer alan su kaynakları, şiddetli yağış riski için değerlendirildiğinde yüksek riskli alan içinde su kaynağı olarak Yedigöze Baraj Gölü, Feke Baraj Gölü, Doğançay, Kisenit Çayı, Asmaca Çayı, Salam Deresi, Bağdere olarak bulunmuştur.

3.3. Sıcak Hava Dalgası Riskinin Değerlendirilmesi

Şekil 5’de Seyhan Havzası’na ait sıcak hava dalgası riskinin haritada gösterilen alansal dağılımlarına göre risk değerlendirmesi yapılmıştır.



Şekil 5. Seyhan Havzası sıcak hava dalgası risk haritası

Yapılan araştırmalarda, sıcak hava dalgalarının, sulama verimliliğini artırdığını ve üretimde azalmaya yol açabileceğini ortaya koyarak, nehir akışlarını azaltarak su kaynaklarının tükenmesine neden olabileceği sonuçları çıkmaktadır. Türkiye’nin de bulunduğu Akdeniz havzası iklim değişikliğinin toprak neminin azalması, yağışların azalması, sıcaklık artışı, bunlara bağlı kuraklık ve aşırı sıcak dönemlerin yaşanması gibi etkileri açısından en sıcak noktalardan biri olarak kabul edilir [22]. Kuglitsch ve arkadaşları, [23] aralarında Türkiye’nin de bulunduğu Doğu Akdeniz ülkelerinde bulunan 246 meteoroloji istasyonunun verilerini değerlendirmişlerdir. Gündüz en yüksek ve gece en düşük sıcaklıkların en az 3 gün devam etmesini sıcak dalgası olarak tanımlamışlardır. Yapılan çalışmada, 1960 ile 2006 arasında sıcak dalgalarının hem sayısının hem de süresinin ve yoğunluğunun önemli ölçüde arttığı ortaya konmuş özellikle de

faktördür. Bu nedenle, su kaynaklarının yönetimi ve korunması için topografik özelliklerin iyi anlaşılması gerekmektedir.

Buna göre, topografya etki haritasına göre elde edilen etki puanları ve alansal dağılımları Çizelge 9’da verilmiştir.

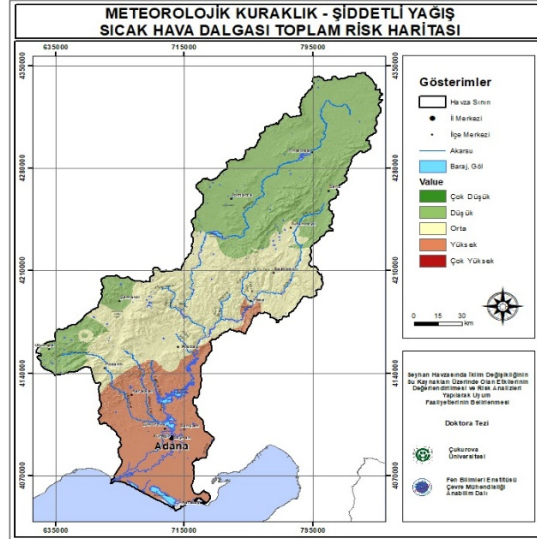
Çizelge 9. Topografya etkisi ve etki puanları ve alansal dağılımları

Topografya etki düzeyi	Etki puanı	Alan (km ²)	Alansal dağılım (%)
Çok düşük	1	12.905,6	59,5
Düşük	2	8.161,8	37,6
Orta	3	444,9	2,1
Yüksek	4	170,2	0,8
Çok yüksek	5	0,0	0,0
Toplam		21.682,5	100,0

Çalışmada, topografya etkisi değerlendirildiğinde, Seyhan Havzasının 12.905,6 km²’lik, % 59,5’ini kapsayan havzanın orta kesimlerinden kuzeye doğru uzanan bölümün tamamı çok düşük topografya etkisi altında olduğu, 170,2 km²’lik % 0,8’ini kapsayan havzanın güney orta kesimlerinde Çukurova ilçesinde yüksek topografya etkisi altında olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6, Çizelge 9). Seyhan Havzası sınırları içinde yer alan su kaynakları, topografya etkisi için değerlendirildiğinde yüksek etki altında kalan alan içinde, su kaynağı olarak Seyhan Nehri ve Seyhan Baraj Gölü yer almaktadır.

3.5. Meteorolojik Kuraklık-Şiddetli Yağış-Sıcak Hava Dalgası Toplam Risk Haritasının Değerlendirilmesi

Şekil 7’de Seyhan Havzası’na ait toplam riskin haritada gösterilen alansal dağılımlarına göre risk değerlendirmesi yapılmıştır. Buna göre, toplam risk haritasına göre elde edilen risk puanları ve alansal dağılımları Çizelge 10’da verilmiştir.



Şekil 7. Seyhan Havzası meteorolojik kuraklık, şiddetli yağış, sıcak hava dalgası toplam risk haritası

Çizelge 10. Meteorolojik kuraklık, şiddetli yağış, sıcak hava dalgası toplam risk puanları ve alansal dağılımları

Risk düzeyi	Risk puanı	Ağırlık sınıfı	Alan (km ²)	Alansal dağılım (%)
Çok düşük	1	Çok düşük	0,0	0,0
Düşük	2	Düşük	9.312,3	42,0
Orta	3	Orta	7.734,8	34,9
Yüksek	4	Yüksek	5.105,3	23,0
Çok yüksek	5	Çok yüksek	0,0	0,0
Toplam			22.152,5	100,0

Çalışmada, meteorolojik kuraklık, şiddetli yağış ve sıcak hava dalgası riskleri karşılaştırılarak elde edilen toplam risk değerlendirildiğinde, Seyhan Havzasının 5.105,3 km²'lik, %23'ünü kapsayan havzanın güney kıyı kesimleri ve orta kesimlerinde yer alan Seyhan, Yüreğir, Çukurova, Sarıçam, Karaisalı, Karataş, Feke ve Aladağ'ın bir bölümü meteorolojik kuraklık, şiddetli yağış, sıcak hava dalgası parametreleri için yüksek risk taşıdığı tespit edilmiştir. Bu kısımlar havza nüfusunun %83'ünü oluşturmaktadır. Buna bağlı olarak içme suyu temini ihtiyacının, tarımsal faaliyetlerin yoğun olması sebebiyle su tüketiminin, sanayi kuruluşlarının yine bu bölgede faaliyet göstererek su kullanımının fazla olması yüksek risk unsurunu ortaya koymaktadır. 7.734,8 km²'lik %34,9'unu kapsayan havzanın orta kesimlerinde yer alan Pozantı, Aladağ, Saimbeyli, Tufanbeyli ilçelerinde meteorolojik kuraklık, şiddetli yağış, sıcak hava dalgası parametreleri için orta risk taşıdığı, 9.312,3 km²'lik, % 42'sini kapsayan havzanın kuzeyi ve batısında yer alan Ulukışla, Çamardı, Tomarza, Pınarbaşı, Sarız ilçelerinde ise düşük risk taşıdığı tespit edilmiştir (Şekil 7, Çizelge 10).

4. UYUM FAALİYETLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

İklim değişikliğine uyum, birçok alanda (turizm, tarım, su, gıda, halk sağlığı, altyapı, biyolojik çeşitlilik ve ekosistem, ulaşım, enerji, ulaşım, sanayi gibi) karar verme süreçlerini entegre olarak ele alan dinamik bir süreçtir. Bu sürece ilişkin dengeleri kurmak ve kentsel ölçekte tedbirler almak ile uyum süreci başlatılmalıdır. Türkiye' de iklim değişikliğinin su kaynaklarına etkisi ve uyum konularında birçok çalışma gerçekleştirilmiştir olup halen devam eden çalışmalar mevcuttur. Bu konuyla ilgili yapılan çalışmaların en başında bütünlük su kaynakları yönetimi anlayışı ile hazırlanmış olan havza ölçekli yönetim planları gelmektedir. Havza koruma eylem planları, havza kuraklık yönetim, havza su tahsis, havza yönetim, havza taşkın yönetim gibi havza ölçeğinde suyla ilgili yapılan tüm planları kapsamaktadır. Bu planlar havzadaki yeraltı ve yerüstü su kütlelerinin kalite ve miktar olarak korunması, ihtiyaç önceliklerine uygun biçimde tahsisinin yapılması ve taşkın, kuraklık gibi afetlerden korunarak sürdürülebilir su kullanımının sağlanması amacıyla hazırlanmaktadır. Bu çalışmada, iklim değişikliğinin su kaynaklarına olan etkileri meteorolojik kuraklık, şiddetli yağış, sıcak hava dalgası unsurları için analiz edilmiştir. Ortaya konan sonuçlar ışığında oluşacak risklerle ilgili, havza genelinde yüksek risk içeren öncelikli alanlar ve bu alan içerisinde yer alan ilgili su kaynaklarının korunması için yapılabilecek faaliyetler değerlendirilerek iklim değişikliği uyum süreci çalışmalarına katkı sunulmaya çalışılmıştır.

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

İklim değişikliği, hidrolojik çevrimde pek çok değişikliğe neden olmaktadır. Türkiye bulunduğu coğrafi konum durumuyla, ılıman kuşak ile tropikal kuşak arasında bulunmakta olup, konumu ve yer şekilleri farklı iklim koşullarının oluşmasına neden olmuştur. Yüksek dağlar nedeni ile deniz etkisinin ulaşması engellenen iç kesimlerde karasal iklim özellikleri görülürken, kıyı bölgelerinde deniz etkisiyle daha ılıman iklim özellikleri görülmektedir. Bu durum Türkiye'nin yağış rejiminde bölgesel olarak farklılıkların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Yağış rejimindeki farklılıklara ilave olarak, artan sıcaklıklar da hidrolojik döngüyü etkilemekte ve yağışın yer, zaman, süre ve şiddeti olumsuz yönde etkilenmektedir. Türkiye için geçmiş yıllarda hazırlanmış olan iklim projeksiyonlarında, iklim değişikliğinin yağış değişkenliğini artıracığı ve buna bağlı olarak su kaynaklarının potansiyelini ve kullanılabilirliğini doğrudan etkileyeceği tahmin edilmektedir. Bununla birlikte, kuraklık ve su kıtlığı olasılığı ile yağış şiddetindeki değişikliğe bağlı olarak taşkın ve sel gibi afetlerin de artacağı öngörülmektedir. Bu bağlamda, her bölge ve ekosistemin etkileneceği iklim tehlikesi birbirinden farklılıklar gösterebilmektedir. Örneğin, adalar ve kıyılar deniz seviyesi yükselmesinden daha fazla etkilenecek iken, ormanlar, yangınlar ve kuraklıktan, sulak alanlar kuraklık ve şiddetli yağışlardan, kentler sıcak hava dalgaları ve sellerden daha fazla etkilenebilecektir. Yine her bir bölge ve ekosistemin uyum kapasitesi ile duyarlılığını arttıran iklim değişikliği dışındaki faktörler de farklıdır. Bu nedenle ülke genelinde her bir ekosistem için ayrı etkilenebilirlik ve risk analizi yapılması gerekmektedir. İklim değişikliğinin etkileri tüm dünyada olduğu gibi araştırma alanı olan Seyhan Havzası'nda da gözlenmektedir ve gelecekte daha etkin bir şekilde hissedilecektir.

Yapılan bu çalışma ile, iklim değişikliğine bağlı olarak, su kaynaklarını olumsuz yönde etkileyecek, olası muhtemel risklerin başında gelen meteorolojik kuraklık, şiddetli yağış, sıcak hava dalgası riskleri ve bu unsurlara dolaylı etkileri olan topografya etkisi için meteorolojik ve istatistiksel verilerin kullanılması ile CBS tabanlı Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi kullanılarak havza genelinin risk değerlendirmesi yapılmış, risk unsurlarının öncelikli sıralaması yapılması ile birlikte, havzada alansal dağılımlar ve ağırlıklandırmalar belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardaki alansal

dağılım risk derecelerine göre, havza genelinde sınırlar içerisinde kalan yerleşim yerleri ve su kaynakları tespit edilmiştir.

Çalışma sonucunda, ana risk unsurları için yapılan AHP analizinde öncelik ağırlıkları sıralaması, %55,79 ile meteorolojik kuraklık, %26,33 ile şiddetli yağış, %12,19 ile sıcak hava dalgası, %5,69 ile topografya olarak tespit edilmiştir. Elde edilen risk haritaları değerlendirildiğinde ise havzanın %11,7'sini kapsayan güney ve kıyı kesimlerinde çok yüksek kuraklık riski, %8,5'ini kapsayan orta kesimlerinde yüksek şiddetli yağış riski, %1,3'ini kapsayan güney ve kıyı kesimlerinde çok yüksek sıcak hava dalgası riski, %0,8'ini kapsayan güney orta kesimlerinde yüksek derecede topografya etkisi altında olduğu tespit edilmiştir.

İlçe bazlı değerlendirildiğinde ise havza genelinde, en riskli alanların, meteorolojik kuraklık için Karataş, Seyhan, Yüreğir, Sarıçam ve Çukurova ilçelerinde, şiddetli yağış için Feke ve Aladağ ilçelerinde, sıcak hava dalgası için Karataş ilçesinin batı bölümünde, topografya için Çukurova ilçesinde bulunduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışma ile meteorolojik kuraklık riski taşıyan su kıtlığı yaşanabilecek su kaynakları değerlendirildiğinde, havza genelinde, çok yüksek riskli alan içinde kalan su kaynakları Seyhan Baraj Gölü, Akyatan Gölü, Seyhan Nehri, Körkün Çayı, Çakıt suyu olarak karşımıza çıkmaktadır. Yine yüksek risk için bakıldığında Çatalan Baraj Gölü, Eğlence Çayı, Doğan Çayı ve Feke Baraj Gölü, Asmaca çayını uzantısı yer almaktadır. Seyhan Havzası sınırları içinde yer alan su kaynakları, şiddetli yağış riski için değerlendirildiğinde yüksek riskli alan içinde su kaynakları, Yedigöze Baraj Gölü, Feke Baraj Gölü, Doğançay, Kisenit Çayı, Asmaca Çayı, Salam Deresi, Bağdere yer almaktadır. Çalışmada Seyhan Havzası sınırları içinde yer alan su kaynakları, sıcak hava dalgası riski için değerlendirildiğinde çok yüksek riskli alan içinde su kaynağı olarak Akyatan Gölü ve Tuz Gölü yer almaktadır. Yüksek sıcak hava dalgası riski bulunan alanlara bakıldığında ise Seyhan Baraj Gölü ve Çatalan Baraj Gölü ile Çakıt Suyu, Körkün Çayı, Eğlence Çayı, Seyhan Nehri yer almaktadır. Ayrıca çalışmada, diğer iklimsel risklere eki eden topografya koşulları değerlendirilmek üzere topografik parametreler, analiz edilmiş ve havza geneli yüksek riskli alan içinde kalan su kaynağı olarak Seyhan Nehri ve Seyhan Baraj Gölü sonucu ortaya çıkmıştır. Burada su kaynağı verimine etki eden özellikle arazi kullanımı faktörü bu bölgedeki topografya etkisini ortaya çıkmıştır.

Sonuç olarak, yapılan çalışmada, Seyhan Havzası için tüm risk unsurlarının CBS tabanlı AHP analizi ile çakıştırılması sonucu ortaya konan toplam risk (meteorolojik kuraklık-şiddetli yağış-sıcak hava dalgası-topografya için) haritası değerlendirildiğinde, havzanın güney kıyı kesimleri ve orta kesimlerinde yer alan Seyhan, Yüreğir, Çukurova, Sarıçam, Karaisalı, Karataş, Feke ve Aladağ'ın bir bölümü meteorolojik kuraklık, şiddetli yağış, sıcak hava dalgası, topografya parametreleri için yüksek risk taşıdığı, orta kesimlerinde yer alan Pozantı, Aladağ, Saimbeyli, Tufanbeyli ilçelerinde orta risk taşıdığı, havzanın kuzeyi ve batısında yer alan Ulukışla, Çamardı, Tomarza, Pınarbaşı, Sarız ilçelerinde ise düşük risk taşıdığı tespit edilmiştir.

Çalışma sonucu yaşanması muhtemel iklim olayları genel olarak değerlendirildiğinde, kuraklık sonucu yaşanacak, su kullanım kısıtlamalarının yanı sıra, besin ve kirleticilerin daha az hacimdeki su içerisinde bulunmasından dolayı su kalitesinin bozulması ile karşı karşıya kalınabilecektir. Su sıcaklıklarındaki artış çözünmüş oksijen miktarını düşürecek, bu durum su kalitesini direk olarak etkileyecektir. Uzun süre devam eden kuraklık kirleticilerin toprak yüzeyinde birikmesine sebep verecek bu da yağışlar başladığında su kaynaklarının kalitesi için risk oluşturmaktadır. Su kaynaklarının azalmasının, doğal yaşam alanlarında bulunan bitki ve hayvan türlerinin yaşam alanlarını tehdit ettiği gerçeği ortaya çıkmaktadır. Hava sıcaklıkları ve yağışlardaki dalgalanmaların, kırsal kesimlerde özellikle çiftçilerin ürün miktarları ve buna bağlı olarak da gelirleri üzerinde olumsuz etkileri olmaktadır. Kentler ve kentlerde yaşayanlar, aynı iklim olayları karşısında kırsal kesimlerde yaşayanlardan farklı zorluklarla karşı karşıyadır. Kentler özellikle düzensiz yağış rejimi karşısında daha etkilenebilir durumdadır. Ani ve şiddetli yağışlar, kentin altyapısında aşırı yüklemeye neden olup sokaklarda ani taşkınlara, kanalizasyon ve su altyapılarında tahribata ve alçak kesimlerdeki ev ve işyerlerinde su baskınlarına yol açmaktadır. Buna karşılık, kuraklığın hakim olduğu dönemlerde, uzun süreli yağış eksikliği, su kaynaklarının aşırı kullanımına ve kronik su kesintilerine sebep olabilecektir. Bu nedenle risk tespiti yapılan alan ve kaynaklar için su tasarımı ve yönetimi, ağaçlandırma ve toprak koruma, güneş enerjisi ve diğer enerji kaynaklarının kullanımı, toplu eğitimler ve farkındalık yaratmak için yapılacak önlemler, erken uyarı sistemleri, hakkındaki öneriler uyum faaliyetleri bölümünde detaylı olarak anlatılmaya çalışılmıştır.

Çalışma sonuçlarında elde edilen bulgulardaki alansal ve bölgesel ayrımlar ile özellikle nüfus yoğunluğunun fazla olduğu kentsel ve daha düşük nüfus sahip kırsal alanlar ayrı ayrı değerlendirilerek, karar verici ve paydaşlara alınacak tedbirler ve uyum faaliyetleri konusunda ışık tutması amaçlanmıştır. Bu çalışma, CBS tabanlı Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi kullanılması ile birden fazla risk unsurunu bir arada değerlendirme yaklaşımı yönünden farklılık yaratmıştır. Bu bilgiler ışığında, Seyhan Havzasında yapılabilecek yeni çalışmalar için araştırmacılara bir altyapı oluşturulmasına yardımcı olabilecektir. Ayrıca, havza genelindeki su kaynakları özelinde geliştirilmeye açık olan bu çalışma, özellikle iklim değişikliği uyum sürecinde rol alan kurumlarca yapılacak uyum faaliyetleri kapsamında gerekli önlemler alınması yönünden önem arz etmektedir.

6. KAYNAKLAR

1. Elajail, I.S.I., Sevik, H., Ozel, H.B. & Isik, B. (2022). Examining the chemical compositions of mineral concrete agents in terms of their environmental effects. *Fresenius Environmental Bulletin*, 31(9), 9784-9790.
2. Ghoma, WEO, Sevik, H. ve Isinkaralar, K. (2022). Tütün dumanı ile toksik metallerin tespiti için iç mekan bitkilerinin biyomonitör olarak kullanılması. *Hava Kalitesi, Atmosfer ve Sağlık*, 15(3), 415-424.
3. Nassar, Y.F., Salem, M.A., Iessa, K.R., AlShareef, I.M., Ali, K.A. & Fakher, M.A.(2021). Estimation of CO₂ emission factor for the energy industry sector in libya: a case study. *Environment, Development and Sustainability*, 23(9), 13998-14026.
4. Varol, T., Canturk, U., Cetin, M., Ozel, H.B., Sevik, H. (2021a) Impacts of climate change scenarios on European ash tree (*Fraxinus excelsior* L.) in Turkey. *Forest Ecology and Management*, 491(2021a) 119199.
5. Varol, T., Ozel, H.B., Ertugrul, M., Emir, T., Tunay, M., Cetin, M. & Sevik, H. (2021b). Prediction of soil-bearing capacity on forest roads by statistical approaches. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(8), 527.
6. Aslam, B., Hu, J., Ali, S., AlGarni, T.S. & Abdullah, M.A. (2022). Malaysia's economic growth, consumption of oil, industry and CO₂ emissions: evidence from the ARDL model. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(4), 3189-3200.
7. Chia, S.R., Chew, K.W., Leong, H.Y., Ho, S.H., Munawaroh, H.S.H. & Show, P.L. (2021). CO₂ mitigation and phycoremediation of industrial flue gas and wastewater via microalgae-bacteria consortium: Possibilities and challenges. *Chemical Engineering Journal*, 425, 131436.
8. Sovacool, B.K., Griffiths, S., Kim, J. & Bazilian, M. (2021). Climate change and industrial F-gases: A critical and systematic review of developments, sociotechnical systems and policy options for reducing synthetic greenhouse gas emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110759.
9. Tokmakçı, M., Bilgili, M. ve Pınar, E. (2025). Küresel iklim değişikliği ve iklim göstergelerindeki tarihsel eğilimler. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 40(1), 127-140.
10. Nacar, S. (2020). İklim değişikliğinin doğu karadeniz havzası sıcaklık ve yağış parametreleri üzerindeki olası etkilerinin incelenmesi. *Doktora tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
11. Vörösmarty, C.J., McIntyre, P.B., Gessner, M.O., Dudgeon, D., Proussevitch, A.A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S.E., Sullivan, C., Liermann, C.R. & Davies, P.M. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467(7315), 555-561.
12. URL-1.(2023, Haziran 5). 2022 Raporu: https://cdn.nys.tarimorman.gov.tr/api/File/GetFile/425/Sayfa/759/1107/DosyaGaleri/d_Faaliyetsi2022faaliyetrporu.pdf adresinden alınmıştır.
13. URL-2 (2023, Haziran 5). Toprak [https://www.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/754#:~:text=Ülkemizde Su kişı Kaynakları: başına kullanılabilir, yaşıyan ülkeler arasında yer almaktadır](https://www.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/754#:~:text=Ülkemizde Su kişı Kaynakları: başına kullanılabilir, yaşıyan ülkeler arasında yer almaktadır adresinden alınmıştır) adresinden alınmıştır.
14. Merkepçi, M. (2025). Seyhan Havzası'nda yer alan üç istasyon için yapay sinir ağı kullanarak akış modeli geliştirilmesi üzerine bir çalışma. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 40(2), 453-461.
15. Saaty, T.L. (1980). *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw Hill. Pittsburgh: RWS Publications.
16. Saaty, T.L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83-98.
17. Goepel, K.D. (2018). Implementation of an online software tool for the analytic hierarchy process (AHPOS). *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 10(3), 469.

18. Harmancıoğlu, N., Özkul, S., Fıstıkoğlu, O., Barbaros, F., Onuşluel, G., Çetinkaya, C.P. ve Dalkılıç, Y. (2007). İklim değişikliğinin Büyük Menderes ve Gediz havzalarına olası etkileri. *İklim Değişikliği & Türkiye*, BM Kalkınma Programı.
19. Ekmekçi, M. (2008). Jeolojik geçmişten günümüze iklim değişiklikleri: küresel iklim değişimi ve Türkiye. *TMMOB İklim Değişimi Sempozyumu*, 13-14 Mart, Ankara, 726.
20. Tarım ve Orman Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (2019). *Kuraklık Yönetim Planı*.
21. Zimba, I. ve Acar, Z. (2021). Ege Bölgesi'ndeki şiddetli yağışlar. *İzmir Sosyal Bilimler Dergisi*, 3(2), 165-174.
22. Collins, M., Knutti, R. & Arblaster, J. (2013). Long-term Climate Change: projections, commitments and irreversibility. In: *Climate Change The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin & G.-K. Plattner, et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, U K and New York, NY, USA.
23. Kuglitsch, F.G., Toreti, A., Xoplaki, E., Della-Marta, P.M., Zerefos, C.S., Türkeş, M. & Luterbacher, J. (2010). Heat wave changes in the eastern Mediterranean since 1960. *Geophysical Research Letters*, 37, 1-5.

Corrosion Behavior of Nickel-Titanium Alloy in Simulated Body Fluids

Büşra DAĞ^{1,a}, Güray KILINÇÇEKER^{1,b}

¹Çukurova University, Faculty of Art and Science, Department of Chemistry, Adana, Türkiye

^aORCID: 0000-0001-7877-5867; ^bORCID: 0000-0003-3030-4518

Article Info

Received : 21.07.2025

Accepted : 24.10.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1747377

Corresponding Author

Büşra DAĞ

bdag@cu.edu.tr

Keywords

Nitinol

Biomaterial

Corrosion

EIS

How to cite: DAĞ, B., KILINÇÇEKER, G., (2025). Corrosion Behavior of Nickel-Titanium Alloy in Simulated Body Fluids. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(4), 819-826.

ABSTRACT

Nitinol, a nickel–titanium alloy, is widely used as a biomaterial because of its strong biocompatibility, ease of processing, and stable mechanical performance. However, its interaction with body fluids such as sweat, saliva, and tissue fluid is critical, since even relatively mild biological environments can still lead to corrosion and metal-ion release. In this study, the corrosion behavior of Nitinol was investigated electrochemically at 37 °C to simulate human body temperature. A naturally formed passive oxide layer was detected on the alloy surface, and its stability varied depending on the solution. EIS measurements showed impedance values of 6.85×10^5 ohm.cm² in Fusayama Meyer artificial saliva, 8.35×10^5 ohm.cm² in PBS, and 3.82×10^6 ohm.cm² in Hank's solution. Potentiodynamic polarization results supported these findings. Overall, the passive film demonstrated the greatest stability and corrosion resistance in Hank's artificial body fluid, indicating Nitinol's strong suitability for long-term biomedical use.

Yapay Vücut Sıvılarında Nikel-Titanyum Alaşımının Korozyon Davranışının İncelenmesi

Makale Bilgileri

Geliş : 21.07.2025

Kabul : 24.10.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1747377

Sorumlu Yazar

Büşra DAĞ

bdag@cu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Nitinol

Biyomalzeme

Korozyon

EIS

Atf şekli: DAĞ, B., KILINÇÇEKER, G., (2025). Yapay Vücut Sıvılarında Nikel-Titanyum Alaşımının Korozyon Davranışının İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(4), 819-826.

ÖZ

Nikel titanyum alaşımı olan Nitinol metali; biyouyumlu yapısı, işlenebilirliği, dayanıklı mekanik özellikleri ile biyomalzeme olarak tercih edilmektedir. Biyomalzemelerin insan vücudundaki sıvılarla (ter, tükürük, doku sıvısı vb.) etkileşimi, bu etkileşim sırasında vücuda iyon salımı ile oluşabilecek toksik etkilerin araştırılması açısından önemlidir. Vücut sıvıları çok aşırı saldırgan olmamalarına rağmen doğrudan ya da dolaylı olarak metalle etkileşimleri halinde metalin korozyona uğraması kaçınılmazdır. Bu çalışmada Nitinol metalinin farklı vücut sıvılarında korozyon davranışları vücut sıcaklığı olarak kabul edilen 37°C'de elektrokimyasal olarak incelenmiştir. Sonuç olarak; Nitinol yüzeyinde doğal olarak pasif oksit filmi oluşumu gözlenmiş ve kararlılığı farklı vücut sıvılarında değişiklik göstermiştir. EIS sonuçları Fusayama Meyer'in yapay tükürük çözeltisi, PBS çözeltisi ve Hank'ın yapay vücut sıvısı için sırasıyla, 6.85×10^5 ohm.cm², 8.35×10^5 ohm.cm², 3.82×10^6 ohm.cm² dir. Potansiyodinamik polarizasyon eğrileri, EIS sonuçları ile uyumludur. Nitinol alaşımının yüzeyinde oluşan pasif oksit filmin Hank'ın yapay vücut sıvısı içerisinde daha kararlı yapıya sahip olduğu ve korozyona karşı daha dirençli olduğu belirlenmiştir.

1. INTRODUCTION

Metals naturally occur as compounds in their lowest-energy, most stable states, such as oxides, sulfides, carbonates, and phosphates, in accordance with thermodynamic laws. Energy must be expended to produce metals or alloys from these compounds. As the energy of metals increases, their disorder decreases. All metals tend to return to their most stable state in nature. Corrosion is the process by which metallic materials revert to their primitive, stable state in nature by interacting with their environment [1,2]. This process causes significant problems, especially in biomaterial applications. [3-8]. Biomaterials are natural or artificial materials used to perform or support the function of the tissue or organ into which they are implanted in the living body [9-13]. Biomaterials are expected to coexist with the tissue they directly contact without adverse interactions. This expectation ensures long-term quality of life for the organisms that use them [8,9]. The use of metallic biomaterials in various orthopedic applications, including plate and screw materials, joint prostheses, hearing aids, jaw and facial components, heart valves, stents, catheters, artificial heart parts, and dental implants, is crucial for examining the corrosion of these materials [7,9,17-20]. The rate of corrosion of metals varies depending on many factors such as environmental conditions, duration of use, movement of the metal, design of the system, and the presence of microorganisms [4,7,17,19,21,22]. According to these factors, corrosion is divided into different types [1,2,23,24]. General corrosion, which occurs evenly across the metal surface, is called pitting corrosion. Galvanic corrosion, which occurs when metals that are electrochemically different come into contact, is called galvanic corrosion. Crevice corrosion, which occurs when a metal touches a narrow gap, is caused by insufficient oxygen. Stress corrosion, which progresses by creating cracks under tensile stress, is called intergranular corrosion, which progresses along the grain boundaries of the metal. Metallic biomaterials are typically exposed to complex, oxygen-rich physiological environments that contain various inorganic ions (such as chloride, carbonate, calcium, sodium, and potassium), as well as biological components including proteins, lipids, amino acids, and cells that tend to accumulate around the metal surface [7-9,25]. Nitinol (50%Ni, 50%Ti) stands out among the preferred metallic biomaterials due to its biocompatible structure, good processability, strength and durability in environmental conditions [26-28]. Nitinol, which has an elastic modulus similar to that of bone, is widely used in orthodontics, bone fracture treatment, and as bone suture anchors to attach soft tissues such as tendons and ligaments to bone. Its shape memory properties also make it suitable for use in medical devices that can be delivered to the patient through minimally invasive methods, such as via a thin catheter [27-29]. Considering these properties, constant contact with living body fluids is inevitable. Body fluids act as the electrolyte medium necessary for the electrochemical corrosion of Nitinol, and its contact with body fluids demonstrates the inevitability of corrosion. Titanium is known to have excellent corrosion resistance [3,30,31]. However, Nitinol tends to be coated with a TiO₂-based oxide containing nickel, which is both oxidized and metallic. It is useful to examine the relationship between the composition of the Nitinol surface oxide and its corrosion resistance.

In literature studies, corrosion studies were conducted on Nitinol, which has a porous surface, in a saltwater environment at 37°C, and it was determined that Nitinol exhibited pitting corrosion properties. Mott-Schottky analysis determined that the passive film formed on the surface exhibited n-type semiconductor properties. [26]. In another study, the corrosion behavior of Nitinol obtained from nickel and titanium elements by spraying method with bulk Nitinol was investigated in Hanks and Ringer solutions at 37°C and it was determined that Nitinol obtained in thin film form was more resistant to corrosion. [32]. In another study, the corrosion resistance of Nitinol was studied in an artificial body fluid that was not in contact with air and it was determined that the oxide film had a protective effect on the surface at high loads. [33].

In this study, electrochemical methods were used to determine the durability and corrosion behavior of Nitinol, a biocompatible, easily processable biomaterial preferred by many in environments such as Hank's simulated body fluid, phosphate-buffered saline, and Fusayama Meyer's simulated saliva solution [32-35] at 37°C (body temperature) [32,33]. For this purpose, EIS measurements and potentiodynamic polarization curves were taken. SEM (Scanning Electron Microscope) and EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) techniques were used to examine surface morphology.

2. MATERIAL AND METHOD

The electrochemical measurements required for corrosion behavior were carried out using the three-electrode method in a single-compartment cell set up in a water bath (37°C). Nitinol was used as the

working electrode, platinum (Pt) with a surface area of 2 cm² was used as the counter electrode and Ag/AgCl (3 M KCl) electrode was used as the reference electrode. Prior to each measurement, the surface of the Nitinol samples was mechanically polished using silicon carbide (SiC) abrasive papers with grit sizes of 600, 1000, and 1200, followed by ultrasonic cleaning for 5 minutes in ethanol and 5 minutes in deionized water. Test solutions are Hank's artificial body fluid (NaCl 8.00 g/L; KCl 0.40 g/L; CaCl₂ 0.18 g/L; NaHCO₃ 0.35 g/L; Na₂HPO₄·2H₂O 0.48 g/L; MgCl₂·6H₂O 0.10 g/L; KH₂PO₄ 0.06 g/L; MgSO₄·7H₂O 0.10 g/L; Glucose 1.00 g/L) [34] Phosphate buffered saline (PBS solution) (NaCl 8.00 g/L; KCl 0.2 g/L; Na₂HPO₄·2H₂O 1.42 g/L; KH₂PO₄ 0.24 g/L) [37] and Fusayama Meyer's artificial saliva solution (KCl 0.40 g/L; NaCl 0.40 g/L; CaCl₂·2H₂O 0.91 g/L; Na₂HPO₄·2H₂O 0.69 g/L; Na₂S·9H₂O; 0.0005 g/L; Urea; 1.00 g/L) [38] was used. Measurements were made in triplicate. Electrochemical measurements were made using a CHI 660D instrument. EIS measurements were taken at an open-circuit potential with an amplitude of 5 mV in the frequency range of 10⁵-10⁻³ Hz. Potentiodynamic polarization curves were obtained in the range of -1 to +1 V at a scan rate of 1 mV/s. The results were determined using the Zview program. Surface analyses of Nitinol were performed using a SEM-EDS (SEM/EDS FEI Quanta 650 Field Emission) instrument to investigate its structural properties.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1. Corrosion Potential-Time Curves

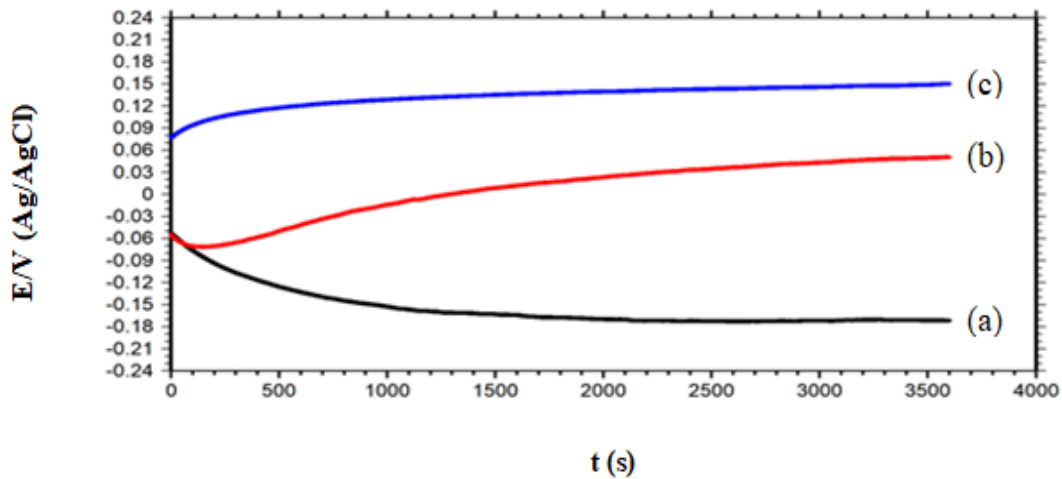


Figure 1. Corrosion potential with time for Nitinol alloy in different body fluids: Hank's artificial body fluid solution (Black (a)), PBS solution (Red (b)), Fusayama Meyer's artificial saliva solution (Blue (c))

Nitinol was compared in various body fluids by monitoring its open-circuit potential over time, which indicates its electrochemical stability. Nitinol has a natural and relatively stable oxide layer on its surface [39-41]. It was observed that this oxide layer thickens or degrades over time when Nitinol comes into contact with various body fluids. Corrosion potential indicates that the oxidation reaction within the metal's electrochemical cell is occurring, making the metal more easily oxidized. The shift of the corrosion potential to positive values indicates that the passive oxide film formed on the surface is more stable and more resistant to corrosion [42, 43]. Accordingly, it can be interpreted that the passive oxide film on the surface of Hank's artificial body fluid solution, which has a negative corrosion potential, is more unstable than PBS and Fusayama Meyer's artificial saliva solution.

3.2. Electrochemical Impedance Spectroscopy Measurements

Electrochemical impedance spectroscopy (EIS), a non-destructive and complementary technique based on alternating current (AC), is widely used to determine the corrosion rate of metal surfaces. Since the applied AC signal does not significantly alter the surface structure, this method is considered to yield more accurate and reliable information regarding the corrosion resistance and interfacial properties of the metal. In EIS, the polarization resistance representing the resistive components at the electrode electrolyte interface is determined using an equivalent electrical circuit model (Figure 2. (1)) [44-46].

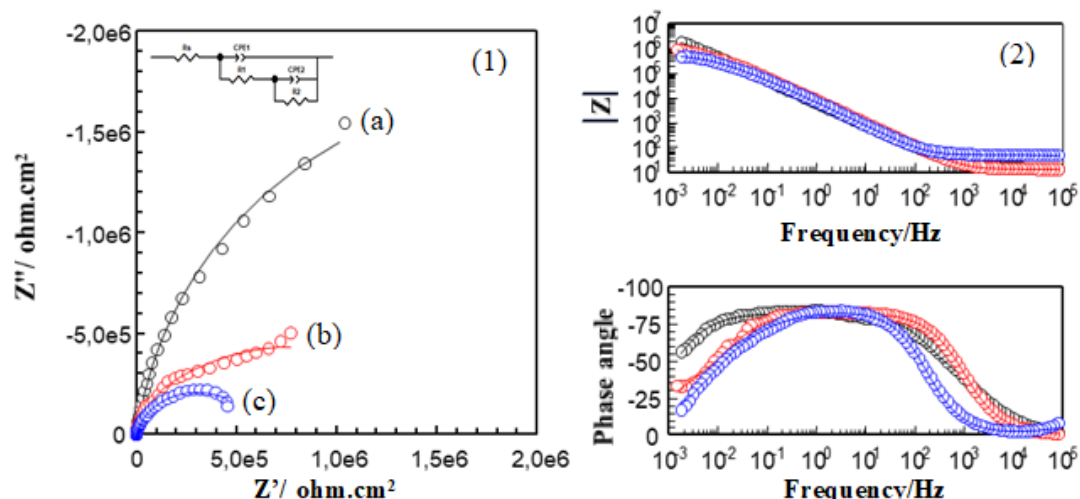


Figure 2. EIS results for Nitinol alloy in different body fluids; Nyquist Curves (1) Bode Curves (2); Hank's artificial body fluid solution (Black (a)), PBS solution (Red (b)), Fusayama Meyer's artificial saliva solution (Blue (c))

The Nyquist and Bode plots of Nitinol in different simulated body fluids were obtained using the Zview program based on the equivalent circuit shown in Figure 2. In this equivalent circuit, the capacitive behavior is modeled using a constant phase element (CPE); R_s represents the solution resistance; R_1 corresponds to the charge transfer resistance; and R_2 represents the resistance of the passive film presumed to form on the surface, which contributes to ion accumulation and provides physical protection to the metal, even in the absence of a fully developed passive layer. Nyquist curves, which are compatible with Bode curves, show a single loop that starts in the high frequency region, continues in the mid-frequency region, and closes in the low frequency region [44-46]. The resistance values listed in Table 1 for Hank's solution, PBS, and Fusayama-Meyer artificial saliva suggest that increasing total resistance correlates with enhanced TiO_2 formation on the Nitinol surface due to interaction with dissolved oxygen, thereby improving corrosion resistance.

Table 1. Parameters found from EIS measurements of Nitinol alloy in different body fluids.

Body fluids	CPE1 ($\text{S s}^n \text{cm}^2$)	n1	R_s (ohm cm^2)	CPE2 ($\text{S s}^n \text{cm}^2$)	n2	R_2 (ohm cm^2)
Hank Sol.	1.55×10^{-5}	0.91	60.47	1.31×10^{-5}	0.91	3.82×10^6
PBS Sol.	2.29×10^{-6}	0.92	5.64×10^5	3.58×10^{-5}	0.72	8.35×10^5
Fusayama Meyer Sol.	5.82×10^{-6}	0.50	41.69	2.31×10^{-5}	0.95	6.85×10^5

3.3. Potentiodynamic Polarization Measurements

Figure 3 shows the potentiodynamic polarization curves of Nitinol obtained in different body fluids. It is observed that there is no significant difference in the potentiodynamic polarization curves obtained from body fluids. The current is constant between -0.4 and 0.2 V in the cathodic direction. Oxygen in different body fluids comes to the surface from solutions by diffusion. Therefore, it is limited by mass transfer, and a significant oxygen reduction current limit is observed in the -0.4 to -0.2 V range. Reduction is observed between -0.4 and -1 V, where oxidation occurs. In the anodic region, a passivation zone is observed with a value close to the oxygen limit current. It can be concluded that the reaction occurring here is between the oxygen in body fluids and the Nitinol surface, causing spontaneous TiO_2 formation. More positive zero current potentials reflect higher corrosion protection [47,48]. According to the curves obtained in Hank's simulated body fluid, PBS, and Fusayama Meyer's simulated saliva solution, the current zero potentials are +0.47 V, +0.54 V, and +0.62 V, respectively. These potential values approaching positive values also show that Hank's artificial body fluid, PBS and Fusayama Meyer's artificial saliva solution are more resistant to corrosion, respectively.

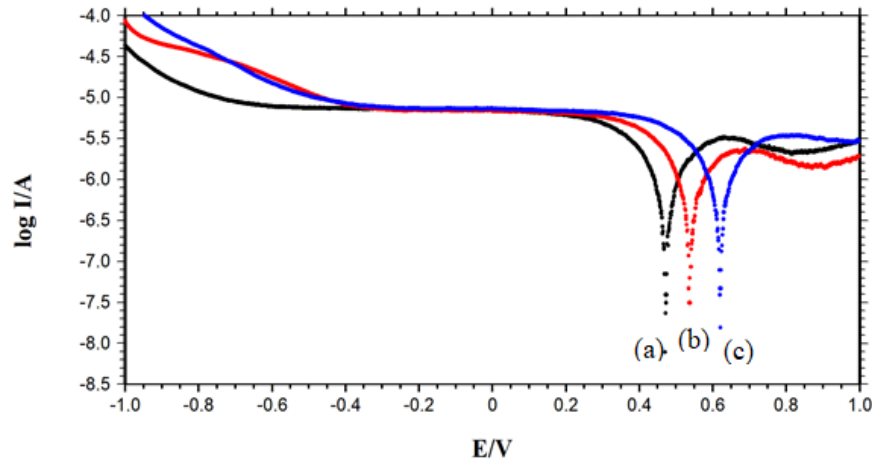


Figure 3. Potentiodynamic polarization curves for Nitinol alloy in different body fluids; Hank's artificial body fluid solution (Black (a)), PBS solution (Red (b)), Fusayama Meyer's artificial saliva solution (Blue (c))

3.4. SEM-EDS Results

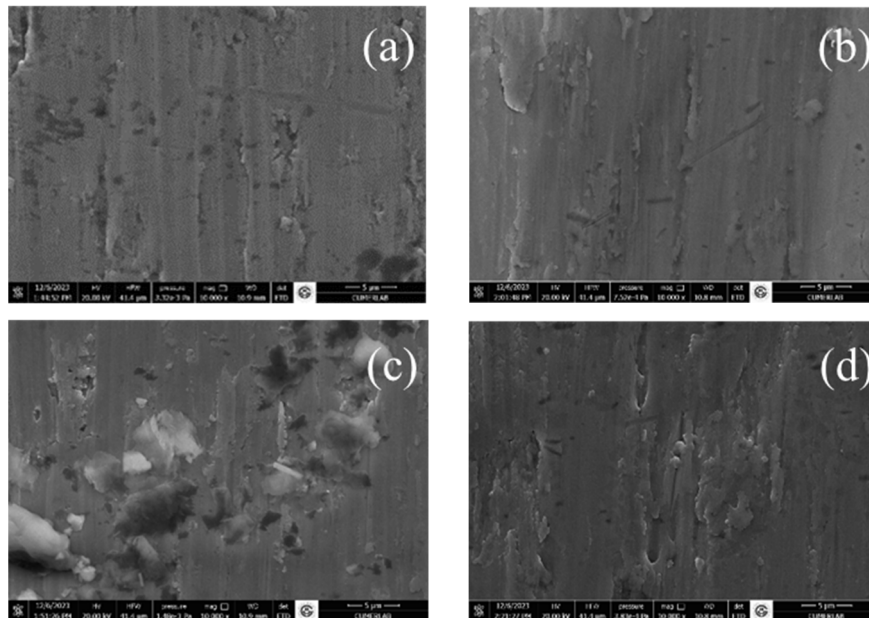


Figure 4. SEM images of Nitinol kept in different body fluids for 120 hours; Nitinol (a) Hank's artificial body fluid solution (b) PBS solution (c) Fusayama Meyer's artificial saliva solution (d)

Figure 5 presents SEM images of Nitinol surfaces after immersion in different simulated body fluids for 120 hours, revealing notable differences in surface morphology depending on the environment. The untreated Nitinol surface (Figure 5a) exhibited a smooth and homogeneous structure, with well-preserved linear polishing marks and no evidence of pitting, cracking, or particle deposition. After exposure to Hank's simulated body fluid (Figure 5b), the surface remained largely intact, showing only minor particle deposits and localized surface irregularities. These observations suggest that the mildly corrosive nature of Hank's solution led to limited interaction with the passive layer while preserving overall surface integrity. In contrast, the surface of Nitinol immersed in PBS (Figure 5c) showed severe degradation, including dense particle accumulation and amorphous precipitates. The complete disappearance of surface markings, indications of pitting corrosion, and disruption of the passive film imply that PBS created a highly corrosive environment, potentially leading to leaching of titanium and nickel from the alloy surface. Nitinol exposed to Fusayama-Meyer artificial saliva (Figure 5d) exhibited moderate corrosion, characterized by surface roughening, partial loss of linear features, and scattered precipitate formation. This suggests partial degradation of the passive layer and a moderately aggressive interaction with the solution [41].

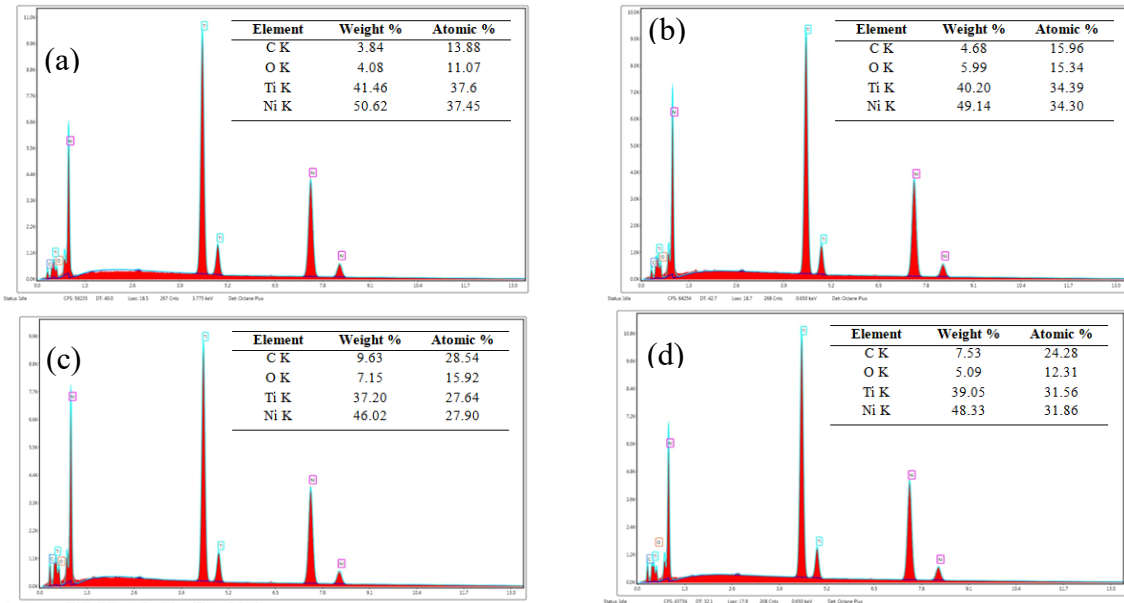


Figure 5. EDS result of Nitinol kept in different body fluids for 120 hours; Nitinol (a) Hank's artificial body fluid solution (b) PBS solution (c) Fusayama Meyer's artificial saliva solution (d)

In the EDS analyses given in Figure 5, parallel to the SEM images, the decrease in Ti and Ni percentages was clearly seen especially in the PBS solution, while the increase in O and C percentages supports the oxidation and organic/inorganic precipitation processes on the surface.

4. CONCLUSIONS

The corrosion behavior of Nitinol, used as a metallic biomaterial in various body parts, was electrochemically investigated in various body fluids and supported by surface analyses. As a result of this study, it was determined that:

- ✓ Titanium, one of the elements constituting Nitinol, is reduced by oxygen in body fluids, forming a passive film on the surface.
- ✓ Corrosion resistance was determined to increase by 685011 ohm cm², 1399490 ohm cm² ve 3817460 ohm cm² in Fusayama Meyer's artificial saliva solution, PBS solution, and Hank's artificial saliva solution, respectively. These data indicate that the increased resistance of the passive film formed on the surface increases, and the lower emissivity indicates a higher polarization resistance.
- ✓ Potentiodynamic polarization curves show zero-current potentials of +0.47 V, +0.54 V, and +0.62 V in Hank's artificial saliva, PBS, and Fusayama Meyer's artificial saliva solutions, respectively. These potential values, approaching positive values, indicate that Nitinol exposed to Hank's simulated body fluid is more resistant to corrosion.

SEM-EDS results show that the passive film formed on the Nitinol surface by various body fluids significantly protects the metal, but over time, it breaks down and pitting corrosion begins.

5. REFERENCES

1. Erbil, M. (2012). *Korozyon I. ilkeler-önlemler*. Korozyon Derneği Yayını, Ankara, 1.
2. Üneri, S. (2011). *Korozyon ve önlenmesi*. Korozyon Derneği, 3. Baskı, Ankara, 1.
3. Parau, A.C., Juravlea, G.A., Raczowska, J., Vitelaru, C., Dinu, M., Awsuiuk, K. & Vladescu, A. (2023). Comparison of 316L and Ti6Al4V biomaterial coated by ZrCu-based thin films metallic glasses: Structure, morphology, wettability, protein adsorption, corrosion resistance, biomineralization. *Applied Surface Science*, 612, 155800.

4. Nielsen, K. (1987). Corrosion of metallic implants. *British Corrosion Journal*, 22(4), 272-278.
5. Mears, S.C. & Kates, S.L. (2015). A guide to improving the care of patients with fragility fractures, edition 2. *Geriatric Orthopaedic Surgery & Rehabilitation*, 6(2), 58-120..
6. Rushing, G.D., Goretsky, M.J., Gustin, T., Morales, M., Kelly Jr, R.E. & Nuss, D. (2007). When it is not an infection: metal allergy after the Nuss procedure for repair of pectus excavatum. *Journal of Pediatric Surgery*, 42(1), 93-97.
7. Eliaz, N. (2019). Corrosion of metallic biomaterials: A review. *Materials*, 12(3), 407.
8. Saini, M., Singh, Y., Arora, P., Arora, V. & Jain, K. (2015). Implant biomaterials: A comprehensive review. *World Journal of Clinical Cases: WJCC*, 3(1), 52.
9. Pacifici, L., De Angelis, F., Orefici, A. & Cielo, A. (2017). Metals used in maxillofacial surgery. *ORAL & Implantology*, 9(Suppl 1/2016 to N 4/2016), 107.
10. Sharma, B., Williams, C.G., Kim, T.K., Sun, D., Malik, A., Khan, M., Leong, K. & Elisseeff, J.H. (2007). Designing zonal organization into tissue-engineered cartilage. *Tissue Engineering*, 13(2), 405-414.
11. Bazaka, K. & Jacob, M.V. (2012). Implantable devices: issues and challenges. *Electronics*, 2(1), 1-34.
12. Rajan, S.T., Subramanian, B. & Arockiarajan, A. (2022). A comprehensive review on biocompatible thin films for biomedical application. *Ceramics International*, 48(4), 4377-4400.
13. Baskaran, P., Muthiah, B. & Uthirapathy, V. (2025). A systematic review on biomaterials and their recent progress in biomedical applications: bone tissue engineering. *Reviews in Inorganic Chemistry*, 45(4), 747-781.
14. Kang, C.W. & Fang, F.Z. (2018). State of the art of bioimplants manufacturing: part I. *Advances in Manufacturing*, 6(1), 20-40.
15. Kang, C. W. & Fang, F.Z. (2018). State of the art of bioimplants manufacturing: part II. *Advances in Manufacturing*, 6, 137-154.
16. Rajan, S.T., Subramanian, B. & Arockiarajan, A. (2022). A comprehensive review on biocompatible thin films for biomedical application. *Ceramics International*, 48(4), 4377-4400.
17. Prasad, K., Bazaka, O., Chua, M., Rochford, M., Fedrick, L., Spoor, J., Symes, R., Tieppo, M., Collins, C., Cao, A., Markwell, D., Ostrikov, K. & Bazaka, K. (2017). Metallic biomaterials: current challenges and opportunities. *Materials*, 10(8), 884.
18. Hermawan, H., Ramdan, D. & Djuansjah, J.R. (2011). Metals for biomedical applications. *Biomedical Engineering-From Theory to Applications*, 1, 411-430.
19. Niinomi, M. (2002). Recent metallic materials for biomedical applications. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33, 477-486.
20. Tonetti, J. & Boudissa, M. (2025). Biomaterials in spine surgery. In *Spine Surgery: General Considerations and Fundamental Concepts Vol. 1*, 111-124). Cham: Springer Nature Switzerland.
21. Xu, W., Yu, F., Addison, O., Zhang, B., Guan, F., Zhang, R., Hou, B. & Sand, W. (2024). Microbial corrosion of metallic biomaterials in the oral environment. *Acta Biomaterialia*, 184, 22-36
22. Negahban, A., Shamsi, M. & Sedighi, M. (2024). Advances in the modification of magnesium-based biomaterials to address corrosion and corrosion-fatigue: A review of developments and prospects. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 4064-4108.
23. Revie, R.W. & Uhlig, H.H. (2025). *Corrosion and corrosion control*. John Wiley & Sons.
24. Li, S., Li, C. & Wang, F. (2024). Computational experiments of metal corrosion studies: A review. *Materials Today Chemistry*, 37, 101986.
25. Agarwal, N., Gallagher, K.A., Keaveny, S., Carton, J.G., Brabazon, D. & Obeidi, M.A. (2024). Influence of processing parameters on the corrosion resistance of additively manufactured nitinol parts for biomedical applications. *Results in Materials*, 21, 100536.
26. Bai, Z. & Rotermund, H.H. (2011). The intrinsically high pitting corrosion resistance of mechanically polished nitinol in simulated physiological solutions. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 99(1), 1-13.
27. Carroll, W.M. & Kelly, M.J. (2003). Corrosion behavior of nitinol wires in body fluid environments. *Journal of Biomedical Materials Research Part A: An Official Journal of the Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and the Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials*, 67(4), 1123-1130.
28. Clarke, B., Carroll, W., Rochev, Y., Hynes, M., Bradley, D. & Plumley, D. (2006). Influence of nitinol wire surface treatment on oxide thickness and composition and its subsequent effect on corrosion resistance and nickel ion release. *Journal of Biomedical Materials Research Part A: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials*, 79(1), 61-70.

29. Datta, S., Chakraborty, R., Raza, M.S., Saha, P. & Pratihari, D.K. (2023). Comparative study on weld characterisation and corrosion performance of laser-welded NiTiInol. *Science and Technology of Welding and Joining*, 28(8), 792-802.
30. Pound, B.G. (2014). Corrosion behavior of metallic materials in biomedical applications. I. Ti and its alloys. *Corrosion Reviews*, 32(1-2), 1-20.
31. Yang, X., Lin, B., Zhang, H., Tang, J., Zhou, T., Wang, Y., Zheng, H. & Kuang, Y. (2024). Influence of stress on the corrosion behavior of Ti alloys: a review. *Journal of Alloys and Compounds*, 985, 173346.
32. Shahrabadi, T., Sanjabi, S., Saebnoori, E. & Barber, Z.H. (2008). Extremely high pitting resistance of NiTi shape memory alloy thin film in simulated body fluids. *Materials Letters*, 62(17-18), 2791-2794.
33. Soltan, A.A., Esen, İ., Kara, S.A. & Ahlatçı, H. (2023). Examination of the corrosion behavior of shape memory NITI material for biomedical applications. *Materials*, 16(11), 3951.
34. Cui, Z.D., Man, H.C. & Yang, X.J. (2005). The corrosion and nickel release behavior of laser surface-melted NiTi shape memory alloy in Hanks' solution. *Surface and Coatings Technology*, 192(2-3), 347-353.
35. Hansen, A.W., Führ, L.T., Antonini, L.M., Villarinho, D.J., Marino, C.E.B. & Malfatti, C.D.F. (2015). The electrochemical behavior of the NiTi alloy in different simulated body fluids. *Materials Research*, 18(1), 184-190.
36. Milošev, I. & Kapun, B. (2012). The corrosion resistance of Nitinol alloy in simulated physiological solutions: Part 1: The effect of surface preparation. *Materials Science and Engineering: C*, 32(5), 1087-1096.
37. Pound, B.G. (2010). Corrosion behavior of nitinol in blood serum and PBS containing amino acids. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 94(2), 287-295.
38. Yetri, Y., Niinomi, M. & Nakai, M. (2018). Corrosion behavior of new beta type titanium alloy, Ti-29Nb-13Ta-4.6 Zr (Tntz) in fusayama-meyer artificial saliva solution. *Journal of Engineering Science and Technology*, 13(5), 1274-1281.
39. Simka, W., Sadkowski, A., Warczak, M., Iwaniak, A., Dercz, G., Michalska, J. & Maciej, A. (2011). Characterization of passive films formed on titanium during anodic oxidation. *Electrochimica Acta*, 56(24), 8962-8968.
40. Nasakina, E.O., Sudarchikova, M.A., Sergienko, K.V., Konushkin, S.V. & Sevost'yanov, M.A. (2019). Ion release and surface characterization of nanostructured nitinol during long-term testing. *Nanomaterials*, 9(11), 1569.
41. Semin, V.O., D'yachenko, F.A., Erkovich, A.V., Ostapenko, M.G., Chernova, A.P., Shulepov, I.A., Savkin, K.P., Khabibova, E.D., Yuzhakova, S.I. & Meinser, L.L. (2023). Characterization of corrosion properties, structure and chemistry of titanium-implanted TiNi shape memory alloy. *Materials Characterization*, 206, 113457.
42. Ünal, E., Yaşar, A. ve Karahan, İ.H. (2021). Ni-B/TiB₂ elektrodolanmış kompozit kaplamaların korozyon dayanımlarının belirlenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(3), 709-718.
43. Tozar, A. & Karahan, İ.H. (2014). Structural and corrosion protection properties of electrochemically deposited nano-sized Zn-Ni alloy coatings. *Applied Surface Science*, 318, 15-23.
44. Aksaray, G. ve Dehri, İ. (2023). Çinko Metalinin Korozyon Davranışına Klorodimetil Silan Etkisinin Araştırılması. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(Ek Sayı), 372-383.
45. Mert, B.D. (2017). Yumuşak çeliğin korozyon davranışı. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(2), 145-152.
46. Kılınççeker, G. & Erbil, M. (2010). The effect of phosphate ions on the electrochemical behaviour of brass in sulphate solutions. *Materials Chemistry and Physics*, 119(1-2), 30-39.
47. Alpay, N. & Mert, B.D. (2021). The investigation of corrosion performance and durability of hydroxyapatite-coated titanium implants and the effect of antibiotic additives. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(3), 735-742.
48. Kılınççeker, G. & Menekşe, C. (2015). The effect of acetate ions on the corrosion of reinforcing steel in chloride environments. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 51(4), 659-666.

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları Kapsamında Türkiye'nin Karbon Emisyonu ve Ekolojik Ayak İzi Tahmini

Sakhi Mohammad HAMIDY ^{1,a}, Ayça ZENGİNOĞLU ^{2,b}, Hilal KARAMANCIOĞLU ^{3,c}

¹*İstanbul Arel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye*

²*Aksaray Üniversitesi, Teknoloji Transfer Ofisi Koordinatörlüğü, Aksaray, Türkiye*

³*Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Tarsus, Türkiye*

^aORCID: 0000-0002-7389-7352; ^bORCID: 0000-0002-7216-5707; ^cORCID: 0009-0005-2020-8698

Makale Bilgileri

Geliş : 18.03.2025

Kabul : 30.10.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1660060

Sorumlu Yazar

Sakhi Mohammad HAMIDY

sakhihamidy@arel.edu.tr

Anahtar Kelimeler

CO₂ emisyonu

Ekolojik ayak izi

Yapay sinir ağları

Sürdürülebilir kalkınma

Auf şekli: HAMIDY, S.M., ZENGİNOĞLU, A., KARAMANCIOĞLU, H., (2025). Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları Kapsamında Türkiye'nin Karbon Emisyonu ve Ekolojik Ayak İzi Tahmini. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(4), 827-841.

ÖZ

Bu çalışma, Türkiye'nin 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları doğrultusunda çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Çalışma, Türkiye'nin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmasını desteklemek amacıyla CO₂ emisyonları ve ekolojik ayak izini tahmin etmeye odaklanmıştır. Yenilenebilir enerji tüketimi, fosil yakıt kullanımı, nüfus artışı, ormansızlaşma, dış ticaret ve gayri safi yurtiçi hasıla (GSYH) gibi çevresel değişkenler analiz edilmiştir. Girdi değişkenlerinin tahmininde yapay sinir ağları (YSA) kullanılmış, çıktılarının tahmininde ise zaman serisi analiz yöntemlerine başvurulmuştur. Yenilenebilir enerji tüketimi ve nüfus için üssel düzgünleştirme, ormansızlaşma için ARIMA benzeri modeller, fosil yakıt tüketimi, dış ticaret ve GSYH için ise hareketli ortalama yöntemleri en iyi sonuçları vermiştir. Elde edilen bulgular, yenilenebilir enerji kullanımının artırılmasının CO₂ emisyonlarını düşürdüğünü ve enerji verimliliği politikalarının sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

Forecasting of Türkiye's Carbon Emissions and Ecological Footprint Within the Framework of Sustainable Development Goals

Article Info

Received : 18.03.2025

Accepted : 30.10.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1660060

Corresponding Author

Sakhi Mohammad HAMIDY

sakhihamidy@arel.edu.tr

Keywords

CO₂ emissions

Ecological footprint

Artificial neural networks

Sustainable development

How to cite: HAMIDY, S.M., ZENGİNOĞLU, A., KARAMANCIOĞLU, H., (2025). Forecasting of Türkiye's Carbon Emissions and Ecological Footprint Within the Framework of Sustainable Development Goals. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(4), 827-841.

ABSTRACT

This study aims to contribute to Türkiye's environmental sustainability goals in line with the 2030 Sustainable Development Goals. The study focuses on estimating CO₂ emissions and ecological footprint to support Türkiye in achieving its sustainable development goals. Environmental variables such as renewable energy consumption, fossil fuel use, population growth, deforestation, foreign trade, and gross domestic product (GDP) are analysed. Artificial neural networks (ANN) were used to estimate input variables, while time series analysis methods were used to estimate outputs. Exponential smoothing for renewable energy consumption and population, ARIMA-like models for deforestation, and moving average methods for fossil fuel consumption, foreign trade, and GDP gave the best results. The findings suggest that increasing renewable energy use reduces CO₂ emissions, and energy efficiency policies are critical in achieving sustainability goals.

1. GİRİŞ

Artan nüfus, hızla gelişen sanayi, yoğun enerji kullanımı gibi faktörler doğal kaynakların tükenmesine ve çevresel bozulmanın hızlanmasına yol açmaktadır. Bu durum küresel ölçekte iklim değişikliği, su kaynaklarının azalması, biyoçeşitlilik kaybı, karbon emisyonlarının artışı gibi çevresel sorunları beraberinde getirmektedir. Bu etkiler, ulusal ve uluslararası düzeyde geri döndürülmesi güç krizlere yol açmaktadır. Bu bağlamda, çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması büyük önem arz etmektedir.

Genel anlamda çevresel sürdürülebilirlik, sürdürülebilir kalkınmanın en yaygın tanımı olan “bugünün gereksinimlerini, gelecek kuşakların gereksinimlerini karşılama yeteneğinden ödün vermeden karşılamak” anlayışını derinleştirerek “mevcut ve gelecek nesillerin kaynak ve hizmet ihtiyaçlarını bunları sağlayan ekosistemlerin sağlığını koruyarak karşılama” olarak tanımlanmaktadır [1].

Bu anlayışın küresel düzeyde benimsenmesi adına, 2015 yılının Eylül ayında Birleşmiş Milletler Genel Kurulu 17 Sürdürülebilir Kalkınma Amacı'nı üç yıl süren çok paydaşlı istişareler ve hükümetler arası müzakerelerden sonra kabul etmiştir [2]. Bu hedefler, ekonomik refah, sosyal kalkınma ve çevresel koruma ilkeleri arasında denge kurarak sürdürülebilir bir gelecek oluşturmayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda, Avrupa Yeşil Mutabakatı ve 2023 yılında gerçekleştirilen COP28 konferansı gibi küresel girişimler, karbon emisyonlarını azaltma noktasında ülkelerin uzun vadeli stratejiler belirlemesini gerektirmektedir.

Türkiye, Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları kapsamında önemli adımlar atıp sürdürülebilir kalkınmaya dair gerekliliklerin yerine getirilmesi için ulusal kalkınma planları hazırlamıştır [3]. 2024 yılında yayımlanan 12. Kalkınma Planı, Türkiye'nin 2053 Net Sıfır hedefi doğrultusunda karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik politika ve stratejilerini ortaya koymaktadır [4]. Bu bağlamda yapılan çalışmalar, Türkiye'nin sadece ulusal düzeyde değil, aynı zamanda uluslararası düzeyde de çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunan bir aktör haline gelmesini sağlamıştır. Ayrıca, Türkiye çapında 2023 yılında gerçekleştirilen sıfır atık politikaları ve yenilenebilir enerji yatırımları, çevresel sürdürülebilirlik hedefleri açısından kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmanın temel amacı, Türkiye'nin karbon emisyonu ve ekolojik ayak izini tahmin ederek elde edilen bulguların sürdürülebilir kalkınma politikalarına katkı sunmasını sağlamaktır. Tahmin sürecinde, GSYH, yenilenebilir enerji tüketimi, fosil yakıt tüketimi, nüfus artışı, ormanlık alan tahribatı gibi çok boyutlu ve dinamik veriler kullanılmıştır. Analizlerde ise yüksek doğruluk oranları ile bilinen Yapay Sinir Ağları ve zaman serisi analizi kullanılmıştır.

Mevcut literatürde CO₂ emisyonlarını belirleyen faktörler üzerine birçok çalışma yapılmış olup, bu çalışmaların büyük çoğunluğu ekonomik ve enerji ile ilgili değişkenlere odaklanmaktadır. Bu çalışmada da benzer değişkenler dikkate alınmış, ancak yapay sinir ağları ve zaman serisi analizleri kullanılarak daha kapsamlı ve yüksek doğruluklu bir tahmin modeli geliştirilmiştir. CO₂ emisyonlarının belirleyicilerini ele alan önceki çalışmalar Çizelge 1'de özetlenmiştir. Bu araştırmaların çoğunda GSYH, nüfus, enerji tüketimi, ticaretin ekonomiye katkısı ve kentleşme oranı gibi değişkenler temel girdiler olarak kullanılmıştır [5-7]. Bu faktörlerin, emisyonlar üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla çeşitli metodolojik yaklaşımlar kullanılmıştır. Bu yöntemler arasında regresyon analizleri [8,9], eş bütünleşme testleri [5,10], zaman serisi yöntemleri [11] ve panel veri modelleri [6,10] öne çıkmaktadır.

Bunun yanı sıra, teknolojik ilerleme ve enerji kaynaklarının kullanımında farklılaşmayı modellemek amacıyla yapay sinir ağları [12-14] ve genetik algoritmalar gibi modern yöntemler de kullanılmaktadır [15]. Özellikle, sektörel CO₂ emisyonları ve enerji kullanımının ekonomiye katkısı gibi mikro düzeydeki analizlere yönelik çalışmalar da dikkat çekmektedir [10,16]. Ek olarak, bazı çalışmalarda finansal gelişme ve ticaret açıklığı gibi ekonomik faktörlerin emisyonlarla olan ilişkisi incelenmiştir [6].

Ancak, literatürde çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli olan yenilenebilir enerji tüketimi ve ormanlık alan tahribatı gibi faktörlerin etkisinin sınırlı sayıda çalışmada ele alındığı görülmektedir [8,17]. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının teşvik edilmesinin ve ormansızlaşmanın kontrol

altına alınmasının emisyonları azaltmada oynayabileceği rolün daha fazla incelenmeye ihtiyaç duyduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, ekolojik ayak izi gibi geniş kapsamlı çevresel göstergelere odaklanan çalışmaların oldukça sınırlı olduğu görülmektedir [11,17]. Bu doğrultuda, literatürdeki boşluklar, CO2 emisyonlarının belirleyicilerini analiz etmek için daha kapsamlı ve çok yönlü araştırmaların yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Özellikle, CO2 emisyonları ve ekolojik ayak izi üzerine yapılan çalışmaların çoğu, ekonomik büyüme, enerji tüketimi ve nüfus artışı gibi faktörlere odaklanmaktadır. Ancak bu çalışmalar, çevresel faktörleri yenilenebilir enerji tüketimi ve ormanlık alan tahribatı gibi kapsamlı bir şekilde ele almamaktadır. Ayrıca, ekolojik ayak izi değişkeninin CO2 emisyonları ile ele alındığı çalışmaların sınırlı olması, bu alanda önemli bir araştırma boşluğuna işaret etmektedir. Bu bağlamda, bu çalışma hem çevresel hem de ekonomik faktörleri bir arada değerlendirerek bu boşluğu doldurmayı hedeflemektedir. Ayrıca, yapay sinir ağları ve zaman serisi analizlerinin bir arada kullanılması, yönetime yönelik yenilikçi bir katkı sağlamaktadır.

Çizelge 1. Önceki çalışmaların özeti

Yazar(lar)	Girdiler	Çıktılar	Yöntem	Uygulama alanı
Bozkurt ve Okumuş [5]	Kişi başı reel GSYH, Enerji kullanımı, Toplam ticaretin GSYH içindeki payı ve Nüfus yoğunluğu	CO2 emisyonu	Hatemi-J eş bütünleşme testi	Türkiye
Marjanović ve arkadaşları [15]	Gaz yakıt tüketiminden kaynaklanan CO2 emisyonları, Sıvı yakıt tüketiminden kaynaklanan CO2 emisyonları, Katı yakıt tüketiminden kaynaklanan CO2 emisyonları	Reel GSYH büyüme oranı	Aşırı öğrenme makineleri, Genetik algoritma ve YSA	Avrupa Birliği Ülkeleri
Pabuççu ve Bayramoğlu [12]	Nüfus, GSYH, Enerji üretimi ve tüketimi, Ulaşım için enerji kullanımı	CO2 emisyonu	YSA	AB-28 Ülkeleri, Türkiye
Boğar ve Boğar [17]	Nüfus, GSYH, Enerji tüketimi ve ulaşım	Sektörel CO2 gazı salınımı	Zaman serisine dayalı YSA	Türkiye
Zhou ve arkadaşları [6]	CO2 emisyonu, Enerji tüketimi, GSYH Ekonomik büyüme, Ticari açıklık, Finansal gelişme, Özel sektöre verilen yurtiçi kredi	CO2 emisyonu	Sabit etkili bir panel kantil regresyon modeli	Çin, Hindistan, Brezilya, Meksika ve Güney Afrika, Avrupa Birliği Ülkeleri, Amerika Birleşik Devletleri, Kanada, Japonya
Keskin [8]	Nüfus artışı, Kişi başına düşen milli gelir, Ormanlık alanların tahribatı	CO2 emisyonu	Regresyon analizi	Avrupa Birliği Ülkeleri
Hosseini ve arkadaşları [9]	Nüfus, CO2 yoğunluğu, Kişi başına düşen GSYH, Fosil yakıtların elektrik üretimindeki payı, Kişi başına enerji tüketimi	CO2 emisyonu	Çoklu doğrusal regresyon, Çoklu polinomsal regresyon	İran
Munir ve arkadaşları [19]	CO2 emisyonu, Enerji tüketimi, Ekonomik büyüme	CO2 emisyonu, Enerji tüketimi, Ekonomik büyüme	İleri düzey istatistikler yöntemler	Endonezya, Malezya, Filipinler, Singapur ve Tayland
Ashin Nishan ve Muhammed Ashiq [20]	Enerji tüketimi	CO2 emisyonu, Ekonomik büyüme	YSA	Hindistan

Çizelge 1. Devamı

Özpolat [10]	Toplam CO2 emisyonu, Üretim sektörü CO2 emisyonu, Ulaşım Sektöründeki CO2 emisyonu, Kişi başına GSYH, Enerji kullanımı, Dışa açıklık, Kentleşme ve Sanayileşme	Sektörel CO2 emisyonu	Westerlund ECM, Westerlund DH eş bütünleme testleri ve FMOLS eş bütünleme tahmincisi	Bangladeş, Mısır, İran, Pakistan, Filipinler, Güney Kore, Endonezya, Nijerya, Türkiye, Meksika, Vietnam
Jena ve arkadaşları [13]	GSYH, Kentsel nüfus oranı, Ticari açıklık	CO2 emisyonu	Çok katmanlı yapay sinir ağı	Çin, ABD, Hindistan, Japonya, İran, Güney Kore, Suudi Arabistan, Endonezya, Kanada, Brezilya, Güney Afrika, Meksika, Türkiye, Avustralya, Birleşik Krallık, İtalya, Fransa
Aslan ve arkadaşları [21]	Kentsel nüfus artışı, Enerji tüketimi, GSYH	CO2 emisyonu	Dynamic ARDL	Türkiye
Komeili Birjandi ve arkadaşları [22]	Kömür tüketimi, Doğal gaz tüketimi, Petrol tüketimi, Yenilenebilir enerji tüketimi, GSYH	CO2 emisyonu	Yapay sinir ağı	Malezya, Endonezya, Singapur, Vietnam
Karaaslan ve Çamkaya [7]	GSYH, Sağlık harcamaları, Yenilenebilir ve yenilenemez enerji tüketimi	CO2 emisyonu	ARDL, Toda-Yamamoto	Türkiye
Özbek ve Naimoğlu [18]	GSYH, Kişi başına enerji tüketimi	Ekolojik ayak izi	Fourier eş bütünleme analizi	Türkiye
Sel ve Tekgün [23]	GSYH, Nüfus, İhracat, İthalat	CO2 emisyonu	Uyarlamalı sinirsel bulanık çıkarım sistemi	Türkiye
Güriş ve Çağlayan [24]	Ekonomik politik belirsizlik indeksi, Kişi başına düşen GSYH, Nüfus, Yenilenebilir enerji tüketimi ve Ticaret verileri	CO2 emisyonu	Zamanla değişen katsayılı parametrik olmayan panel veri modeli	14 OECD Ülkesi
Atalay [25]	GSYH, Kişi başına düşen enerji tüketimi, Kentsel nüfus artışı	CO2 emisyonu	YSA	Endonezya, Bangladeş, İran, Mısır, Malezya, Pakistan, Nijerya, Türkiye
Eufrazio Espinosa ve Lenny Koh [11]	Nüfus artışı, Ekonomik gelişme ve Teknolojik ilerleme	Ekolojik ayak izi	Zaman serisi tahmin yöntemi, Modüler regresyon, Otoregresif entegre hareketli ortalama	G20 Ülkeleri
*Bu Çalışma (2025)	GSYH, Nüfus, İhracat, İthalat, Yenilenebilir enerji tüketimi, Fosil yakıt tüketimi, Ormanlık alan tahribatı	CO2 emisyonu, Ekolojik ayak izi	YSA, Zaman serisi analizi	Türkiye

Bu bağlamda, yapılan literatür araştırması sonucunda, çevresel ve ekonomik faktörlerin etkilerini daha derinlemesine inceleyen çalışmalarda kullanılan girdiler üzerinde yapılan inceleme Çizelge 2'de verilmiştir.

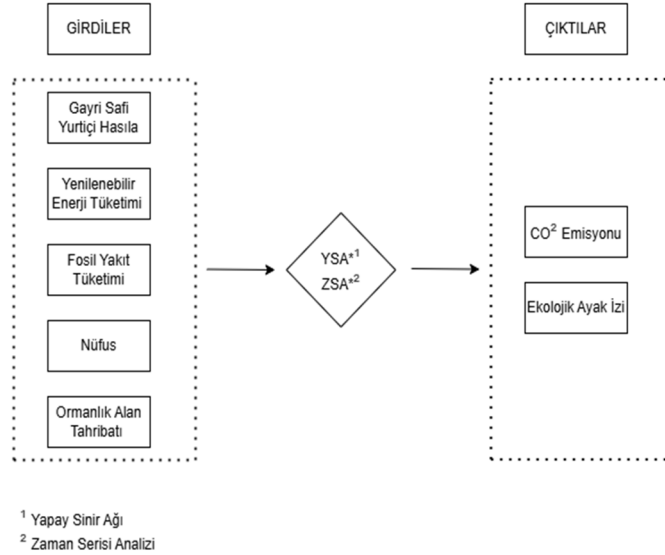
Çizelge 2. Önceki çalışmalardaki girdilerin değerlendirilmesi

Yazar(lar)	Girdiler								
	GSYH	Enerji	Ticaret ve Dışa Açıklık	Nüfus	Çevresel Kaynak Tüketimi	Ekonomik ve Finansal Gelişme	Ulaşım	Sağlık ve Sosyal	Teknolojik Gelişme
Bozkurt ve Okumuş [5]	✓	✓	✓	✓					
Marjanović ve arkadaşları [14]		✓			✓				
Pabuçcu ve Bayramoğlu [12]		✓		✓		✓	✓		
Boğar ve Boğar [16]		✓		✓		✓			
Zhou ve arkadaşları [6]	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	
Keskin [8]		✓		✓					
Hosseini ve arkadaşları [9]	✓	✓		✓	✓	✓			
Munir ve arkadaşları [18]	✓	✓			✓	✓			
Ashin Nishan ve Muhammed Ashiq [19]		✓							
Özpolat [10]	✓	✓		✓	✓		✓	✓	
Jena ve arkadaşları [13]	✓	✓	✓						
Aslan ve arkadaşları [20]	✓	✓		✓					
Komeili Birjandi ve arkadaşları [21]	✓	✓			✓	✓	✓		
Karaaslan ve Çamkaya [7]	✓	✓			✓	✓	✓	✓	
Özbek ve Naimoğlu [18]	✓	✓					✓		
Sel ve Tekgün [22]	✓	✓	✓	✓					
Gürüş ve Çağlayan [23]	✓	✓	✓	✓		✓			
Atalay [24]	✓	✓		✓			✓		
Eufrasio Espinosa ve Lenny Koh [11]	✓			✓					✓

Çalışmanın devamında, kullanılan veri setleri ve yöntemsel çerçeve detaylandırılarak, karbon emisyonu ve ekolojik ayak izi tahmin süreci açıklanacaktır.

2. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada, Türkiye'nin karbon emisyonu ve ekolojik ayak izini tahmin etmek amacıyla çok boyutlu ve dinamik veriler kullanılmıştır. Analiz sürecinde, ekonomik ve çevresel değişkenleri kapsayan veri setleri derlenmiş ve bunlar üzerinde zaman serisi analizi ve yapay sinir ağları yöntemleri uygulanmıştır. Çalışmanın yöntemsel çerçevesini belirlemek adına kullanılan veri kaynakları, değişkenler ve analiz teknikleri detaylı olarak aşağıda açıklanmıştır. Çalışmanın veri akışı ve analiz sürecine ilişkin genel çerçeve Şekil 1'de sunulmaktadır.



Şekil 1. Çalışmanın veri ve yöntemine ilişkin akış diyagramı

2.1. Veri Seti

Bu çalışmada, Türkiye'nin karbon emisyonu ve ekolojik ayak izini tahmin etmeye yönelik analizler gerçekleştirilmiştir. Daha önce bu kapsamda yapılan çalışmalarda girdi olarak ele alınan unsurlar incelenmiş olup en çok kullanılan 7 unsur bu çalışmada karbon emisyonu ve ekolojik ayak izini tahmininde kullanılacak girdi olarak kabul edilmiştir. Çalışmada materyal olarak ele alınan girdi ve çıktı değişkenleri aşağıda listelenmiştir:

- **Çıktı değişkenleri:**
 1. **Ekolojik Ayak İzi:** Bir bireyin doğal kaynakları kullanma ve atık üretme oranını ölçen bir göstergedir.
Birim: Global hektar
Veri kaynağı: Global Footprint Network [25]
 2. **Karbon Dioksit Emisyonu:** Toplumsal tüketimin sebep olduğu, atmosfere salınan karbondioksit (CO₂) gaz miktarı.
Birim: Ton
Veri kaynağı: Worldometer [26]
- **Girdi değişkenleri:**
 1. **GSYH:** (Gayri Safi Yurt İçi Hasıla) Bir ülkenin ekonomik büyüklüğünü ve kişi başına düşen yaşam seviyesini gösterir.
Birim: USD (2015)
Veri kaynağı: World Bank Group [27]
 2. **Yenilenebilir Enerji Tüketimi:** Toplam enerji tüketimindeki yenilenebilir kaynakların payını ifade eder.
Birim: Teravatsaat
Veri kaynağı: Our World in Data [28]
 3. **Fosil Yakıt Tüketimi:** Petrol, gaz ve kömür gibi fosil yakıtların kullanım miktarını gösterir.
Birim: Teravatsaat
Veri kaynağı: Our World in Data [28]

4. **Nüfus:** Bir bölgedeki toplam yaşayan birey sayısını gösterir.
Birim: Kişi
Veri kaynağı: Worldometer [26]
5. **Ormanlık Alan Tahribatı:** Doğal afet veya bilinçli olarak tahribata uğrayan toplam ormanlık alanını gösterir.
Birim: Hektar
Veri kaynağı: T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı [29]
6. **İhracat:** Ülkenin dışarıya sattığı mal ve hizmetlerin toplamını gösterir.
Birim: USD (2024 yılının güncel kuruna göre)
Veri kaynağı: World Bank Group [27]
7. **İthalat:** Dışarıdan mal ve hizmet alımını gösterir.
Birim: USD (2024 yılının güncel kuruna göre)
Veri kaynağı: World Bank Group [27]

Girdi ve çıktı değişkenlerine ilişkin veriler, ilgili kurumların resmî web sayfalarından temin edilmiştir [25-29]. Söz konusu veriler, 1888-2023 yılları arasındaki dönemi kapsayacak şekilde yıllık olarak düzenlenmiştir.

Veri setine ilişkin açıklamaların ardından, bu çalışmada kullanılan analiz yöntemlerinin teorik temelleri ve uygulama süreçleri detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. Söz konusu yöntemler, veri setinin analizine yönelik çeşitli teknikleri kapsamakta olup, her bir yöntem, veri üzerindeki ilişkilerin belirlenmesi, zaman serisi tahminleri ve yapay sinir ağları ile gerçekleştirilen derinlemesine değerlendirmeleri içermektedir. Bu bağlamda, uygulanan metodolojilerin her bir adımı aşağıda ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

2.2. İlişki Analizi

İstatistiksel bakımdan iki veya daha fazla değişkenin arasındaki ilişkinin gücü ve yönü hakkında bilgi sahibi olabilmek için korelasyon analizlerine başvurulur. Verinin parametrik özelliğine sahip olup olması durumu hangi testin uygulanması hakkında karar verici bir unsurdur. Parametrik olan veriler için genelde Pearson Korelasyon Katsayısı (Pearson Coefficient of Correlation) testi uygulanırken parametrik olmayan veriler için Spearman'ın Sıra Korelasyon (Spearman's Rank Correlation) testi uygulanır [30].

Yapılan analizler tüm değişkenlerin parametrik olmayan veri türünden olduğunu gösterdiğinden bu değişkenlerin etkileşimi incelemek için Spearman'ın Sıra Korelasyon testinin uygulanmasına karar verilmiştir.

2.2.1. Spearman'ın Sıra Korelasyon Testi

İki gözlem serisi arasında korelasyon olup olmadığını belirlemek amacıyla kullanılan bu yöntem, trendin varlığının tespiti amacıyla da kullanılır. Doğrusal trendin varlığının tespitinde kullanılan basit ve hızlı bir yöntemdir. Sıra istatistiği olan R_{X_i} , verilerin küçükten büyüğe veya büyüktan küçüğe doğru sıralanması ile belirlenir. Spearman'ın Sıra testi istatistiği (r_s), Eşitlik 1 ile hesaplanır [31].

$$r_s = 1 - 6 \frac{\sum_{i=1}^n (R(X_i) - i)^2}{(n^3 - n)} \quad (1)$$

Burada, R_{X_i} , i. gözlemin sıra numarasını, i verilerin gözlem sırasını ve n ise toplam gözlem sayısını ifade etmektedir. Eğer gözlem sayısı 30'dan büyükse ($n > 30$), r_s dağılımı normale yaklaşacağından normal dağılım tabloları kullanılır. Bunun için r_s 'nin test istatistiği olarak tanımlanan Z değeri Eşitlik 2'deki gibi hesaplanır [31].

$$Z = r_s \sqrt{n - 1} \quad (2)$$

Eşitlik 2'de hesaplanan $|Z|$ değeri, seçilen α anlamlılık seviyesinde standart normal dağılım tablosundan tespit edilen Z_α değerinden büyük ise ($|Z| > Z_\alpha$) gözlem değerlerinin zamanla değişmediği üzerine kurulan H_0 hipotezi reddedilir. Aynı zamanda r_s değeri pozitif ise artan yönde, negatif ise azalan yönde bir eğilim olduğunu göstermektedir [31].

2.3. Zaman Serisi Analizleri

Gelecekteki karbon emisyonu ve ekolojik ayak izi (çıktı değişkenler) hakkında bilgi sahibi olabilmek için girdi değişkenlerin de gelecekteki değerleri hakkında bilgi sahibi olunmalıdır. Bundan dolayı ilk önce girdi değişkenleri için tahminde bulunmak üzere zaman serisi analizlere başvurulmuştur. En iyi tahminde bulunabilmek için üç farklı yöntemle başvurulmuştur.

2.3.1. Hareketli Ortalama

Hareketli Ortalama, zaman serisi analizinde, verinin uzun dönemli trendlerini izlemek ve kısa vadeli dalgalanmalardan arındırmak amacıyla kullanılan yaygın bir yöntemdir. Bu yöntem, belirli bir zaman dilimindeki verilerin ortalamasını alarak gelecekteki değerleri tahmin etmeyi amaçlar. Hareketli ortalama, verilerin düzgünleştirilmesi ile daha net bir eğilim çizgisi oluşturur, bu da özellikle stokastik gürültülerin ve geçici dalgalanmaların ortadan kaldırılması gerektiği durumlarda faydalıdır. Ancak, bu yöntem geçmiş verilerin bir yansıması olduğu için ani değişikliklere veya trend değişimlerine duyarlıdır. Bu nedenle, sadece uzun vadeli ve durağan verilerde güvenilir sonuçlar sağlar [32].

2.3.2. ARIMA Benzeri Tahmini

ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average), zaman serisi tahminlerinde sıklıkla kullanılan güçlü bir yöntemdir. ARIMA-like tahmin, ARIMA modelinin temel prensiplerini benimser, ancak bazı varyasyonlar ve değişikliklerle uygulanabilir. ARIMA modeli, üç ana bileşenden oluşur: otoregresyon (AR), entegrasyon (I) ve hareketli ortalama (MA). Bu bileşenler, geçmiş gözlemler ve hata terimlerinden yola çıkarak serinin gelecekteki değerlerini tahmin eder. Entegre (I) bileşeni, zaman serisinin durağan hale getirilmesi için kullanılan bir fark alma işlemidir. ARIMA-like modeller, özellikle ekonomik veriler, finansal piyasa fiyatları ve diğer karmaşık sistemlerde, gelecekteki eğilimlerin doğru bir şekilde tahmin edilmesinde etkilidir. Bununla birlikte, bu model zaman serisinin doğrusal yapısı ve durağanlık varsayımlarına dayanır, bu da trend değişimlerinin ve sezonluk etkilerin doğru şekilde modellenmesi gerektiği anlamına gelir [33].

2.3.3. Üssel Düzgünleştirme Tahmini

Üssel düzgünleştirme, zaman serisi verilerindeki eğilimleri ve sezonluk etkileri daha iyi modellemek amacıyla kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, geçmiş gözlemlerin daha yakın olanlarına daha fazla ağırlık vererek daha dinamik tahminler oluşturur. Temelde, son gözlem verisinin ağırlıklı bir şekilde kullanılmasına dayanır ve geçmiş verilerin her birine belirli bir üssel ağırlık atar. Üssel düzgünleştirme, özellikle mevsimsel dalgalanmaların ve eğilimlerin önemli olduğu durumlarda faydalıdır. Bu yöntem, verinin değişim hızını hızlı bir şekilde yansıtarak, kısa vadeli tahminler için oldukça etkilidir. Bununla birlikte, bu modeldeki en önemli parametre olan alfa (α) değeri, verinin ne kadar hızlı bir şekilde değiştiğine karar verir ve modelin başarısı büyük ölçüde bu parametreye bağlıdır. Üssel düzgünleştirme, ARIMA gibi karmaşık modellere göre daha basit ve hızlı uygulanabilir, ancak genellikle daha kısa vadeli tahminlerde daha başarılıdır [33,34].

2.3.4. Üssel Düzgünleştirme Tahmini

Zaman serisi yöntemlerin bazı değiştirilebilir parametreleri bulunmaktadır. Bu parametrelerden birisi pencere boyutu, hareketli ortalama yönteminde kullanılan bir parametre olup, verinin hangi zaman diliminde ortalama alınacağını belirler; yani modelin geçmişteki hangi verileri göz önünde bulunduracağına karar verir. Bir diğer parametre fark alma gecikmesi, ARIMA benzeri tahmin yöntemi için kritik bir parametredir ve verinin durağan hale getirilmesinde kullanılan fark alma işleminin ne kadar geriye gitmesi gerektiğini belirler. Bu parametre, özellikle zaman serisi verilerindeki trendleri ve döngüleri modellemek için önemlidir. Son olarak da alfa parametresi ise üssel düzgünleştirme yönteminde kullanılan bir parametredir; geçmiş verilere ne kadar ağırlık verileceğini belirler ve daha büyük bir alfa değeri, modelin daha duyarlı olmasını sağlar.

Bu parametrelerin her biri, verilen modelin başarısı için kritik öneme sahiptir ve her bir yöntemin uygulamasında en uygun değerleri bulmak amacıyla çeşitli parametre kombinasyonları test edilmiştir. Bu parametreler için değer seçenekleri Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Zaman serisi analizleri parametre değerleri

Parametre	Değerler									
Pencere boyutu	{3	4	5	6	7	8	9	10}		
Fark alma gecikmesi	{1	2	3	4	5	6	7	8	9	10}
Alfa	{0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9}	

2.4. Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları (YSA), mühendislik ve tıp dahil olmak üzere tüm alanlarda araştırmacılar tarafından giderek daha yaygın bir şekilde kullanılan bir alan haline gelmiştir. YSA'lar, uyarlanabilir ve tahminsel sistemlerin tasarımında faydalıdır ve giriş-çıkış etkileşimi üzerine çalışır. Gizli katmandaki ağırlıklar değiştirildikçe, bir sinir ağı, ağıın önceki giriş-çıkış etkileşim geçmişinden öğrendiklerine dayalı olarak hedeflenen çıktıları elde etmeye çalışır [36,37].

Literatürde, YSA yönteminin mühendislik sistemlerinin performans analizinde yaygın biçimde kullanıldığı ve doğrusal olmayan ilişkileri yüksek doğrulukla modelleyebildiği gösterilmiştir [38]. Bu nedenle, çevresel göstergelerin tahmininde de YSA'nın tercih edilmesi, yöntemin tahminsel gücü ve literatürdeki uygulamalarla uyumlu bir yaklaşım olarak değerlendirilmiştir.

Bir sinir ağı, tıpkı insan beyninde olduğu gibi eğitilebilir; önceki etkileşimlerden öğrenir. Analitik olarak çözülmesi çok karmaşık olarak kabul edilen problemleri çözmek için kullanılabilir. Bir nöron, YSA'nın temel ögesidir ve bu yapı, bir giriş katmanı, bir gizli katman ve bir çıkış katmanından oluşur [39]. Tek bir sinir hücresi Eşitlik 3'teki matematiksel formülle ifade edilebilir:

$$a = f(w * P + b) \quad (3)$$

Bir sinir ağındaki her nöronun ağırlığı ve önyargısı (w ve b), nöronların ayarlanabilir skaler parametreleridir. Yapay sinir ağı modelleri, karmaşık doğrusal olmayan ilişkileri temsil edebilir ve eğitim süreci aracılığıyla değişkenler arasındaki bağımlılıkları çıkarabilir [39]. Çalışmalar, üç katmanlı ileri beslemeli sinir ağlarının, gizli katmanda sigmoid fonksiyonları ve çıkış katmanında doğrusal fonksiyonlar kullanarak öngörülemeyen karmaşıklıkları modellemek için özellikle uygun olduğunu göstermiştir. Bu yapı, gizli katmanda yeterli birim bulunduğu sürece evrensel bir eşleyici olarak kabul edilir [36,37].

2.4.1. Yapay Sinir Ağı Tasarlama

YSA modelinde, farklı parametre kombinasyonlarıyla en iyi tahmin performansını sağlayan model seçilmiştir. Model, ileri beslemeli yapay sinir ağı (feedforward neural network) olarak MATLAB ortamında yazılmıştır. İleri beslemeli ağlarda, bilgi yalnızca giriş katmanından çıkış katmanına doğru akar ve geri besleme (feedback) bulunmaz. Bu yapı, her bir katmandaki nöronların çıktılarının yalnızca bir sonraki katmandaki nöronlara iletilmesiyle gerçekleşir.

Bu çalışma kapsamındaki YSA uygulamasında kullanılan temel parametreler ve süreçler şu şekildedir:

- Eğitim Fonksiyonu:** Aşağıda bulunan dört farklı eğitim fonksiyonu ile model eğitilmiştir. Her biri, ağırlık güncellemeleri ve öğrenme hızını farklı şekilde optimize eder.
 - Traindxd:** Gradyan inişi ile dinamik öğrenme hızı (Gradient Descent with Dynamic Step Size)
 - Trainlm:** Levenberg-Marquardt algoritması (Levenberg-Marquardt)
 - Trainbr:** Bayes optimizasyonu (Bayesian Regularization)
 - Trainscg:** Scaled Conjugate Gradient algoritması (Scaled Conjugate Gradient)
- Gizli Katman Sayısı:** Gizli katman sayısı 1 ile 10 arasında değişen değerlerle test edilmiştir. Bu parametre, modelin öğrenme kapasitesini belirler ve aşırı uyum riskini etkiler.
- Performans Ölçütü:** Modelin başarısı, farklı hata ölçütleriyle değerlendirilmiştir. Bu ölçütler, modelin tahmin doğruluğunu çeşitli açılardan inceler. Kullanılan ölçütler aşağıdaki gibidir.
 - MAE:** Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error)
 - MSE:** Ortalama Kare Hata (Mean Squared Error)
 - SAE:** Mutlak Hataların Toplamı (Sum of Absolute Errors)
 - SSE:** Kare Hataların Toplamı (Sum of Squared Errors)
 - Crossentropy:** Çapraz Entropi (Cross Entropy)

4. **Eğitim ve Test Süreci:** Veriler, eğitim (%70), doğrulama (%15) ve test (%15) setlerine rastgele bölünmüştür. Her parametre kombinasyonu için 10 replikasyon yapılarak modelin istikrarlı performansı ölçülmüştür.
5. **Model Seçimi ve Sonuçlar:** En iyi sonuç veren model, tahmin performansı, regresyon katsayıları ve test sonuçlarına göre en iyi model nihai tahmin edici model olarak belirlenmiştir.

Bu yapı, YSA'nın performansını optimize etmek için parametrelerin nasıl belirli kombinasyonlarla test edildiğini ve her bir parametrenin rolünü net bir şekilde açıklar. Ayrıca, ileri beslemeli yapay sinir ağı yapısının kullanılması, modelin doğrusal ve doğrusal olmayan ilişkileri öğrenmesini sağlayarak, en doğru tahmin sonuçlarını elde etmeyi amaçlamaktadır.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. İlişki Analizi

Değişkenlerin etkileşim analizini yapmadan önce değişkenlerin normallik testi yapılmış olup bu teste göre tüm değişkenlerin parametrik olmayan veri türünden olduğu anlaşılmıştır. Dolayısıyla değişkenler arası ilişki analizi için Spearman'ın Sıra korelasyon testi uygulanmıştır. Bu analizinin sonucunda her değişken ikilisi için elde edilen Korelasyon katsayısı Çizelge 4'te verilmiş olup bu sonuca göre Ormanlık alan tahribatı haricindeki tüm değişkenler arasında güçlü bir ilişkinin mevcut olduğu gerçeğine rastlanmıştır.

Çizelge 4. Değişkenler arası korelasyon analiz sonuçları

	Yenilenebilir enerji tüketimi	Fosil yakıt tüketimi	Nüfus	Ormanlık alan tahribatı	İhracat	İthalat	GSYH	Ekolojik ayak izi	CO ₂ emisyonu
Yenilenebilir enerji tüketimi	1	0,896	0,899	-0,189	0,886	0,877	0,912	0,867	0,9
Fosil yakıt tüketimi	0,896	1	0,996	-0,168	0,982	0,96	0,993	0,925	0,999
Nüfus	0,899	0,996	1	-0,169	0,982	0,954	0,996	0,906	0,995
Ormanlık alan tahribatı	-0,189	-0,168	-0,169	1	-0,197	-0,179	-0,153	-0,177	-0,167
İhracat	0,886	0,982	0,982	-0,197	1	0,972	0,982	0,929	0,98
İthalat	0,877	0,96	0,954	-0,179	0,972	1	0,962	0,959	0,961
GSYH	0,912	0,993	0,996	-0,153	0,982	0,962	1	0,921	0,994
Ekolojik ayak izi	0,867	0,925	0,906	-0,177	0,929	0,959	0,921	1	0,929
CO ₂ emisyonu	0,9	0,999	0,995	-0,167	0,98	0,961	0,994	0,929	1

3.2. Zaman Serisi Analizleri

Zaman serisi analizi kapsamında her girdi değişken için 3 farklı tahminleme yöntemi kullanılmıştır. Matlab paket programında yapılan bu analizin sonucu Çizelge 5'te verilmiştir. Bu çizelge, her girdi ve her tahmin yöntemi için ayrıca oluşturulmuş olup modellerin en iyi parametre değerini ve modele ait performans ölçütünü göstermektedir.

Çizelge 5. Zaman serisi analizinin sonuçları

Değişken	Yöntem	En iyi parametre değeri	Ortalama mutlak yüzde hata-MAPE
Yenilenebilir enerji tüketimi	Hareketli ortalama	Pencere boyutu: 4	6,63
	ARIMA benzeri	Fark alma gecikmesi: 10	10,17
	Üssel düzgünleştirme	Alfa: 0,5	4,98
Fosil yakıt tüketimi	Hareketli ortalama	Pencere boyutu: 3	3,12
	ARIMA benzeri	Fark alma gecikmesi: 10	4,67
	Üssel düzgünleştirme	Alfa: 0,8	3,43
Nüfus	Hareketli ortalama	Pencere boyutu: 3	0,73
	ARIMA benzeri	Fark alma gecikmesi: 10	0,55
	Üssel düzgünleştirme	Alfa: 0,5	0,37

Çizelge 5. Devamı

Ormanlık alan tahribatı	Hareketli ortalama	Pencere boyutu: 3	149,97
	ARIMA benzeri	Fark alma gecikmesi: 10	46,75
	Üssel düzgünleştirme	Alfa: 0,1	50,80
İhracat	Hareketli ortalama	Pencere boyutu: 3	14,98
	ARIMA benzeri	Fark alma gecikmesi: 10	28,10
	Üssel düzgünleştirme	Alfa: 0,4	18,66
İthalat	Hareketli ortalama	Pencere boyutu: 3	12,19
	ARIMA benzeri	Fark alma gecikmesi: 10	31,80
	Üssel düzgünleştirme	Alfa: 0,3	16,73
GSYH	Hareketli ortalama	Pencere boyutu: 3	5,20
	ARIMA benzeri	Fark alma gecikmesi: 10	7,52
	Üssel düzgünleştirme	Alfa: 0,5	5,58

Modellerin performans ölçütlerine bakılarak her girdi için en iyi yöntem seçilmiştir. Seçilen yöntemler ve bu yöntemlerden 2025 yılı için yapılan tahminler Çizelge 6'da verilmiştir. Bu tabloya göre ARIMA benzeri yöntemi sadece ormanlık alan tahribatı değişkeni için en iyi sonuç vermişken, Üssel Düzgünleştirme yöntemi ise yenilenebilir enerji tüketimi ve nüfus için iyi performans göstermiştir. Diğer değişkenler de ise Hareketli ortalama en iyi performansı göstermektedir.

Çizelge 6. Zaman serisi analizinden elde edilen tahminler

Değişken	Yöntem	En iyi parametre değeri	Ortalama mutlak yüzde hata -MAPE	2025 tahmini
Yenilenebilir enerji tüketimi	Üssel düzgünleştirme	Alfa: 0,5	4,98	127,35
Fosil yakıt tüketimi	Hareketli ortalama	Pencere boyutu: 3	3,12	1575,56
Nüfus	Üssel düzgünleştirme	Alfa: 0,5	0,37	86612139
Ormanlık alan tahribatı	ARIMA Benzeri	Fark alma gecikmesi: 10	46,75	14620,50
İhracat	Hareketli ortalama	Pencere boyutu: 3	14,98	284274268449,43
İthalat	Hareketli ortalama	Pencere boyutu: 3	12,19	302716442378,18
GSYH	Hareketli ortalama	Pencere boyutu: 3	5,20	1113924670560,32

3.3. Yapay Sinir Ağları

YSA modelleri Matlab paket programında kurulmuş olup her model 10 replikasyon sayısı ile çalıştırılmıştır. Ekolojik ayak izi ve CO₂ emisyon değişkenleri ayrı ayrı ele alınmıştır. Yapılan analiz sonucunda en iyi sonuç veren YSA modelleri parametreleri ve performans değerleri ile Çizelge 7'de verilmiştir. Bu tabloya göre Ekolojik ayak izi için 2 gizli katmanlı Levenberg-Marquardt Algoritması (Trainlm) eğitim fonksiyonlu YSA modeli en iyi sonuç vermişken CO₂ Emisyonu için 6 gizli katmanlı Bayesian Regularization (Trainbr) eğitim fonksiyonlu YSA modeli en iyi sonuç vermiştir.

Çizelge 7. YSA modellerden en iyi performans gösteren modeller

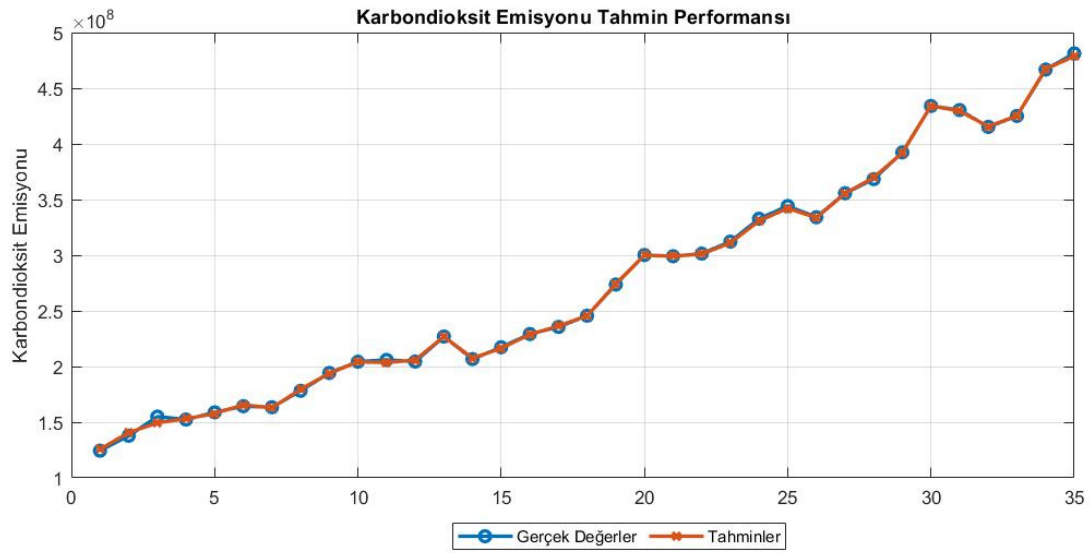
Model parametreleri	Ekolojik ayak izi	Karbondioksit emisyonu
Eğitim fonksiyonu	Trainlm	Trainbr
Gizli katman sayısı	2	6
Performans ölçütü	MAE	SSE
Regresyon değeri (test verisi)	0,993304588	0,999988527
Regresyon değeri (tüm veri)	0,981799186	0,999808815

Geliştirilen YSA modelleri ve zaman serisi analizi ile elde edilen tahminler doğrultusunda, 2025 yılı için ekolojik ayak izi ve CO₂ emisyonu tahminleri yapılmıştır. Elde edilen bu tahminler, Çizelge 8'de sunulmuştur. Ayrıca Şekil 2'de karbondioksit emisyonu tahmin performansı ve Şekil 3'te ise ekolojik ayak

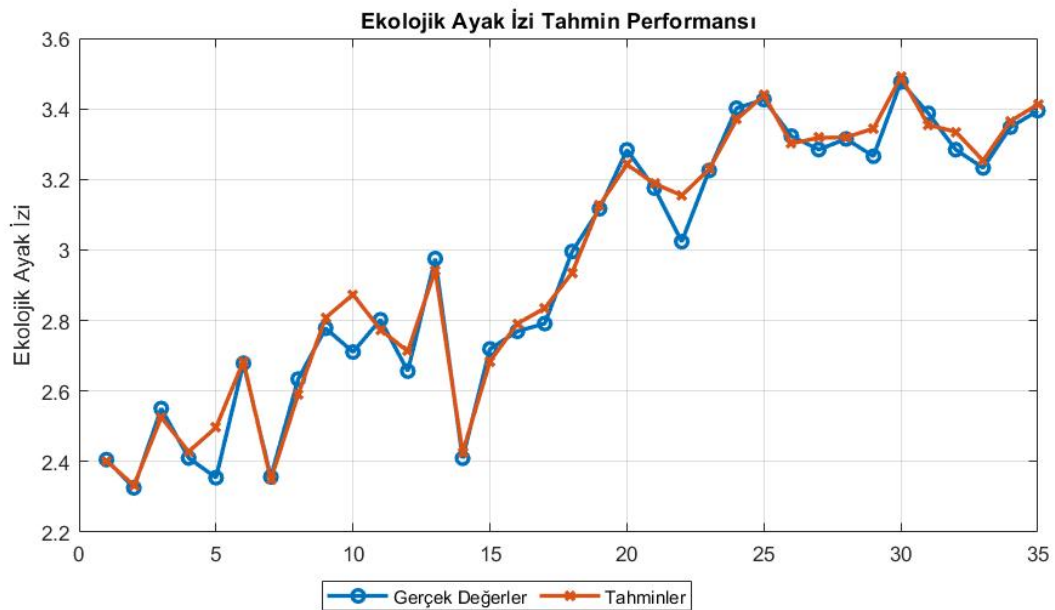
izi tahmin performansı görsel olarak sunulmuştur. Bu görseller, modellerin doğruluğunu ve tahminlerin güvenilirliğini değerlendirmeye yardımcı olmaktadır.

Çizelge 8. YSA modelleri ile yapılan tahminler

Model parametreleri	2025 tahmini
Yenilenebilir enerji tüketimi	127,35
Fosil yakıt tüketimi	1575,56
Nüfus	86612139
Ormanlık alan tahribatı	14620,50
İhracat	284274268449,43
İthalat	302716442378,18
GSYH	1113924670560,32
Ekolojik ayak izi	3.3483
CO ₂ emisyonu	460207380.60



Şekil 2. Karbondioksit emisyonu tahmin performansı



Şekil 3. Ekolojik ayak izi tahmin performansı

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, Birleşmiş Milletler (BM) Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri doğrultusunda Türkiye'nin CO₂ emisyonları ve ekolojik ayak izini tahmin etmeyi hedeflemiş ve bu kapsamda literatürde yaygın olarak kullanılan değişkenlere odaklanmıştır. Yenilenebilir enerji tüketimi, fosil yakıt tüketimi, nüfus, ormanlık alan tahribatı, ihracat, ithalat ve GSYH gibi veriler, tahmin modellerinin temel girdilerini oluşturmuştur. Değişkenler arasındaki ilişkiler incelendiğinde, bu faktörlerin birbiriyle güçlü bir etkileşim içinde olduğu tespit edilmiştir.

Geleceğe dönük tahminler için zaman serisi analizleri kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar, yenilenebilir enerji tüketimi ve nüfus için üssel düzgünleştirme yönteminin; ormanlık alan tahribatı için ARIMA benzeri modellerin; fosil yakıt tüketimi, ihracat, ithalat ve GSYH için ise hareketli ortalama yönteminin en iyi sonuçları verdiğini göstermiştir. Ekolojik ayak izi ve CO₂ emisyonlarının tahmini için ise YSA tercih edilmiştir. YSA yönteminin seçilme gerekçesi, değişkenler arasındaki doğrusal olmayan ve karmaşık ilişkileri öğrenebilme kapasitesi ile çevresel sistemlerin dinamik davranışlarını yüksek doğrulukla modelleyebilme yeteneğidir. Ekolojik ayak izi tahmini için iki gizli katmanlı Levenberg–Marquardt algoritması (*Trainlm*), CO₂ emisyonları tahmini için ise altı gizli katmanlı Bayesian Regularization algoritması (*Trainbr*) kullanılmış ve her iki model de en yüksek performansı göstermiştir.

Elde edilen bulgular, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada doğru analiz yöntemlerinin ve güvenilir veri kullanımının kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalar kapsamında, sürdürülebilir kalkınma politikalarının uzun vadeli etkilerinin modellenmesi önem taşımaktadır. Ayrıca, iklim değişikliği, sosyo-ekonomik dinamikler ve küresel enerji piyasalarındaki değişimlerin Türkiye'nin karbon emisyonları üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmelidir. Bölgesel düzeyde yapılan tahminlerin daha fazla detaylandırılması, politika yapıcılar için daha spesifik yol haritaları oluşturulmasını sağlayacaktır. Türkiye'nin 2025 sonrası yenilenebilir enerji politikaları, emisyon ticaret sistemine katılımı ve karbon nötr hedefleri doğrultusunda alınacak önlemler, çevresel sürdürülebilirliği destekleyen stratejik adımların belirlenmesinde önemli rol oynayacaktır.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma VIII. International Researchers, Statisticians and Young Statisticians Congress kongresinde 28-30 Kasım 2024 tarihlerinde aynı başlıkla sözlü bildiri olarak sunulan tebliğin genişletilmiş halidir.

6. KAYNAKLAR

1. Morelli, J. (2011). Environmental sustainability: A definition for environmental professionals. *Journal of environmental sustainability*, 1(1), 2.
2. Bexell, M. & Jönsson, K. (2017). Responsibility and the United Nations' sustainable development goals. *In Forum for Development Studies*, 44(1), 13-29.
3. Yereli, A.B. ve Ünal, M. (2022). Stratejik yönetim süreçlerinde sürdürülebilir kalkınma amaçları: bakanlıklar ve büyükşehir belediyeleri üzerinden bir analiz. *Ombudsman Akademik*, 8(16), 13-37.
4. T.C. Strateji ve Bütçe Başkanlığı. *On İkinci Kalkınma Planı*. <https://onikinciplan.sbb.gov.tr/>, Erişim tarihi: 24.10.2024.
5. Bozkurt, C. ve Okumuş, İ. (2015). Türkiye'de ekonomik büyüme, enerji tüketimi, ticari serbestleşme ve nüfus yoğunluğunun CO₂ emisyonu üzerindeki etkileri: yapısal kırılmalı eş bütünleşme analizi. *Mustafa Kemal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 12(32), 23-35.
6. Zhou, Y., Sirisrisakulchai, J., Liu, J. & Sriboonchitta, S. (2018). The impact of economic growth and energy consumption on carbon emissions: evidence from panel quantile regression. *In Journal of Physics: Conference Series*, 1053, 012118.
7. Karaaslan, A. & Çamkaya, S. (2022). The relationship between CO₂ emissions, economic growth, health expenditure, and renewable and non-renewable energy consumption: Empirical evidence from Turkey. *Renewable Energy*, 190, 457-466.
8. Keskin, A. (2019). CO₂ emisyonunu etkileyen faktörler: Avrupa Birliği örneği. *Avrasya Sosyal ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 6(5), 361-370.
9. Hosseini, S. M., Saifoddin, A., Shirmohammadi, R. & Aslani, A. (2019). İran'daki CO₂ emisyonlarının zaman serisi ve regresyon analizi ile tahmin edilmesi. *Energy Reports*, 5, 619-631.

10. Özpolat, A. (2020). Sektörel CO₂ emisyonlarını etkileyen faktörlerin belirlenmesi: gelecek-11 ülkeleri örneği. *Finans Politik & Ekonomik Yorumlar*, 57(653), 115-136.
11. Eufrazio Espinosa, R.M. & Lenny Koh, S.C. (2024). Forecasting the ecological footprint of G20 countries in the next 30 years. *Scientific Reports*, 14(1), 8298.
12. Pabuçcu, H. ve Bayramoğlu, T. (2016). Yapay sinir ağları ile CO₂ emisyonu tahmini: Türkiye örneği. *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 18(3), 762-778.
13. Jena, P.R., Managi, S. & Majhi, B. (2021). Küresel düzeyde CO₂ emisyonlarını tahmin etmek: Çok katmanlı yapay sinir ağı modellemesi. *Energies*, 14(19), 6336.
14. Tümse, S., Bilgili, M. & Şahin, B. (2021). Lift coefficient estimation of a delta wing under the ground effect using artificial neural network. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(3), 625-636.
15. Marjanović, V., Milovančević, M. & Mladenović, I. (2016). Prediction of GDP growth rate based on carbon dioxide (CO₂) emissions. *Journal of CO₂ Utilization*, 16, 212-217.
16. Boğar, E. ve Boğar, Z. Ö. (2017). Türkiye'nin sektörel CO₂ gazı salınımlarının yapay sinir ağları ile tahmini. *Akademia Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar Dergisi*, 3(2), 15-27.
17. Özbek, S. ve Naimoğlu, M. (2022). Çevre kalitesi-ekonomik karmaşıklık ilişkisi: Türkiye ekonomisi üzerine Fourier eş bütünleşme analizi. *İstanbul İktisat Dergisi*, 72(1), 407-431.
18. Munir, Q., Lean, H.H. & Smyth, R. (2020). CO₂ emissions, energy consumption and economic growth in the ASEAN-5 countries: A cross-sectional dependence approach. *Energy Economics*, 85, 104571.
19. Ashin Nishan M.K. & Muhammed Ashiq, V. (2020). Role of energy use in the prediction of CO₂ emissions and economic growth in India: evidence from artificial neural networks (ANN). *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 23631-23642.
20. Aslan, A., Altınoğlu, B. ve Özsolak, B. (2021). Türkiye'de kentleşme ile hava kirliliği arasındaki ilişki: Dinamik otoregresif dağıtık gecikme (ARDL) simülasyonlarından elde edilen bulgular. *Çevre Bilimleri ve Kirlilik Araştırmaları*, 28(37), 52370-52380.
21. Komeili Birjandi, A., Fahim Alavi, M., Salem, M., Assad, M.E.H. & Prabakaran, N. (2022). Modeling carbon dioxide emission of countries in southeast of Asia by applying artificial neural network. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 17, 321-326.
22. Sel, A. ve Tekgün, B. (2022). ANFIS yöntemi ile Türkiye karbondioksit salınımı tahmini. *Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi*, 13(34), 486-504.
23. Gürış, S. ve Çağlayan, S. (2023). CO₂ emisyonlarını etkileyen faktörlerin zamanla değişen katsayılı parametrik olmayan panel veri modelleri ile analizi. *EKOIST Journal of Econometrics and Statistics*, (39), 76-88.
24. Atalay, A.Ç. (2023). D-8 ülkeleri için karbondioksit emisyonunun yapay sinir ağları ile tahmin edilmesi: Levenberg-Marquardt algoritması. *Sosyoekonomi*, 32(59), 363-382.
25. Global Footprint Network, *Ecological Footprint*. <https://www.footprintnetwork.org/>, Erişim tarihi: 24.10.2024.
26. Worldometer, *Data*. <https://www.worldometers.info/>, Erişim tarihi: 24.10.2024.
27. World Bank Group, *Databank*. <https://databank.worldbank.org/>, Erişim tarihi: 24.10.2024.
28. Our World in Data, *Renewable Energy Consumption*. <https://ourworldindata.org/>, Erişim tarihi: 24.10.2024.
29. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Genel Müdürlüğü, *Ormanlık Alan Tahribatı*. <https://www.ogm.gov.tr/tr>, Erişim tarihi: 24.10.2024.
30. Hoskin, T. (2012). Parametric and nonparametric: Demystifying the terms. *In Mayo Clinic*, 5(1), 1-5.
31. İtak, Ş. (2023). Küresel ısınmaya bağlı iklim değişikliğinin hidrometeorolojik veriler üzerindeki etkisi: Dicle alt havzasındaki bazı illerde bir durum çalışması. *Yüksek Lisans Tezi*. Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, 73.
32. Tüzemen, A. ve Yıldız, Ç. (2018). Geleceğe yönelik tahminleme analizi: Türkiye çimento üretimi uygulaması. *Journal of Management and Economics Research*, 16(3), 162-177.
33. PK, M.K., Gurram, M.R., Hossain, A.A. & Amsaad, F. (2024). ARIMA-DCGAN synergy: A novel adversarial approach to outlier detection in time series data. *In NAECON 2024-IEEE National Aerospace and Electronics Conference*, 423-427.
34. Ostertagova, E. & Ostertag, O. (2012). Forecasting using simple exponential smoothing method. *Acta Electrotechnica et Informatica*, 12(3), 62.
35. Özhan, E. (2020). Yapay sinir ağları ve üstel düzleştirme yöntemi ile Türkiye'deki CO₂ emisyonunun zaman serisi ile tahmini. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (19), 282-289.
36. Hill, T., Marquez, L., O'Connor, M. & Remus, W. (1994). Artificial neural network models for forecasting and decision making. *International Journal of Forecasting*, 10(1), 5-15.

37. Jain, A.K., Mao, J. & Mohiuddin, K.M. (1996). Artificial neural networks: A tutorial. *Computer*, 29(3), 31-44.
38. Duman, N., Yüksek, A.G., Caner, M. ve Buyruk, E. (2024). Yapay sinir ağları yaklaşımı ile toprak kaynaklı ısı pompasının performans analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(1), 57-72
39. Jamil, M. & Zeeshan, M. (2019). A comparative analysis of ANN and chaotic approach-based wind speed prediction in India. *Neural Computing and Applications*, 31, 6807-6819.

Ceyhan Havzası'nda Meteorolojik Kuraklık İndekslerinin Karşılaştırmalı Analizi ve Değerlendirilmesi

Recep YURTAL^{1,a}, Shafiqullah RAHMANI^{1,b}

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye

^aORCID: 0000-0003-3175-6567; ^bORCID: 0000-0001-5933-3967

Makale Bilgileri

Geliş : 01.09.2025

Kabul : 21.11.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1774054

Sorumlu Yazar

Recep YURTAL

ryurtal@cu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Meteorolojik kuraklık analizi

Ceyhan havzası

Standartlaştırılmış yağış indeksi (SYİ)

Ondalık kuraklık indeksi (OKİ)

Normalin yüzdesi indeksi (NYİ)

Atıf şekli: YURTAL, R., RAHMANI, S., (2025). Ceyhan Havzası'nda Meteorolojik Kuraklık İndekslerinin Karşılaştırmalı Analizi ve Değerlendirilmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(4), 843-854.

ÖZ

Bu çalışmada, Ceyhan Havzası'nda yer alan sekiz meteorolojik istasyonun 1986-2019 dönemine ait aylık yağış verileri kullanılarak meteorolojik kuraklık analizi yapılmıştır. Normalin Yüzdesi İndeksi (NYİ), Ondalık Kuraklık İndeksi (OKİ) ve Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SYİ) yöntemleri hem yıllık hem de farklı zaman ölçeklerinde uygulanmış, sonuçlar karşılaştırılmış ve havza genelinde kuraklık eğilimleri değerlendirilmiştir. Eksik veriler, istasyonlar arası mesafe, yükseklik benzerliği ve korelasyon yapısı dikkate alınarak çoklu komşuluk ortalaması yöntemiyle tamamlanmıştır. Çalışmada ayrıca tüm yöntemlere göre en kurak yıllar belirlenmiş, bu yılların mekânsal haritaları oluşturulmuş ve Mann-Kendall testi ile trend analizi yapılmıştır. Sonuçlar, özellikle 2013, 1993, 2016, 1999, 1990 ve 1989 yıllarının yöntemler arası tutarlı biçimde en kurak dönemler olduğunu göstermektedir. Havza genelinde uzun dönemli yağış azalma eğiliminin zayıf-orta düzeyde olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular, Ceyhan Havzası'nın iklim değişikliğine karşı duyarlılığını göstermesi bakımından önemlidir.

Comparative Analysis and Evaluation of Meteorological Drought Indices in the Ceyhan Basin

Article Info

Received : 01.09.2025

Accepted : 21.11.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1774054

Corresponding Author

Recep YURTAL

ryurtal@cu.edu.tr

Keywords

Meteorological drought analysis

Ceyhan basin

Standardized precipitation index (SPI)

Deciles drought index (DDI)

Percent of normal index (PNI)

How to cite: YURTAL, R., RAHMANI, S., (2025). Comparative Analysis and Evaluation of Meteorological Drought Indices in the Ceyhan Basin. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(4), 843-854.

ABSTRACT

This study conducted a meteorological drought analysis using monthly precipitation data from eight meteorological stations in the Ceyhan Basin for the period 1986–2019. The Percent of Normal Index (PNI), Deciles Drought Index (DDI), and Standardized Precipitation Index (SPI) methods were applied on both annual and different time scales, with the results compared and drought trends assessed across the basin. Missing data were completed using the multiple imputation method, taking into account the inter-station distance, elevation similarity, and correlation structure. The study also identified the driest years according to all methods, created spatial maps for these years, and performed a trend analysis using the Mann-Kendall test. The results consistently indicate that the years 2013, 1993, 2016, 1999, 1990, and 1989 were the driest periods across the different methods. A weak to moderate long-term decreasing trend in precipitation was detected across the basin. These findings are significant as they reveal the susceptibility of the Ceyhan Basin to climate change.

1. GİRİŞ

Kuraklık, tarihsel süreçte medeniyetlerin sürdürülebilirliğini tehdit eden, ekolojik dengeyi bozan ve sosyo-ekonomik sistemleri olumsuz yönde etkileyen en önemli doğal afetlerden biridir. Tarımsal verimlilikten su kaynakları yönetimine, kentsel altyapıdan enerji üretimine kadar pek çok sektörü doğrudan etkileyen kuraklık olayları, küresel iklim değişikliğiyle birlikte artan bir frekans ve şiddette gözlemlenmektedir. Bu nedenle, kuraklığın bilimsel yöntemlerle izlenmesi, analiz edilmesi ve etkilerinin değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Kuraklığın nesnel olarak ölçülebilmesi ve karşılaştırılabilmesi amacıyla çeşitli kuraklık indeksleri geliştirilmiştir. Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SYİ), Palmer Kuraklık Şiddet İndeksi (PDSI), Ondalık Kuraklık İndeksi (OKİ), Normalin Yüzdesi İndeksi (NYİ) ve Standartlaştırılmış Yağış Evapotranspirasyon İndeksi (SYEI) bu indekslerin en yaygın kullanılanlarıdır. Her bir indeks, farklı iklim koşullarında ve çeşitli zaman ölçeklerinde kuraklığın boyutlarını anlamak için kendine has avantajlar ve sınırlılıklar taşımaktadır.

Kuraklık indekslerine ilişkin literatür incelendiğinde, bu indekslerin dünya genelinde ve Türkiye'de birçok havza ve bölgede uygulandığı görülmektedir. Alami ve arkadaşları [1] Afganistan'daki Helmand Nehri Havzası'nda yaptıkları çalışmada, farklı indekslerin benzer sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir. Fakhrabadi ve arkadaşları [2] ise İran'da SPATSIM modeli ile SYİ'yi farklı zaman ölçeklerinde uygulamışlardır.

Türkiye'de kuraklık analizi konusunda önemli çalışmalar yapılmıştır. Apak [3] Ege Bölgesi'nde, Arslan ve arkadaşları [4] Kızılırmak Havzası'nda SYİ yöntemini kullanarak kuraklık analizleri gerçekleştirmişlerdir. Bacanlı ve Akşan [5] Akdeniz Bölgesi'nde SYEI indeksini uygularken, Deniz [6] Türkiye genelinde kuraklığın izlenmesi için SYİ'nin uygun bir yöntem olduğunu belirlemiştir.

Bölgesel çalışmalar kapsamında, Dinç ve arkadaşları [7] Antalya'da, Ersoy [8] Konya'da, Fidan [9] Doğu Akdeniz'de, Gümüş ve arkadaşları [10] Şanlıurfa'da SYİ yöntemiyle kuraklık analizleri yapmışlardır. Gürler [11] hidrolojik kuraklık değerlendirmesi yaparken, Şener ve arkadaşları [12] Çorak Gölü Havzası'nda CBS tabanlı bir analiz gerçekleştirmişlerdir. Ceyhan, Seyhan ve Asi havzalarında yapılan kuraklık çalışmalarında farklı indekslerin karşılaştırılması, bölgesel eğilimlerin ortaya çıkarılmasında önemli katkılar sağlamıştır [13,14].

Yöntemsel açıdan, Fidan [9] Markov zinciri yöntemini, Ersoy [8] yapay sinir ağlarını, Keskiner ve arkadaşları [15] ise olasılık temelli yaklaşımları kullanmışlardır. Hasaniha [16] farklı indekslerin karşılaştırmasını yaparken, Topçu ve arkadaşları [17] L-momentler yöntemiyle bölgesel frekans analizi gerçekleştirmiştir.

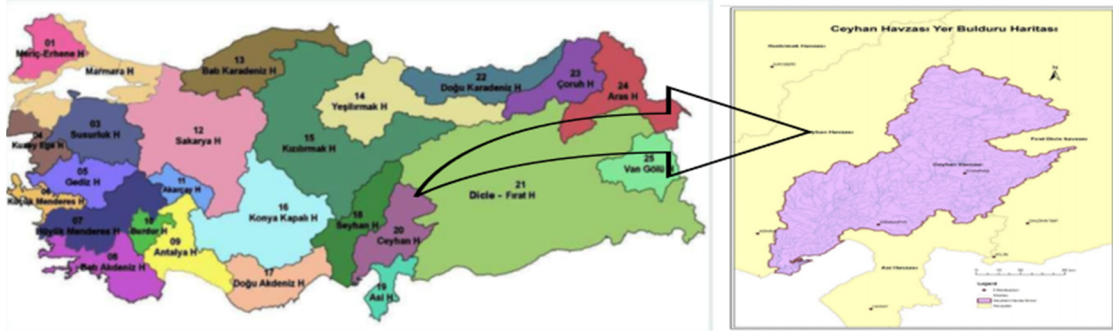
Uluslararası literatürde, Mokarram ve arkadaşları [18] SYİ ve NYİ yöntemlerini İran'da karşılaştırmış, Said ve arkadaşları [19] Somali'de farklı indeksleri test etmiş, Tirivarombo ve Hughes [20] ise Zambezi Havzası'nda tarımsal kuraklık ve gıda güvenliği ilişkisini incelemiştir.

Bu çalışmanın amacı, sözü edilen literatürdeki yöntemsel birikimden yararlanarak Ceyhan Havzası'nda kapsamlı bir kuraklık analizi gerçekleştirmektir. Farklı zaman ölçeklerinde (3, 6, 12 ay) SYİ ve diğer indeks yöntemleri uygulanacak, sonuçlar karşılaştırılacak, kuraklığa eğilimli alanlar belirlenecek ve mekansal dağılım haritaları üretiləcəktir. Böylece havza için etkin bir kuraklık yönetim stratejisinin geliştirilmesine bilimsel katkı sağlanması hedeflenmektedir.

2. MATERYAL ve YÖNTEM

2.1. Çalışma Alanı

Ceyhan Havzası, Türkiye'nin 25 havzasından biri olup, 26.875 km² yağış alanına sahiptir. Havza, 35°15'–37°43' kuzey enlemleri ve 36°33'–38°44' doğu boylamları arasında yer alır. Ceyhan Nehri'nin toplam uzunluğu 509 km olup, yıllık ortalama debi 82,9 m³/s ve yıllık toplam akım 7,18 km³'tür. Havza verimi 10.7 L/s/km² olarak hesaplanmıştır (Şekil 1) [21].



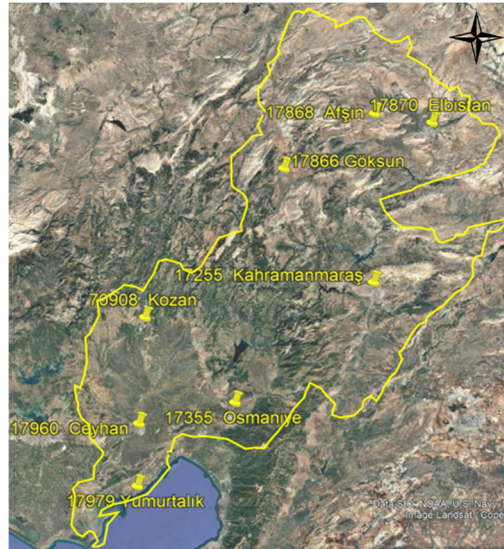
Şekil 1. Ceyhan Havzası'nın Türkiye'deki konumu [21]

2.2. Veri Kaynağı ve İstasyonlar

Çalışmada, Ceyhan Havzası'nda bulunan 8 meteoroloji istasyonuna (Ceyhan, Kozan, Yumurtalık, Afşin, Elbistan, Göksun, Kahramanmaraş, Osmaniye) ait 1986–2019 dönemi aylık toplam yağış verileri kullanılmıştır. Veriler, Türkiye Cumhuriyeti Tarım ve Orman Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir (Çizelge 1, Şekil 2). Eksik veriler, coğrafi yakınlık ve yükseklik benzerliği dikkate alınarak komşu istasyonların ortalamaları ile tamamlanmıştır (Çizelge 2 ve 3).

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan meteorolojik gözlem istasyonları

No	İstasyon no	İstasyon adı	Yükseklik (m)	Enlem	Boylam	Gözlem grubu
1	17960	Ceyhan	30	37° 00' 55"	35° 47' 44"	OMGİ
2	70908	Kozan	112	37° 26' 01"	35° 49' 08"	OMGİ
3	17979	Yumurtalık	17	36° 46' 08"	35° 47' 25"	OMGİ
4	17868	Afşin	1230	38° 14' 26"	36° 55' 09"	OMGİ
5	17870	Elbistan	1137	38° 12' 14"	37° 11' 54"	OMGİ
6	17866	Göksun	1344	38° 01' 27"	36° 28' 56"	OMGİ
7	17255	Kahramanmaraş	572	37° 34' 34"	36° 54' 54"	OMGİ
8	17355	Osmaniye	94	37° 06' 08"	36° 15' 14"	OMGİ



Şekil 2. Çalışmada kullanılan meteorolojik gözlem istasyonları

Çalışmada kullanılan meteorolojik verilerdeki eksiklikler, coğrafi yakınlık ve yükseklik benzerliği göz önünde bulundurularak komşu istasyonların verileri kullanılarak giderilmiştir (Çizelge 2 ve 3). Bu tamamlama işlemi dört aşamada gerçekleştirilmiştir: (1) Eksik veriye sahip istasyonla aynı topoğrafik zon içinde bulunan en yakın iki istasyon belirlenmiştir. (2) İstasyonlar arasındaki veri tutarlılığını garantilemek için korelasyon katsayısı %70'in üzerinde olan istasyonlara öncelik verilmiştir. (3) Seçilen istasyonların

verileri, ağırlıklı çoklu komşuluk ortalaması yöntemiyle birleştirilmiştir. (4) Son olarak, her bir eksik ay değeri, tamamlayıcı istasyonların söz konusu aya ait ortalamaları ile tamamlanmıştır.

Çizelge 2. Çalışmada kullanılan meteorolojik istasyonlarda eksik veri bulunan yılların özeti

İstasyon	Eksik veri olan yıllar ve aylar
Ceyhan	2001 (6. ay), 2006 (12. ay)
Yumurtalık	1998 (6. ay), 2004 (6. ay), 2009 (6. ay), 2010 (12. ay)
Afşin	2001 (6. ay), 2006 (12. ay), 2010 (11. ay)
Elbistan	1990 (1. ay), 2000 (6. ay), 2001 (6. ay), 2006 (12 ay), 2010 (11 ay)
Göksun	2001 (6. ay), 2006 (12. ay)
Kahramanmaraş	1989 (6. ay), 2004 (6. ay), 2008 (6. ay), 2010 (11. ay), 2016 (12. ay)
Osmaniye	1986 (1., 2., 3. aylar), 1991 (6. ay), 1996 (6. ay), 1997 (1., 2., 3., 5. 6. aylar), 1998 (6. ay), 2010 (11. ay)

Çizelge 3. Eksik verilerin tamamlanmasında kullanılan kaynak istasyonlar

Eksik veri olan istasyonlar	Eksik veri yılları	Tamamlama kaynağı olarak kullanılan istasyon(lar)	Gerekçe
Osmaniye (17355)	1986, 2001, 2004, 2006, 2010	Ceyhan (17960), Yumurtalık (17979)	Aynı kıyısı yağış rejimi, düşük rakım, yüksek korelasyon
Kahramanmaraş (17255)	1989, 1991, 1996, 1997, 1998, 2004, 2006, 2008, 2010, 2016	Göksun (17866), Afşin (17868), Elbistan (17870)	Yüksek rakım – İç kesim iklimi benzerliği
Afşin (17868)	1990, 2001, 2006, 2010	Elbistan (17870), Göksun (17866)	En yüksek korelasyonlu yüksek rakımlı istasyonlar
Elbistan (17870)	2000, 2001	Afşin (17868), Göksun (17866)	Benzer iklim, rakım ve konum
Göksun (17866)	2001, 2006, 2010	Afşin (17868), Kahramanmaraş (17255)	Rakım benzerliği ve mekânsal yakınlık
Yumurtalık (17979)	1998, 2006, 2009, 2010	Ceyhan (17960), Osmaniye (17355)	Düşük rakım – kıyı iklimi benzerliği
Ceyhan (17960)	2001, 2006, 2010	Kozan (70908), Osmaniye (17355)	Aynı alt havza, yüksek korelasyon

2.3. Yöntem

Çalışmada, Normalin Yüzdesi İndeksi (NYİ), Ondalık Kuraklık İndeksi (OKİ), ve Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SYİ) olmak üzere üç farklı meteorolojik kuraklık indeksi kullanılmıştır:

- **Normalin Yüzdesi İndeksi (NYİ):** Belirli bir zaman dilimindeki yağışın uzun dönem ortalamasına oranının yüzde olarak ifadesidir [22]. İndeks değerlerine göre kuraklık sınıfları Çizelge 4'de gösterilmiştir.

$$NYİ = \frac{P}{\bar{P}} \times 100 \quad (1)$$

Burada P gözlenen yağış, $\bar{P}$ uzun dönem yağış ortalamasıdır.

Çizelge 4. Normalin yüzdelere göre kuraklık sınıfları

Sınıflar	İndeks değerleri
Kurak Değil	100 <
Normal	80 – 100
Hafif Kurak	70 – 80
Orta Derecede Kurak	55 – 70
Şiddetli Kurak	40 – 55
Aşırı Kurak	< 40

- **Ondalıklar Kuraklık İndeksi (OKİ):** Gibbs ve Maher [23] tarafından önerilen ve yağış verilerinin ondalık dilimlere ayrılarak kuraklık şiddetinin sınıflandırıldığı bir yöntemdir. Kuraklık sınıflandırması Çizelge 5'te gösterilmiştir.

Çizelge 5. Ondalıklar kuraklık indeksine göre kuraklık sınıfları

Sınıflar	İndeks değerleri
Normalin çok altı	1-2
Normalin altı	3-4
Normale yakın	5-6
Normalin üstü	7-8
Normalin çok üstü	9-10

- **Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SYİ):** McKee ve arkadaşları [24] tarafından geliştirilmiş ve farklı zaman ölçeklerinde kuraklığın şiddetini ortaya koymak amacıyla yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. SYİ hesaplamalarında kullanılan olasılık temelli yaklaşım, dağılım uyumu ve standartlaştırma algoritması Guttman [25] tarafından ayrıntılı biçimde açıklanmıştır. Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO), SYİ'yi meteorolojik kuraklığın izlenmesinde standart bir gösterge olarak önermektedir [26]. Kuraklık sınıflandırması Çizelge 6'da gösterilmiştir.

$$SYİ = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (2)$$

Burada x yağış, μ ortalama, σ standart sapmadır.

Çizelge 6. Standartlaştırılmış Yağış İndeksinin kuraklık sınıflandırılması.

Kuraklık kategorisi	SYİ değerleri
Çok şiddetli yağışlı	≥ 2
Çok yağışlı	1.50 ~ 1.99
Orta şiddetli yağışlı	1.00 ~ 1.49
Normal	0.99 ~ 0
Normale yakın kuraklık	0 ~ -0.99
Orta şiddetli kuraklık	-1.00 ~ -1.49
Şiddetli kuraklık	-1.50 ~ -1.99
Çok şiddetli kuraklık	≤ -2

2.3.1. İndeks Hesaplamalarında Kullanılan Yazılım

Tüm indeks hesaplamaları, AgriMetSoft tarafından 2017 yılında geliştirilen **Meteorological Drought Monitor (MDM)** yazılımı (v1.0) kullanılarak gerçekleştirilmiştir [27]. Yazılım, aylık, mevsimlik ve yıllık zaman ölçeklerinde NYİ ve OKİ hesaplamalarına imkan sağlamaktadır. SYİ hesaplamaları ise yazılımın entegre modülü ile yapılmıştır. Yazılıma <https://agrimetsoft.com/MDM> adresinden ücretsiz erişilebilmektedir.

2.3.2. İstatistiksel Analiz

İndeks değerlerinin sınıflandırılmasında literatürde kabul görmüş eşik değerler kullanılmıştır (Çizelge 4, 5, 6). Elde edilen sonuçlar, havza genelinde kuraklık eğilimlerini değerlendirmek için mekansal ve zamansal olarak analiz edilmiştir.

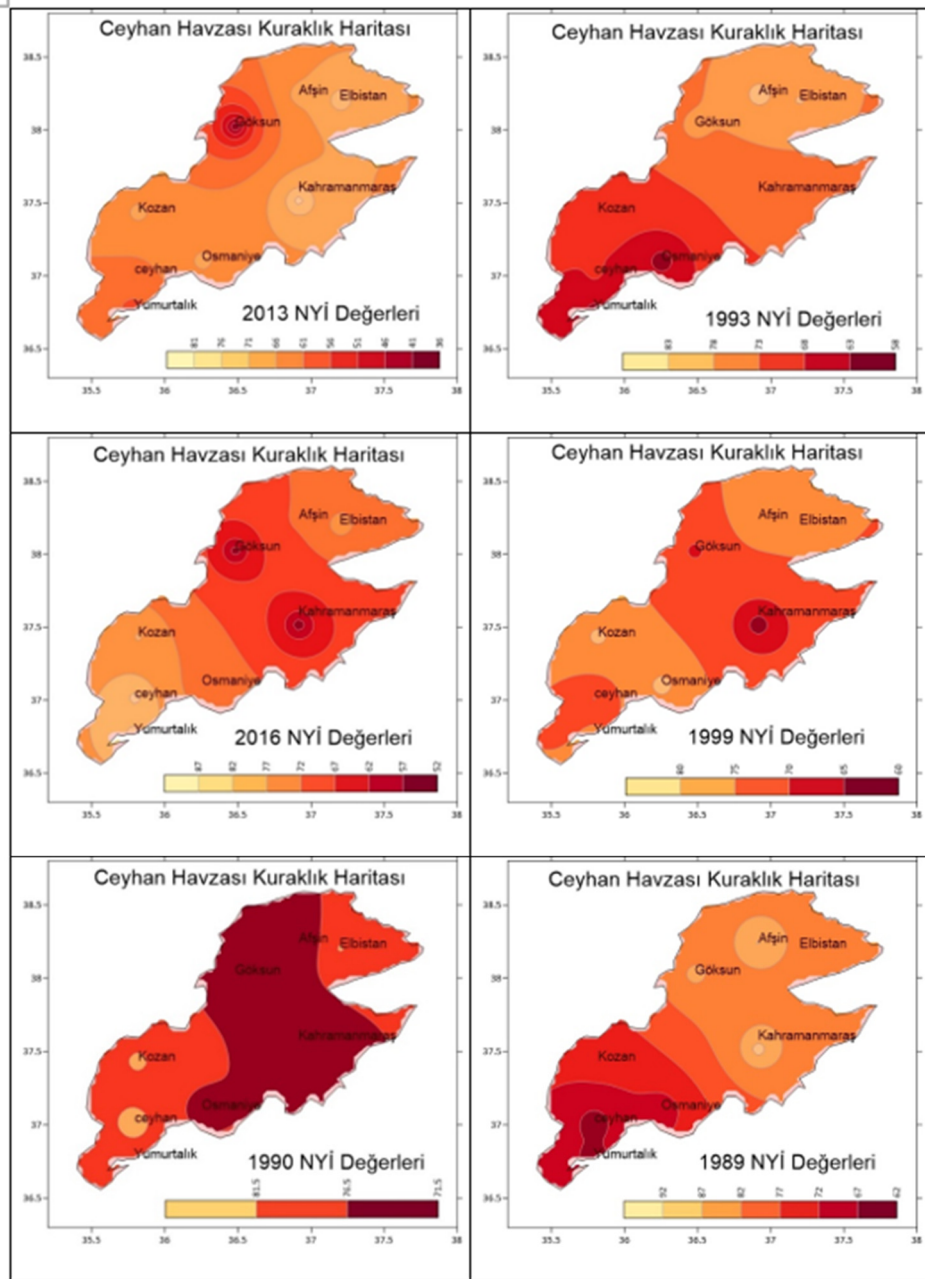
2.3.3. Trend Analizi

Bu çalışmada yağış serilerindeki uzun dönemli eğilimleri belirlemek amacıyla parametrik olmayan Mann–Kendall trend testi ve eğilim şiddetini belirleyen Sen's Slope tahmincisi uygulanmıştır. Mann–Kendall testi, zaman serilerinde monoton artış veya azalış eğilimini belirlemede yaygın olarak kullanılan bir yöntem olup verinin normal dağılım koşulunu gerektirmez. Sen's Slope ise eğilim yönünü ve büyüklüğünü zamana bağlı medyan değişim oranı olarak hesaplar. Analizler yıllık toplam yağış serileri için tüm istasyonlarda ayrı ayrı yapılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Ceyhan Havzası'nda meteorolojik kuraklığın değerlendirilmesinde NYİ (Normalin Yüzdesi İndeksi), OKİ ve SYİ (Standartlaştırılmış Yağış İndeksi) yöntemleri kullanılmıştır. Her üç yöntemin yıllık verileri kullanılarak, bölgenin en kurak 6 yılı belirlenmiş ve Surfer yazılımı [28] ile kuraklık haritaları oluşturulmuştur.

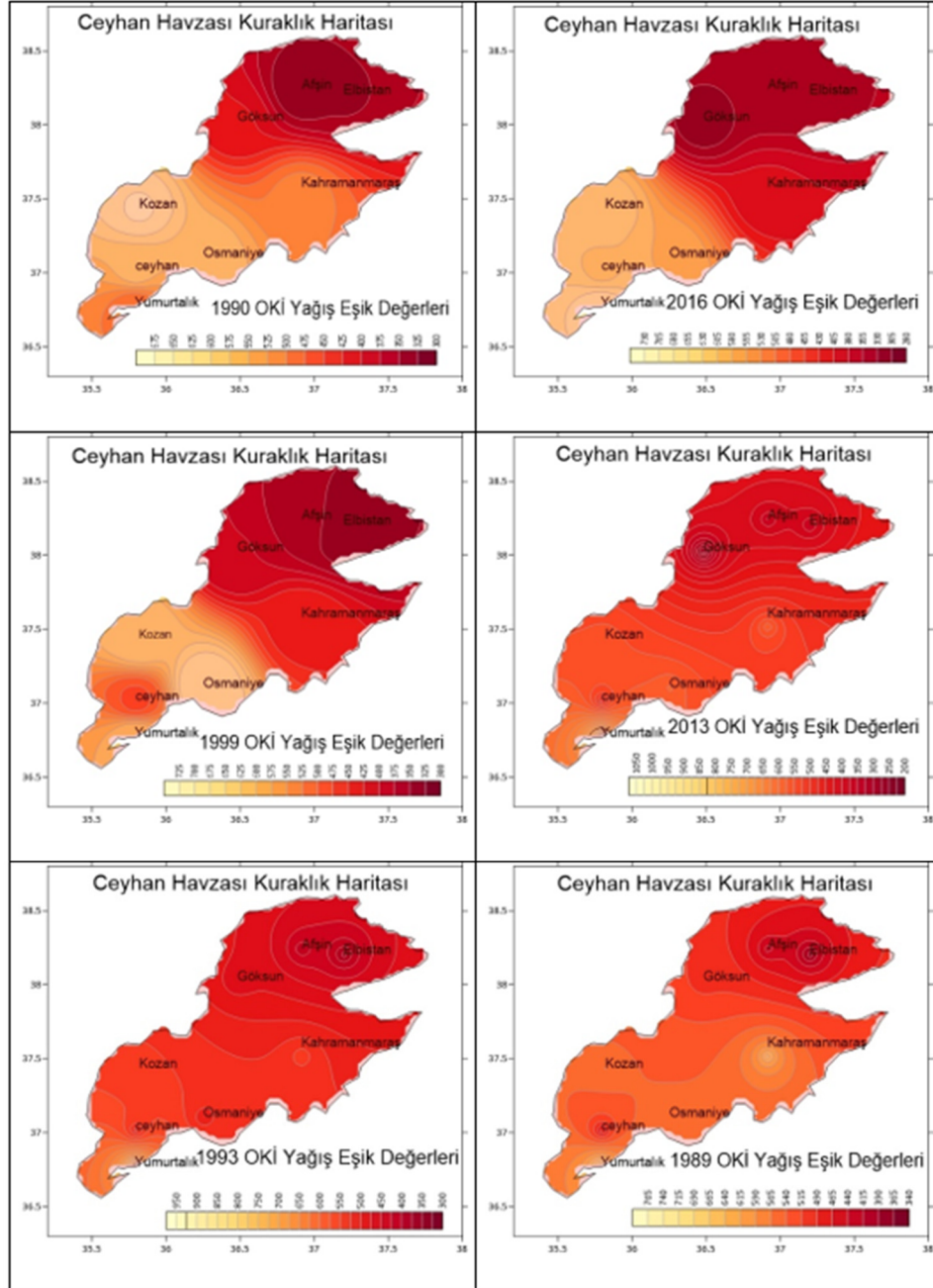
NYİ yöntemine göre en kurak yıllar sırasıyla 2013, 1993, 2016, 1999, 1990 ve 1989 olarak tespit edilmiştir (Şekil 3). Şekil 3'teki bu yıllara ait kuraklık haritaları incelendiğinde: 2013 yılının Göksun ve Yumurtalık bölgeleri için en kurak alanları olduğu; 1993 yılının Osmaniye, Yumurtalık, Ceyhan ve Kozan bölgeleri için belirgin kuraklık gösterdiği; 2016 yılında Kahramanmaraş ve Göksun bölgelerinin etkilendiği; 1999 yılında Kahramanmaraş, Göksun ve Ceyhan bölgelerinin kurak olarak öne çıktığı; 1990 yılında Afşin, Göksun, Kahramanmaraş ve Osmaniye bölgelerinin kuraklıktan etkilendiği; 1989 yılında Ceyhan, Yumurtalık ve Osmaniye bölgelerinin en kurak alanlar olduğu görülmüştür (Şekil 3).



Şekil 3. 1986-2019 Dönemi NYİ değerlerine göre en kurak geçen yıllar

NYİ yöntemi, havzada kuraklığın mekansal dağılımını tutarlı bir şekilde yansıtmıştır. Özellikle 2013 ve 1993 yıllarının hem şiddetli hem de yaygın kuraklık gösterdiği görülmüştür. Bölgesel farklılıklar, topoğrafya ve iklim koşullarıyla ilişkilendirilebilir. Örneğin, Göksun ve Kahramanmaraş gibi yüksek rakımlı bölgelerle, Ceyhan ve Yumurtalık gibi kıyısal alanlar arasındaki kuraklık desenleri farklılık göstermektedir.

Ceyhan Havzası'nda OKİ (Ondalık Kuraklık İndeksi) yöntemi kullanılarak kuraklık analizi yapılmış ve yıllık verilere dayalı olarak en kurak 6 yıl belirlenmiştir. 1986-2019 dönemine ait istasyon verileri kullanılarak hesaplanan OKİ değerlerine göre, havza genelinde en kurak yıllar sırasıyla 1990, 2016, 1999, 2013, 1993 ve 1989 olarak tespit edilmiştir. Bu yıllara ait kuraklık haritaları Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 4. 1986-2019 Dönemi OKİ değerlerine göre en kurak geçen yıllar

Haritalardan da görüleceği üzere: 1990 yılında Afşin, Elbistan ve Göksun bölgelerinin en şiddetli kuraklığı yaşadığı; 2016 yılında Göksun, Afşin, Elbistan ve Kahramanmaraş bölgelerinin belirgin kuraklık

Üç yöntemle göre belirlenen yıllık en kurak yılların karşılaştırmalı sonuçları Çizelge 7’de sunulmuştur. Çizelge 7’de yer alan 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 sütunları, ilgili yöntemle göre en kurak yıldan daha az kurak olana doğru sıralanmış yılları göstermektedir (1 = en kurak yıl). Çizelge 7 incelendiğinde SYİ ve NYİ yöntemlerinin tamamen aynı sıralamayı verdiği, en kurak yılların 2013, 1993, 2016, 1999, 1990 ve 1989 olarak belirlendiği görülmektedir. Bu durum, her iki yöntemin mekânsal ve zamansal kuraklık dönemlerini tutarlı biçimde yakalayabildiğini göstermektedir. Buna karşın OKİ yöntemi, özellikle 1990 ve 2016 yıllarını daha şiddetli kuraklık dönemleri olarak öne çıkarmıştır. OKİ’nin farklı sonuç üretmesi, yöntemin olasılıksal temelli yapısı ve düşük yağışlı yıllara daha duyarlı olmasıyla açıklanabilir. Bu farklılıklar literatürde de [13,14] rapor edilmiştir. Benzer şekilde, Seyhan Havzası’nda SPI ve PNI kullanılarak yapılan kuraklık analizinde [29] ve Asi Havzası’nda farklı meteorolojik kuraklık indekslerinin karşılaştırıldığı çalışmada [30] indekslerin kurak yılları büyük ölçüde tutarlı biçimde belirlediği görülmüş, bu durum mevcut çalışmanın bulgularıyla paralel sonuçlar ortaya koymuştur.

Çizelge 7. Üç yöntemle göre belirlenen yıllık en kurak yıllar

Yöntem	1	2	3	4	5	6
SYİ	2013	1993	2016	1999	1990	1989
NYİ	2013	1993	2016	1999	1990	1989
OKİ	1990	2016	1999	2013	1993	1989

Üç farklı kuraklık yöntemine göre elde edilen yıllık değerlendirmelere ek olarak, tüm istasyonlara ait yağış serilerinin uzun dönemli eğilimleri Mann–Kendall testi ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre anlamlı bir trend (artış veya azalış) tespit edilen istasyonların sonuçları Çizelge 8’de özetlenmiştir. Eğilimlerin büyüklüğü Sen’s Slope katsayısı ile belirlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda Afşin istasyonunda istatistiksel olarak anlamlı ($p < 0.05$) bir azalma eğilimi belirlenmiştir. Ceyhan istasyonunda zayıf bir azalma eğilimi görülmesine rağmen eğilim anlamlı bulunmamıştır ($p = 0.08$). Diğer istasyonlarda ise anlamlı bir artış ya da azalış eğilimi tespit edilmemiştir. Bu durum, havzanın genel olarak zayıf düzeyde bir yağış azalımı eğilimi gösterdiğini, ancak eğilimin istasyonlar arasında mekânsal olarak farklılaştığını ortaya koymaktadır.

Çizelge 8. Mann–Kendall trend testi sonuçları

İstasyon	Trend	Sen’s Slope	p-değeri
Ceyhan	Zayıf azalma	-0.12	0.08
Kozan	Anlamsız	-0.03	0.41
Afşin	Orta düzey azalma	-0.25	0.03
Göksun	Zayıf artış	0.06	0.22

Haritalar incelendiğinde de: 2013 yılında Göksun ve Yumurtalık bölgelerinin en şiddetli kuraklığı yaşadığı; 1993 yılında Kozan, Osmaniye, Yumurtalık ve Ceyhan bölgelerinin belirgin kuraklık gösterdiği; 2016 yılında Kahramanmaraş ve Göksun bölgelerinin kuraklıktan en fazla etkilenen bölgeler olduğu; 1999 yılında Kahramanmaraş bölgesinin en kurak alan olarak öne çıktığı; 1990 yılında Afşin ve Kahramanmaraş bölgelerinde şiddetli kuraklık yaşandığı; 1989 yılında Ceyhan, Kozan, Yumurtalık ve Osmaniye bölgelerinin en kurak alanlar olduğu görülmüştür.

SYİ yöntemi de NYİ’ye paralel olarak, kuraklığın mekansal dağılımını benzer şekilde ve tutarlı biçimde yansıtmıştır. Özellikle 2013 ve 1993 yıllarının hem şiddetli hem de yaygın kuraklık gösterdiği görülmüştür. Bölgesel farklılıklar, topografya ve iklim koşullarıyla ilişkilendirilebilir. Örneğin, Göksun ve Kahramanmaraş gibi yüksek rakımlı bölgelerle, Ceyhan ve Yumurtalık gibi kıyısız alanlar arasındaki kuraklık desenleri farklılık göstermektedir.

Bulgulara göre NYİ, OKİ ve SYİ Yöntemlerinin Karşılaştırıldığında yöntemler arasında benzerlikler ve farklılıklar olduğu görülmektedir.

Benzerlikler açısından: her üç yöntem de Ceyhan Havzası için 1986-2019 dönemindeki en kurak 6 yılı büyük ölçüde aynı belirlemiştir: 2013, 1993, 2016, 1999, 1990 ve 1989. Bu durum, yöntemlerin tutarlı olduğunu ve şiddetli kurak dönemleri güvenilir bir şekilde tespit edebildiğini göstermektedir.

Farklılıklar: açısından; NYİ ve SYİ kurak yıllar sıralamaları tamamen aynıdır: 1. 2013, 2. 1993, 3. 2016, 4. 1999, 5. 1990, 6. 1989. OKİ ise kurak yıllar sıralamasında farklılık göstermiştir: 1. 1990, 2. 2016, 3. 1999, 4. 2013, 5. 1993, 6. 1989. OKİ, 1990 yılını en kurak yıl olarak öne çıkarmıştır.

Ayrıca, yöntemler arasında bölgesel vurgudaki farklılıklar da vardır. OKİ, kuraklığın şiddetini özellikle iç ve yüksek rakımlı bölgelerde (Afşin, Elbistan, Göksun) daha belirgin olarak vurgulamıştır. NYİ ve SYİ ise kuraklığı hem iç hem de kıyı bölgelerinde (Ceyhan, Yumurtalık, Osmaniye) benzer şiddette göstermiştir. Örneğin, 1989 yılı için OKİ Ceyhan'ı işaret ederken, NYİ ve SYİ Ceyhan, Yumurtalık, Osmaniye ve Kozan'ı işaret etmiştir.

Yöntemlerin performansı ve güvenilirliği karşılaştırıldığında, SYİ ve NYİ'nin neredeyse identik sonuçlar vermesi, bu iki yöntemin Ceyhan Havzası gibi heterojen bir havzada dahi yüksek düzeyde uyumlu ve güvenilir olduğunu kanıtlamaktadır. Bu, literatürde de sıklıkla rastlanan bir durumdur ve bu iki indeksin yağış verisini standartlaştırma/normalize etme metodolojilerinin benzerliğinden kaynaklanmaktadır. OKİ'nin nispeten farklı bir sıralama ve bölgesel vurgu getirmesi, olasılıksal temeline dayandırılabilir. OKİ, uzun dönem yağış verisinin olasılık dağılımına dayanır ve normallikten sapmaları farklı bir şekilde ölçer. Bu, onu özellikle istatistiksel anormalliklerin (aşırı kurak/yağışlı dönemler) olduğu durumlarda diğer yöntemlerden farklı kılabılır. 1990 yılını en şiddetli kurak yıl olarak belirlemesi, bu yıla ait yağış değerlerinin olasılık dağılımında çok ekstrem bir konumda olmasından kaynaklanıyor olabilir.

Bölgesel dinamiklerin anlaşılmasına katkı açısından, OKİ'nin iç bölgelerdeki kuraklığı daha şiddetli göstermesi, havzanın farklı mikro-klima bölgelerine işaret ediyor olabilir. Bu durum, kuraklık yönetimi planlamasında bölgesel ölçekli stratejilerin geliştirilmesi gerektiğini gösterir. Örneğin, Afşin-Elbistan bölgesi OKİ'ye göre sürekli yüksek kuraklık riski altında görülmektedir.

Mekansal desenlerde örtüşme açısından ise, özellikle SYİ ve NYİ yöntemleri, kuraklığın mekansal dağılımı konusunda neredeyse aynı sonuçlar vermiştir. Örneğin, 2013 yılında her ikisi de Göksun ve Yumurtalık'ı en kurak bölgeler olarak işaretlemiştir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, Ceyhan Havzası'nda 1986–2019 dönemine ait yağış verilerini kullanarak meteorolojik kuraklığı üç farklı yöntem (SYİ, NYİ, OKİ) ile değerlendirmiş; mekânsal ve zamansal kuraklık desenlerini ortaya koymuş ve istasyon bazlı trend analizleriyle uzun dönem eğilimleri incelemiştir.

- **Kuraklık Eğilimleri Açısından**

Bulgular, havzada özellikle yaz dönemlerinde kuraklık şiddetinin belirgin olarak arttığını göstermektedir. Üç yönteme göre 2013, 1993, 2016, 1999, 1990 ve 1989 yılları tüm havza genelinde öne çıkan kurak yıllardır. Hem kıyı (Ceyhan, Yumurtalık, Osmaniye) hem de iç ve yüksek rakımlı alanlar (Afşin, Elbistan, Göksun) farklı yıllarda kuraklıktan etkilenmiş; bu durum havzanın heterojen iklim özelliklerini teyit etmektedir.

- **Trend Analizi Açısından**

Mann–Kendall ve Sen's Slope testleri, havzanın uzun dönem yağış eğilimleri açısından genel olarak zayıf bir azalma eğilimine sahip olduğunu göstermiştir.

- Afşin istasyonunda $p < 0.05$ düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bir yağış azalımı tespit edilmiştir.
- Ceyhan istasyonunda zayıf bir azalış eğilimi görülmüş ancak anlamlı değildir ($p = 0.08$).
- Diğer istasyonlarda ise anlamlı bir eğilim belirlenmemiştir.

Bu sonuçlar, Ceyhan Havzası'nda belirgin bir kuraklaşma sinyalinin iç kesimlerde yoğunlaştığını, kıyı istasyonlarında ise eğilimin daha zayıf olduğunu göstermektedir. Böylece bulgular, literatürde benzer havzalar için bildirilen eğilimlerle uyumludur.

- **Yöntemler Açısından:**

Üç yöntem birlikte değerlendirildiğinde:

- SYİ ve NYİ, hem sıralama hem mekânsal desen açısından yüksek tutarlılık göstermiştir.

- OKİ, 1990 ve 2016 yıllarını daha şiddetli kurak dönemler olarak öne çıkarmış ve özellikle iç bölgelerdeki aşırı olaylara daha duyarlı olduğunu ortaya koymuştur.
- SYİ-NYİ, genel kuraklık eğilimlerinin izlenmesinde;
- OKİ ise risk analizleri ve aşırı kurak dönemlerin belirlenmesinde daha işlevseldir.

Dolayısıyla yöntemlerin birlikte kullanılması, Ceyhan Havzası için daha bütüncül bir kuraklık değerlendirmesi sağlamaktadır.

Risk Bazlı Detay Analiz için OKİ, özellikle su kaynakları planlaması ve tarımsal kuraklık riskinin belirlenmesi gibi konularda, farklı bir perspektif sunarak tamamlayıcı bir yöntem olarak kullanılmalıdır. İç bölgelerdeki yüksek riski vurgulaması, bu bölgelere yönelik önlemlerin artırılması gerektiğini göstermektedir.

İleri Çalışmalar için her bir yöntemin farklı zaman ölçeklerindeki (3 ay, 6 ay, 12 ay vb.) performanslarının tarımsal ve hidrolojik kuraklıkla ilişkisinin incelendiği detaylı bir validasyon çalışması, hangi yöntemin hangi amaç için daha uygun olduğunu netleştirecektir.

• Havza Yönetimi Açısından

Bu çalışma, Ceyhan Havzası'nın gelecekte artan kuraklık riskine açık bir bölge olduğunu göstermektedir. İç kesimlerdeki anlamlı yağış azalışı ve kıyı bölgelerinde görülen yaygın kuraklık, su yönetimi açısından kritik bir uyarıdır.

Özetle, üç yöntem de havzanın kuraklık geçmişini anlamak için değerli veriler sunar. SYİ ve NYİ genel tabloyu çizerken, OKİ bu tabloya önemli bir detay ve derinlik katmaktadır.

Çalışma sonuçlarına göre; bölgesel tarımsal üretim planlamasında kuraklık riskleri dikkate alınmalı, erken uyarı sistemleri ve kuraklık tahmin modelleri geliştirilmeli, yeraltı suyu yönetimi ve su tasarrufu politikaları güçlendirilmeli, ileri iklim projeksiyonları kullanılarak bölgesel ölçekte daha ayrıntılı çalışmalar yapılmalıdır.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın veri ihtiyacı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Çalışmamızın gerçekleştirilmesinde sağladıkları değerli katkı ve teknik destek için Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne ve çalışanlarına en derin şükranlarımızı sunarız.

6. KAYNAKLAR

1. Alami, M., Din, S. & Tayfur, G. (2018). Meteorological drought analysis by different methods in Helmand River Basin, Afghanistan. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 8(2), 847-849.
2. Fakhrabadi, A., Entezari, A. & Bazrafshan, O. (2014). Assess the drought situation in Kashan desert of Kashan and Aran Shahrstan Hay Bidgol (Nushabad) using the standardized precipitation index (SPI). *Quarterly Geographical Journal of Territory*, 11(42), 77-86.
3. Apak, E. (2009). Standart yağış indeksi (SPI) yöntemi ile Ege Bölgesinde kuraklık analizi. *Yüksek lisans tezi*. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarımsal Yapılar ve Sulama Anabilim Dalı, 60.
4. Arslan, O., Bilgil, A. ve Veske, O. (2016). Standart yağış indisi yöntemi ile Kızılırmak Havzası'nın meteorolojik kuraklık analizi. *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(2), 188-194.
5. Bacanlı, Ü. & Akşan, G. (2019). Drought analysis in Mediterranean Region. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(6), 665-671.
6. Deniz, D. (2009). Türkiye'deki kuraklığın standart yağış indeksi (SPI) ile incelenmesi. *Yüksek lisans tezi*. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Coğrafya Ana Bilim Dalı, 106.
7. Dinç, N., Aydınşakir, K., Işık, M. ve Büyüktaş, D. (2016). Standartlaştırılmış yağış indeksi (SPI) yöntemi ile Antalya ili kuraklık analizi. *Derim*, 33(2), 279-298.
8. Ersoy, T. (2019). Konya ili meteorolojik kuraklık analizi. *Yüksek lisans tezi*. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Ana Bilim Dalı, 71.

9. Fidan, İ. (2011). Doğu Akdeniz Bölgesinde standardize yağış indeksi (SYİ) ile kuraklık analizi ve Markov zinciri yöntemini kullanarak kurak olma olasılıklarının belirlenmesi. *Yüksek lisans tezi*. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarımsal Yapılar ve Sulama Anabilim Dalı, 88.
10. Gümüş, V., Başak, A. ve Oruç, N. (2016). Standartlaştırılmış yağış indeksi (SYİ) yöntemi ile Şanlıurfa istasyonunun kuraklık analizi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 1(1), 36-44.
11. Gürler, Ç. (2017). Beyşehir ve Konya-Çumra-Karapınar alt havzalarında standartlaştırılmış indeks yaklaşımı ile hidrolojik kuraklık değerlendirilmesi. *Uzmanlık tezi*. T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, 139.
12. Şener, E. ve Şener, Ş. (2019). Meteorolojik kuraklığın coğrafi bilgi sistemleri tabanlı zamansal ve konumsal analizi: Çorak Gölü Havzası (Burdur-Türkiye) örneği. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(3), 596-607.
13. Topçu, E., Seçkin, N. & Haktanır, N.A. (2022a). Drought analyses of Eastern Mediterranean, Seyhan, Ceyhan, and Asi Basins by using aggregate drought index (ADI). *Theoretical and Applied Climatology*, 147(3-4), 909-924.
14. Topçu, E. & Seçkin, N. (2022b). Drought assessment using the reconnaissance drought index (RDI): A case study of Eastern Mediterranean, Seyhan, Ceyhan, and Asi basins of Turkey. *Journal of Engineering Research*, 10(2B), 124-141.
15. Keskiner, A.D., Çetin, M., Şimşek, M. ve Akın, S. (2020). Kuraklık riski altındaki havzalarda gölet haznelerinin tasarımı: Seyhan Havzası'nda bir uygulama. *Teknik Dergi*, 31(5), 10189-10210.
16. Hasaniha, H. (2008). İran'ın kuzeybatısında kuraklık ve verim ilişkisinin analizi. *Doktora tezi*. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarımsal Yapılar ve Sulama Anabilim Dalı, 153.
17. Topçu, E. & Seçkin, N. (2016). Drought analysis of the Seyhan Basin by using standardized index and L-moments. *Journal of Agricultural Sciences*, 22, 196-215.
18. Mokarram, M. & Mohmood, A. (2015). Using SPI and PN indices for determination of drought in the Fars Province. *Journal of Applied Hydrology*, 2(1), 49-60.
19. Said, A.A., Cetin, M. & Yurtal, R. (2019). Drought assessment and monitoring using some drought indicators in the semi-arid Puntland State of Somalia. *Fresenius Environmental Bulletin*, 28(11A), 8765-8772.
20. Tirivarombo, S. & Hughes, D.A. (2011). Regional droughts and food security relationships in the Zambezi River Basin. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 36(14-15), 977-983.
21. T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, (2018). *Ceyhan Havzası taşkın yönetim planı*. Ankara.
22. Hayes, M.J. (2006). Drought indices. *Van Nostrand's Scientific Encyclopedia*. Erişim tarihi: 28.08.2025.
23. Gibbs, W.J. & Maher, J.V. (1967). *Rainfall deciles as drought indicators*. Bureau of Meteorology Bulletin No. 48. Commonwealth of Australia.
24. McKee, T.B., Doesken, N.J. & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *8th Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society*, Boston, Massachusetts, ABD.
25. WMO ve GWP, (2016). *Handbook of drought indicators and indices* (M. Svoboda ve B.A. Fuchs, Ed.). Integrated Drought Management Programme (IDMP). (WMO-No: 1173).
26. Guttman, N.B. (1999). Accepting the standardized precipitation index: A calculation algorithm. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), 311-322.
27. AgriMetSoft. (2017). *Meteorological Drought Monitor (MDM)* [Bilgisayar yazılımı]. AgriMetSoft. <https://www.agrimetsoft.com/mdm.aspx>. Erişim tarihi: 28.08.2025.
28. Golden Software. (2022). *Surfer*, Golden, Colorado, USA.
29. Öztürk, M. ve Seçkin, N. (2020). Standartlaştırılmış yağış indeksi (SPI) ve normalin yüzdesi indeksi (PNI) kullanılarak Seyhan Havzası'nda kuraklık analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 35(2), 101-112.
30. Yılmaz, H. ve Topçu, E. (2021). Meteorolojik kuraklık indekslerinin karşılaştırılması: Asi Havzası örneği. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(3), 45-58.

Boru Destekli Hava Soğutmalı Sistemlerin Lityum-İyon Batarya Paketlerindeki Termal Performansının İncelenmesi

Ferhat AKKUŞ^{1,a}, Mehmet Zerrakki IŞIK^{1,b}

¹Batman Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Batman, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-4587-7039; ^bORCID: 0000-0001-9753-6458

Makale Bilgileri

Geliş : 19.07.2025

Kabul : 31.10.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1746133

Sorumlu Yazar

Ferhat AKKUŞ

Ferhat.akkus@batman.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Elektrikli araçlar

Lityum iyon bataryalar

Batarya termal yönetim sistemleri

Hava soğutma

Uniform sıcaklık dağılımı

Atıf şekli: AKKUŞ, F., IŞIK, M.Z., (2025). Boru Destekli Hava Soğutmalı Sistemlerin Lityum-İyon Batarya Paketlerindeki Termal Performansının İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(4), 855-866.

ÖZ

Artan küresel enerji talebi ve çevresel kaygılar, fosil yakıtlara dayalı ulaşım sistemlerinde sürdürülebilir alternatiflerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu doğrultuda elektrikli araçlar, yüksek verimlilikleri ve sıfır emisyon özellikleriyle ön plana çıkmaktadır. Elektrikli araçların temel bileşenlerinden biri olan lityum-iyon bataryalar, termal kararlılık açısından dikkatle izlenmeli; aşırı ısınmanın önüne geçilmelidir. Bu çalışmada, tasarlanan geometrideki sahip lityum-iyon batarya paketlerinin termal davranışı, boru destekli hava soğutmalı sistemle sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Farklı hava akış hızlarında ve boru konfigürasyonlarında analiz edilerek soğutma performansları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, artan hava hızı ve boru sayısının sıcaklık dağılımını iyileştirdiğini, hücreler arası sıcaklık farkını azalttığını ve maksimum sıcaklık değerlerini düşürdüğünü göstermektedir. Çalışma, elektrikli araçlarda batarya güvenliğini artırmaya yönelik termal yönetim sistemlerinin optimizasyonu için önemli bulgular sunmaktadır.

Investigation of Thermal Performance of Pipe-Supported Air-Cooled Systems in Lithium-Ion Battery Packs

Article Info

Received : 19.07.2025

Accepted : 31.10.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1746133

Corresponding Author

Ferhat AKKUŞ

Ferhat.akkus@batman.edu.tr

Keywords

Electric vehicles

Lithium-ion batteries

Battery thermal management systems

Air cooling

Uniform temperature distribution

How to cite: AKKUŞ, F., IŞIK, M.Z., (2025). Investigation of Thermal Performance of Pipe-Supported Air-Cooled Systems in Lithium-Ion Battery Packs. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(4), 855-866.

ABSTRACT

The increasing global energy demand and environmental concerns have necessitated the development of sustainable alternatives to fossil fuel-based transportation systems. In this context, electric vehicles have gained prominence due to their high efficiency and zero-emission characteristics. Lithium-ion batteries, as one of the core components of electric vehicles, require careful monitoring for thermal stability to prevent overheating. In this study, the thermal behavior of lithium-ion battery packs with the designed geometry was investigated numerically and experimentally with a tube-supported air-cooled system. Cooling performances were compared by analyzing different air flow velocities and pipe configurations. The results demonstrate that increasing air velocity and the number of pipes improves temperature distribution, reduces temperature gradients between cells, and lowers maximum temperature values. This study provides significant insights for the optimization of thermal management systems aimed at enhancing battery safety in electric vehicles.

1. GİRİŞ

Canlıların hayatlarını devam ettirebilmesi için enerji en temel gereksinim olmasının yanında, ekonomik, sosyal ve teknolojik gelişmelerin temel itici unsurudur. Nüfus artışı, kentleşme ve sanayi alanlarındaki hızlı ilerlemeler enerji talebini daha da artırmış, bu da enerji kaynaklarının sürdürülebilir yönetimini ve üretim süreçlerinin çevresel etkilerinin azaltılmasını zorunlu kılmıştır. Fosil yakıtların kısıtlı rezervleri ve oluşturduğu çevresel sorunlar, güneş, rüzgâr, biokütle, hidrolik ve dalga enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini artırmıştır. Ulaşım sektörü, fosil yakıtlı içten yanmalı motorlara dayalı gelişimi nedeniyle yüksek enerji tüketimi ve çevresel sorunlar yaratmaktadır. Artan çevresel kaygılar ve enerji güvenliği ihtiyacı, sektörde temiz, sürdürülebilir ve çevre dostu alternatiflerin geliştirilmesini zorunlu kılmış ve elektrikli araç teknolojilerini ön plana çıkarmıştır [1-7].

Elektrikli araçlar, benzin, motorin ve LPG gibi petrol türevi yakıtlara bağımlılığı azaltmış, yüksek enerji verimliliği ve sıfır emisyon gibi avantajları sayesinde sürdürülebilir ulaşımında kritik bir rol oynar. Yapısal ve çalışma prensiplerine göre tam elektrikli araçlar (BEV), hibrit elektrikli araçlar (HEV) ve fişli hibrit elektrikli araçlar (PHEV) olarak sınıflandırılır. BEV'ler yalnızca elektrik motoru ile çalışarak sıfır emisyon sağlar, HEV'ler geleneksel içten yanmalı motor ile elektrik motorunu birlikte kullanarak yakıt verimliliğini artırır, PHEV'ler ise harici şarj imkânıyla elektrik kullanım süresini uzatır. Bu çeşitlilik, fosil yakıt kullanımını azaltmak ve enerji depolama çözümlerini geliştirmek için farklı ihtiyaçlara yanıt verir. Elektrikli araçlarda enerji depolama ve kullanımının en önemli bileşenini bataryalar oluşturmaktadır. Lityum iyon bataryalar (LiB), yüksek enerji yoğunluğu, uzun ömür ve düşük kendi kendine deşarj özellikleri gibi avantajlarıyla sıklıkla tercih edilir. Yapısal olarak kese, prizmatik ve silindirik tipleri bulunur; kese tip hafif ve düşük dirençli olup termal yönetim açısından oldukça hassastır, prizmatik tip yüksek kapasite ve geniş soğutulabilir yüzeyi bulunmakta, silindirik tip ise kompakt yapısı ve yüksek güç yoğunluğu ile mekanik dayanıklılık sağlar. Bu çeşitlilik, farklı performans ve güvenlik gereksinimlerine uygun batarya çözümleri sunar [8-22].

Elektrikli araçların verimliliği ve güvenliği batarya teknolojilerine bağlıdır. LiB yüksek enerji yoğunluğu ve uzun ömürleriyle yaygın kullanılır; ancak maliyet, sınırlı ömür ve sıcaklık hassasiyeti gibi zorlukları bulunmaktadır. Bataryalar için sıcaklık; performans, şarj-deşarj hızı ve ömür üzerinde kritik bir etkidir. Ani sıcaklık değişimleri kimyasal yapıyı bozarak performans kaybı ve güvenlik risklerine yol açabilir. Optimum sıcaklık aralığının (20-40 °C) korunması ve hücreler arası farkın 5 °C'yi geçmemesi çok önemlidir. Yüksek şarj-deşarj hızları (C oran) termal dengesizlik yaratarak batarya ömrünü kısaltır. Bu nedenle, elektrikli araçlarda güvenli ve verimli batarya kullanımı için şarj kontrolünün yanı sıra etkili bir termal yönetim sistemi gereklidir [23-27].

Elektrikli araç bataryalarının etkin termal yönetimi, batarya performansı, güvenliği ve ömrü açısından kritik öneme sahiptir. Bu kapsamda yapılan çeşitli çalışmalarda, lityum iyon batarya paketlerinin hava soğutmalı termal yönetim sistemlerinin optimizasyonu ve enerji verimliliği artırmaya yönelik yaklaşımlar incelenmiştir. Mustafa çalışmasında [28], batarya hücreleri arasındaki mesafe ile hava giriş-çıkış boyutlarının batarya sıcaklığı ve ısı transferi üzerindeki etkileri modellenmiş; hava giriş boyutunun artırılmasının sıcaklık düşürmede ve ısı transferini iyileştirmede etkili olduğu gösterilmiştir. Benzer şekilde, Hasan ve arkadaşları [29], hücreler arası mesafenin artmasının ve yüksek Reynolds sayılarının batarya yüzeyindeki sıcaklıkları düşürerek termal performansı iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, hava akışının batarya termal yönetiminde önemli bir yöntem olduğunu desteklemektedir. Zhang ve arkadaşları [30] çalışmalarında, farklı hava çıkış konumlarına sahip hava soğutmalı sistemlerin performansını inceleyerek, rüzgâr hızının ve çıkış konumunun termal dengeyi olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Çalışmada geliştirilen matematiksel model, soğutma performansının optimize edilmesi için değerli bir referans sunmaktadır. Isı borulu soğutma sistemleri üzerine yapılan araştırmalar da termal yönetim alanında önemli katkılar sağlamaktadır. Alihosseini ve Shafae [31] tarafından önerilen bakır ısı borulu sistem, zorlanmış taşınım ile batarya sıcaklığının optimum aralıkta tutulmasını sağlamış, ortam sıcaklığının batarya performansı üzerindeki etkisi vurgulanmıştır. Ren ve arkadaşları [32] ise U şekilli mikro ısı borusu içeren aktif soğutma sistemlerinin, farklı şarj/deşarj oranlarında batarya sıcaklığını önemli ölçüde düşürdüğünü ve yüksek yük koşullarında tercih edilmesi gerektiğini göstermiştir. Ancak aktif soğutma sistemlerinde sıcaklık homojenliğinin pasif sistemlere kıyasla daha düşük olduğu da belirtilmiştir. Genel olarak, literatürde hava akışı optimizasyonu, hava giriş-çıkış boyutlarının ayarlanması, ısı borulu aktif soğutma

sistemlerinin LiB'lerin termal yönetiminde etkili olduğu ve batarya performansını artırdığı görülmektedir. Bu yöntemler, elektrikli araç batarya sistemlerinin güvenli, verimli ve uzun ömürlü çalışmasını destekleyerek, sürdürülebilir ulaşım teknolojilerinin gelişimine katkı sağlamaktadır.

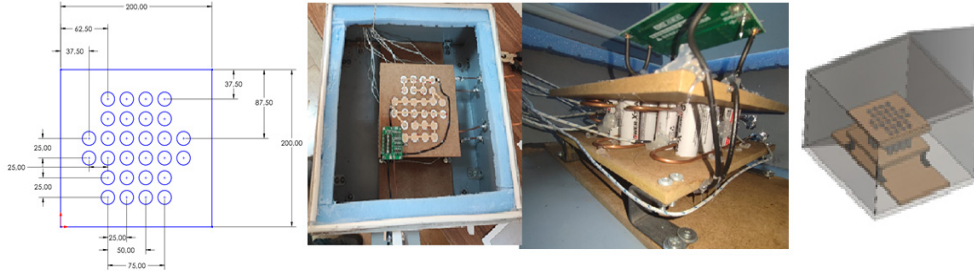
Bu bağlamda, bu çalışmada, 14,4 V maksimum voltaj ve 24,5 A maksimum akım kapasitesine sahip, 4 seri 7 paralel (4S7P) konfigürasyonlu LiB paketinin termal yönetimi için bakır ısı borulu soğutma sistemleri üzerine odaklanılmıştır. Tasarlanan batarya paketinde, ısı borularının içinden yönlendirilen hava akışı ile batarya hücrelerinden ısının etkin bir şekilde uzaklaştırılması amaçlanmıştır; böylece hücreler arasındaki sıcaklık farkının minimize edilmesi ve termal kaçak riskinin azaltılması hedeflenmiştir. Literatürde yaygın olarak incelenen hava soğutmalı ve pasif/aktif ısı borulu sistemlerin ötesinde, bu çalışma dizilim geometrisi ve bakır ısı borularının yönlendirilmiş hava akışı ile entegrasyonunu bir araya getirerek batarya paketinin termal davranışını özgün bir şekilde ele almaktadır. Önceki çalışmalarda genellikle hücreler arası mesafe, hava giriş-çıkış boyutları veya mikro ısı borulu sistemlerin farklı geometrilerdeki performansları incelenmişken, bu çalışmada yüksek akım ve 4S7P konfigürasyonlu batarya paketlerinde aktif ısı borulu soğutma sisteminin performansı sistematik olarak değerlendirilmiştir. Bu özellikleri ile çalışma, literatürdeki hava ve ısı borulu soğutma sistemleri araştırmalarından farklılaşmakta ve elektrikli araç bataryalarının güvenli, verimli ve uzun ömürlü çalışmasını destekleyen özgün bir tasarım ve analiz yaklaşımı sunmaktadır.

2. YÖNTEM

2.1. Model Tasarımı

Bu çalışmada, oluşturulan geometrik dizilime sahip 4 seri 7 paralel (4S7P) konfigürasyonda toplam 28 adet 18650 silindirik tip lityum iyon batarya hücresinden oluşan paketin termal performansını artırmak amacıyla bakır borular kullanılarak bir soğutma sistemi tasarlanmıştır. Yüksek ısı iletkenliğe sahip bakır borular, batarya hücreleri arasına doğrudan entegre edilerek açığa çıkan ısının hızlı ve dengeli bir şekilde uzaklaştırılması hedeflenmiştir. Her bir batarya hücresinin çapı 18 mm, yüksekliği 65 mm olup, nominal gerilimi 3,6–3,7 V, kapasitesi 3500 mAh, minimum kesme voltajı 2,5 V ve maksimum kesme voltajı 4,2V'tur. Bataryalar, iki plaka arasında akım koruma kartı, nikel şerit ve punta kaynağı ile güvenli şekilde monte edilmiştir. Batarya paketinin maksimum voltajı 14,4 V, maksimum akımı ise 24,5 A olarak belirlenmiştir. Şarj işlemleri sabit akım-sabit voltaj (CC-CV) yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Bu bilgiler, çalışmada pil seçim kriterlerinin ve paket tasarımının anlaşılmasını sağlamaktadır.

Oluşturulan geometrik dizilimde (Şekil 1), bataryalar plaka üzerinde düzenli bir şekilde yerleştirilmiş olup, merkezler arasındaki mesafeler yatay ve dikey olarak 25 mm'dir. Bataryalar, plakanın dörtkenarına paralel konumlandırılmış ve geometrik merkeze göre simetrik bir düzen oluşturulmuştur. İlk sıradaki batarya merkezleri, plakanın alt ve yan kenarlarından 37,5 mm uzaklıktadır. Üst sıralara doğru düzenli ve simetrik yerleşim devam etmiş, bu sayede hem mekanik denge sağlanmış hem de elektriksel bağlantıların düzenli ve güvenli yapılması mümkün olmuştur. Ayrıca, bataryalar arasında eşit mesafe bırakılmasıyla ısı dağılımı optimize edilerek termal yönetim iyileştirilmiştir. Bu tasarım, mekanik dayanıklılığı artırırken termal güvenliği destekleyen önemli avantajlar sunmaktadır. Pil paketi, 2,5 x 3,5 x 3 mm boyutlarındaki U şeklindeki metal profille 400 mm uzunluğunda ve 200 mm genişliğindeki alt plakaya sabitlenmiş ve 400 x 400 x 200 mm boyutlarındaki dikdörtgen prizma şeklindeki şartlandırma ortamına yerleştirilmiştir. Toplam 28 bataryanın 14'ü alt kısımda düzenli şekilde konumlandırılırken, üst kısımda simetrik bir yerleşim sağlanmıştır. Bu simetrik düzenleme, mekanik dengeyi artırmakla kalmayıp, termal ve elektriksel bağlantıların düzenli ve güvenli yapılmasına da olanak tanımaktadır. Tasarım, mekanik dayanıklılık ile termal ve elektriksel güvenliği optimize edecek şekilde geliştirilmiştir. Bakır boruların bir ucu aktif hava giriş bölgesine, diğer ucu ise hava çıkış noktasına konumlandırılarak sistemde doğrusal ve yönlendirilmiş bir hava akışı sağlanmıştır. Havanın, girişten çıkışa sapma olmadan ilerlemesi sayesinde borular boyunca etkili bir ısı taşıma mekanizması oluşmuştur. Borular doğrudan batarya hücrelerinin dış yüzeyleriyle temas ederek ısıyı hızlıca iletmiş; bakırın yüksek ısı iletkenliği sayesinde ısı borular boyunca taşınmış ve zorlanmış hava akımıyla sistem dışına aktarılmıştır. Böylece aşırı ısınma önlenmiş, sıcaklık farkları azaltılarak dengeli sıcaklık dağılımı sağlanmıştır. Bu yapı, bataryanın termal güvenliğini artırırken ömrü ve performansını da iyileştirmiştir.

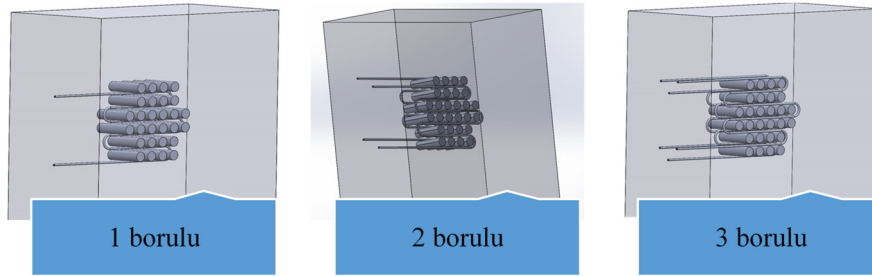


Şekil 1. Tasarlanan dizilim geometrisinde bataryaların yerleşimi ve deney düzeneği

2.2. Sayısal Simülasyon Tasarımlarının Oluşturulması

BTMS sayısal analizi için üç boyutlu bir model oluşturulmuş ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizler, deneysel bulguların doğrulanması ve sistemin farklı çalışma koşullarındaki termal performansının detaylı bir şekilde incelenmesi amacıyla yapılmıştır. Batarya paketinin üç boyutlu geometrik modeli, SolidWorks bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı kullanılarak geliştirilmiş ve analizler, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) uygulaması olan Ansys-Fluent ile gerçekleştirilmiştir. Batarya termal yönetiminde soğutma verimliliği ve sıcaklık dağılımının homojenliğini değerlendirmek amacıyla CFD yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem, akış alanı ve sıcaklık alanının detaylı bir şekilde hesaplanmasını sağlamaktadır. Çalışmada, CFD analizleri ile deneysel sonuçların doğruluğu test edilmekte ve sistemin ileriye dönük optimizasyonu için çalışmalar yapılmaktadır. Bu kapsamda, CFD analizleri, BTMS performansını artırmaya yönelik önemli bir araç olarak kullanılmaktadır.

Tasarlanan dizilim geometrisinde, bataryalar plaka üzerinde düzenli bir şekilde yerleştirilmiş ve yapılan çalışmalarda (Şekil 2), sayısal simülasyon analizleri 1, 2 ve 3 borulu soğutma sistemleri için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Her bir konfigürasyonda, bakır borular batarya hücrelerinin yalnızca belirli bir kısmına temas edecek şekilde yerleştirilmiştir. Bu dizilimde, boruların yerleştirildiği alanlar ile batarya hücreleri arasındaki mesafeler geniş olduğundan, özellikle 1 borulu konfigürasyonda boru yalnızca tek bir katmana temas edebilmekte, dikey mesafeden dolayı diğer katmanlarla temas sağlayamamaktadır. Buna karşılık, 2 ve 3 borulu konfigürasyonlarda borular alt ve üst katmanlara yerleştirilerek çift taraflı temas sağlanmış, böylece daha fazla batarya hücresine doğrudan temas ile ısı transfer yüzeyi artırılmıştır. Bu yerleşim, özellikle ısı dağılımının daha dengeli olması ve daha etkin bir soğutma performansı elde edilmesi açısından avantaj sağlaması düşünülmektedir.



Şekil 2. Tasarlanan dizilim geometrisi için ısı borulu soğutma modelleri

Sayısal simülasyon çalışmaları geniş bir parametre aralığında gerçekleştirilmiştir. 10 amperlik sabit deşarj akımı altında, 1, 2 ve 3 borulu soğutma konfigürasyonları için hava hızları 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s ve 20 m/s olacak şekilde analizler yürütülmüştür. Bu kapsamlı sayısal analizlerle, hem boru sayısının hem de hava akış hızının batarya paketinin termal performansı üzerindeki etkileri detaylı biçimde incelenmiş; elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılarak sayısal modelin doğruluğu değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada, tasarlanan dizilim geometrisinde 28 adet lityum-iyon bataryadan oluşan bir batarya paketine ait üç boyutlu sayısal akışkanlar dinamiği (CFD) analizleri, ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerin doğru, güvenilir ve hesaplama açısından verimli olabilmesi amacıyla çeşitli varsayımlar yapılmıştır. Batarya hücreleri sabit ve homojen ısı üreten kaynaklar olarak modellenmiş; bireysel hücrelerin ısı etkileri ihmal edilmiştir. Soğutucu akışkan olarak kullanılan hava, su ve antifriz

sıkıştırılamaz, sabit yoğunluklu ve Newton tipi akışkanlar olarak ele alınmıştır. Batarya paketine ait bağlantı elemanları ve tutucular, termal ve akışkan davranış üzerindeki etkilerinin sınırlı olduğu varsayımıyla modellemeye dâhil edilmemiştir. Ayrıca, deney düzeneği adyabatik ortam koşullarında değerlendirilmiş ve çevresel etkiler göz ardı edilmiştir. Giriş sıcaklığı ve dış ortam basıncı sabit tutulmuş; analizlerde kullanılan akışkanların fiziksel özellikleri, sıcaklıkla değişimlerinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu kabul edilerek sabit alınmıştır. Boru içi hava akışı üzerinden yapılan analizlerde, batarya paketi çevresi sabit sıcaklıkta kabul edilmiş olup, ortamda herhangi bir hava akışı veya doğal taşınım etkisi modellenmemiştir. Bu yaklaşım sayesinde, yalnızca borular içerisinde geçen havanın taşıdığı ısı transferini değerlendirilmektedir.

Boru içinden geçen hava için yapılan hesaplamalarda, deneylerin 25–30 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirildiği dikkate alınarak, havanın termofiziksel özellikleri sabit kabul edilmiştir. Bu doğrultuda, 25 °C sıcaklıkta yoğunluk 1,184 kg/m³, dinamik viskozite 1,85 × 10⁻⁵ Pa·s ve kinematik viskozite 1,56 × 10⁻⁵ m²/s olarak alınmıştır [33]. Boru çapının 2 mm, hava akış hızının 5–20 m/s aralığında olduğu çalışma için, boru içindeki akışın karakterizasyonu için Reynolds sayısı (Eşitlik 1) kullanılmıştır [34]:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{v d}{\nu} \quad (1)$$

Burada v boru içindeki hava hızı, ρ yoğunluk, μ dinamik viskozite ve ν kinematik viskoziteyi temsil etmektedir. 2 mm boru çapında, 5–20 m/s aralığındaki hızlara karşılık gelen Reynolds sayıları 659 ile 2636 arasında değişmekte olup, bu değerler literatürde iç akışlar için laminar rejim sınırları içinde yer almaktadır. 2300 civarına yaklaşan değerlerde yerel geçiş bölgeleri oluşabileceği göz önünde bulundurulsa da, genel akış rejimi laminar kabul edilerek sayısal çözümlemeler bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada hava akışı sadece boru içerisinde gerçekleşmektedir; boru dışındaki bölgelerde herhangi bir hava akışı bulunmamaktadır. Bu sebeple Reynolds sayısının hesaplanmasında yalnızca dairesel boru iç akış için klasik hidrolik çap yaklaşımı kullanılmıştır. Düzgün olmayan akış alanları söz konusu olmadığından, lokal Reynolds dağılımlarının değerlendirilmesi bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur.

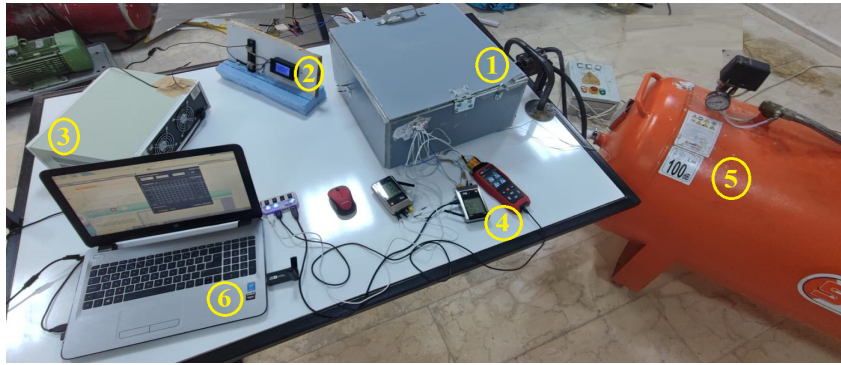
2.3. Deney Düzenekinin Oluşturulması

Deneyisel çalışmalar yalnızca 2 borulu soğutma konfigürasyonu için gerçekleştirilmiş ve bu amaçla tasarlanan dizilim geometrisine uygun özel bir test düzeneği tasarlanmıştır. Düzenekte, bakır borular batarya hücrelerinin yalnızca bir yüzeyine temas edecek şekilde yerleştirilmiştir; biri alt, diğeri üst kısımdan karşılıklı konumlandırılan borularla sınırlı yüzey temasına dayalı tek taraflı soğutma sağlanmıştır. Bu yapı sayesinde boruların oluşturduğu sıcaklık dağılımları gözlemlenmiş ve elde edilen veriler, sayısal simülasyonların kalibrasyonu ile doğrulama sürecinde kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarıyla birlikte değerlendirilerek boru sayısının sistemin termal performansı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Batarya paketine yönelik deneylerde, farklı hava hızlarında 2 borulu soğutma sistemi test edilmiştir. Bakır borulara belirli hızlarda hava üflenmiş, sıcaklık değişimleri hassas sensörlerle izlenmiştir. Yüksek akım için kritik değer olan 10 amperlik deşarj akımı altında 5 m/s, 10 m/s ve 12 m/s hava hızlarında; 15 amperlik daha yüksek akım altında ise yalnızca 5 m/s ve 10 m/s hızlarında testler yapılmıştır. Bu testlerle sistemin farklı akım ve hava hızlarına karşı termal tepkisi değerlendirilmiştir. Deneylerin gerçekleştirilmesi amacıyla, dış ortam koşullarından tamamen yalıtılmış bir şartlandırma ortamı tasarlanmış ve oluşturulmuştur. Bu ortam, deneylerin adyabatik olarak gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Deneylerde, batarya paketinde sıcaklık dağılımlarını hassas bir şekilde ölçmek amacıyla toplamda 12 adet termokupl kullanılmıştır. Batarya paketlerinin termal davranışını incelemek amacıyla, batarya paketleri üzerinde farklı stratejik noktalara 9 adet termokupl yerleştirilmiştir. Bu yerleşimle, batarya paketlerinin yüzey sıcaklıklarının homojenliğini ve termal davranışlarını analiz etmek için optimize edilmiştir. Ölçüm noktaları, paket merkezindeki maksimum sıcaklık bölgeleri, kenar ve köşe bölgeleri, akım koruma kartı ve bağlantı elemanlarına yakın bölgeler ile hava giriş-çıkış alanlarını kapsayacak şekilde seçilmiştir. Bu sayede, batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımı doğru şekilde tespit edilerek sayısal simülasyon sonuçları ile karşılaştırılabilirlik sağlanmıştır. Geriye kalan 3 tane termokupl ise düzenek dışında konumlandırılmıştır ve çevresel sıcaklık ölçümleri için kullanılmıştır. Dış ortam ölçümleri için kullanılan termokupllardan biri, şartlandırma ortamının genel hava sıcaklığını ölçmek amacıyla üst kapağa monte edilmiştir. Diğer iki

termokupl ise soğutma sistemine entegre edilmiştir. Bu termokupllardan biri, soğutucu akışkanın giriş sıcaklığını ölçmek amacıyla soğutma hattının giriş noktasına yerleştirilmiştir. Diğeri ise soğutucu akışkanın çıkış sıcaklığını ölçmek amacıyla çıkış hattına bağlanmıştır. Bu yerleşim, soğutma sisteminin performansını ve ısı transfer etkinliğini değerlendirmek için kritik veriler sağlamaktadır. Şartlandırma ortamının tasarımı, dış ortam etkilerinin tamamen izole edilmesini ve düzeneklerin termal davranışlarının yalnızca deneysel parametreler doğrultusunda incelenmesini mümkün kılacak şekilde optimize edilmiştir. Bu sayede, deneylerden elde edilen verilerin doğruluğu ve güvenilirliği artırılmıştır.

Deneyisel çalışmalarda kullanılan test düzeneği (Şekil 3), batarya paketinin termal performansını ayrıntılı şekilde analiz etmek amacıyla tasarlanmış ve çeşitli bileşenlerden oluşmuştur. Şekil 3'te gösterilen sistemin temel bileşenleri şu şekildedir: Batarya paketinin yerleştirildiği şartlandırma ünitesi (1), deneylerin sabit ve kontrollü çevresel koşullar altında yürütülmesini sağlamıştır. Akım ve voltaj değerlerinin izlenebilmesi için kullanılan gösterge paneli (2), batarya paketine uygulanan yüklerin hassas biçimde kontrol edilmesine olanak tanımıştır. Ayarlanabilir akım deşarj ünitesi (3), batarya paketine 10–15 A aralığında farklı akım yükleri uygulayarak çeşitli çalışma koşulları altında termal performans değerlendirmesine imkân vermiştir. Sıcaklık ölçümleri, batarya paketine yerleştirilen termokupllar aracılığıyla gerçekleştirilmiş ve bu veriler datalogger cihazı (4) kullanılarak güvenilir şekilde kaydedilmiştir. Boru içi hava akışını sağlamak üzere kullanılan 200 litrelik pistonlu kompresör (5), sisteme sabit hava temini sağlamış; çıkış hattına yerleştirilen ayarlanabilir vana ile hava debisi istenen düzeyde ayarlanmıştır. Tüm deneysel veriler bilgisayar destekli veri toplama sistemi (6) üzerinden kaydedilmiş ve analiz edilmiştir. Bu deney düzeneği, batarya paketine ait termal yönetim sisteminin performansını değerlendirmeye yönelik kapsamlı ve karşılaştırmalı bir altyapı sunarak sayısal simülasyon verilerinin doğrulanmasına katkı sağlamaktadır.



Şekil 3. Isı borulu deney düzeneği ekipmanları

Bu çalışmada, 14,4 V maksimum voltaj ve 24,5 A maksimum akım kapasitesine sahip LiB paketi incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, sistemin termal performansında belirleyici bir sınır olarak 10 A akım değeri kritik eşik olarak belirlenmiş ve sayısal simülasyonlar ile deneysel çalışmalar bu değer temel alınarak yürütülmüştür. Deneyisel düzende, batarya paketinin termal davranışını değerlendirmek amacıyla iki adet ısı borusu entegre edilmiştir. Doğal taşınım ve ısı borulu soğutma koşullarını test edebilecek esnekliğe sahip bu sistem, yüksek hassasiyetli sıcaklık sensörleriyle donatılmış ve tüm veri toplama işlemleri kontrollü bir test ortamında gerçekleştirilmiştir. Böylece sayısal ve deneysel analizlerin güvenilir, tekrarlanabilir ve karşılaştırılabilir sonuçlar sunması sağlanmıştır. Bu kapsamda elde edilen bulgular, batarya dizilim geometrisinin ve ısı borulu soğutma stratejisinin sistemin termal performansı üzerindeki etkilerinin detaylı bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımış ve bir sonraki bölümde sunulacak sonuçların temelini oluşturmuştur.

2.4. Enerji Dengesi ve Isı Üretimi Modeli

LiB, şarj/deşarj sırasında batarya hücresinin içinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar ve iç direnç kaynaklı enerji kayıplarından ısı üretmektedir. Bataryalar, pozitif elektrot (katot), negatif elektrot (anot), ayırıcı ve elektrolit olmak üzere dört ana bileşenden meydana gelmektedir. Şarj/deşarj sırasında katot ve anot arasında bulunan lityum iyonları ve elektronlar hareket eder; elektronlar harici devre üzerinden, iyonlar ise elektrolit aracılığıyla taşınır. Bu taşınım sırasında elektrot ve elektrolit malzemelerindeki iç direnç, elektrik enerjisinin bir kısmının Joule ısısına dönüşmesine ve hücre içinde ısı olarak açığa çıkmasına neden

olur. Çalışmada, hücrelerde üretilen toplam ısı yalnızca Joule ısısı (Eşitlik 2) olarak ele alınmış ve aşağıdaki denklem ile ifade edilmiştir [35-37]:

$$\dot{Q}_{\text{üretim}} = I^2 R \quad (2)$$

Çalışmada, hücrelerde üretilen toplam ısı yalnızca Joule ısısı (Eşitlik 1) olarak ele alınmış ve aşağıdaki denklem ile ifade edilmiştir: Burada I hücre akımını (A), R ise hücre iç direncini (Ω) göstermektedir. Üretilen bu ısı, hücre yüzeyinden çevredeki soğutucu hava akımına taşınım ve iletim (Eşitlik 3) yoluyla aktarılır. Modül genelinde enerji dengesi ise şu şekilde ifade edilmiştir:

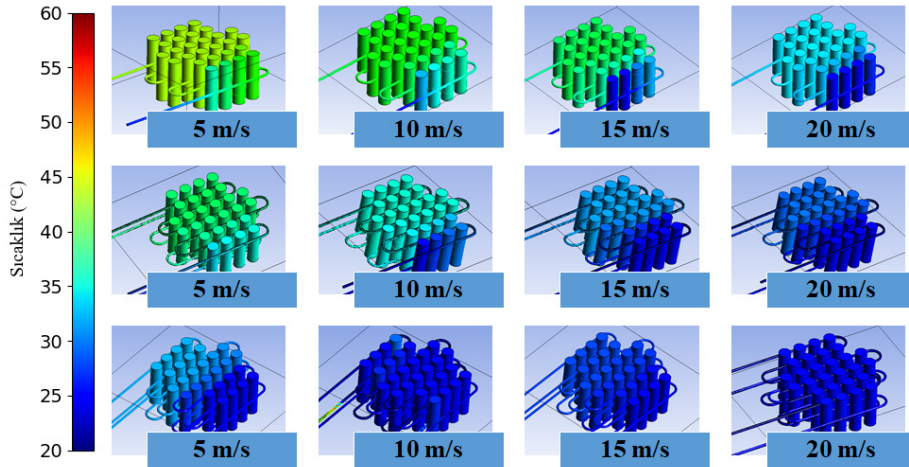
$$\dot{Q}_{\text{üretim}} = \dot{Q}_{\text{taşınım}} + \dot{Q}_{\text{iletim}} + \dot{Q}_{\text{depolama}} \quad (3)$$

Burada $\dot{Q}_{\text{taşınım}}$ taşınım, $\dot{Q}_{\text{iletim}}$ iletim yoluyla uzaklaştırılan ısıyı ve $\dot{Q}_{\text{depolama}}$ ise batarya hücresinde depolanan enerjiyi temsil eder. Bu model, batarya sıcaklığının zamanla değişimini ve soğutma sisteminin etkinliğini değerlendirmek amacıyla uygulanmıştır.

Bu çalışmada, batarya paketinde kullanılan 28 adet (4S7P) için üretilen ısı, hücre başına düşen akım ve iç direnç değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Hücrelerin iç direnci yaklaşık 0.04Ω olarak alınmıştır. Batarya paketi 10 A deşarj akımı ile çalıştırıldığında, paralel bağlı her hücre yaklaşık 1.43 A akım taşımakta ve hücre başına yaklaşık 0.082 W ısı üretmektedir; paket genelinde toplam ısı üretimi yaklaşık 2.3 W olarak belirlenmiştir. Paket deşarj akımı 15 A'ya çıktığında, hücre başına üretilen ısı yaklaşık 0.183 W'a yükselmekte ve toplam paket ısısı yaklaşık 5,1 W olmaktadır. Bu hesaplamalar, ısı borusu destekli hava soğutmalı sistemin etkinliğini değerlendirmek ve hücrelerde oluşan maksimum sıcaklık artışını tahmin etmek amacıyla sayısal simülasyon çalışmalarında kullanılmıştır.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Isı borulu termal yönetim sistemi kullanılarak gerçekleştirilen sayısal ve deneysel analizler sonucunda, hücre yerleşimi ve hava akış yolları belirgin biçimde farklılık gösterdiğinden, geometrik değişikliklerin soğutma performansı üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Oluşturulan düzenek ile hava akışının hücre yüzeylerine teması, akışın yönlendirilmesi ve genel hava sirkülasyonu yeniden değerlendirilmiş; aynı deşarj akımı ve hava akış hızı parametreleri korunarak sayısal ve deneysel çalışmaların karşılaştırmalı analiz yapılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda ilk olarak sayısal simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Batarya paketine ait 1, 2 ve 3 borulu hava soğutma sistemleri ayrı ayrı modellenmiş ve zorlanmış hava akışı altında her bir düzenlemenin termal performansı değerlendirilmiştir. Simülasyon çalışmaları 10 amperlik deşarj akımı altında yürütülmüş olup, 1, 2 ve 3 borulu konfigürasyonlar için 5, 10, 15 ve 20 m/s hava akış hızlarında analizler gerçekleştirilmiştir. Batarya hücreleri arasına simetrik şekilde yerleştirilen bakır borular ile ısı transfer yüzey alanı artırılmış ve bunun soğutma etkinliği üzerindeki etkileri detaylı şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları değerlendirilerek, batarya paketinde farklı boru sayısı ve hava hızlarına bağlı sıcaklık dağılımlarını yansıtmaktadır.



Şekil 4. Isı borulu simülasyon çalışması sonuçları

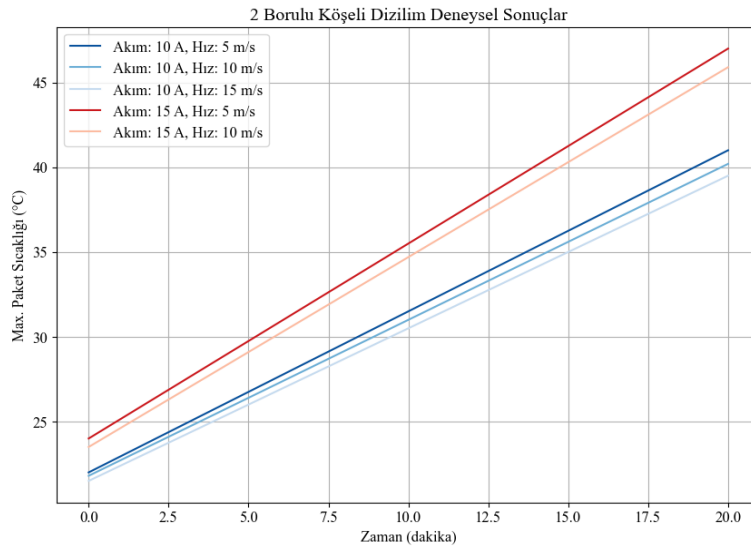
Batarya paketi için gerçekleştirilen sayısal analizlerde (Şekil 4), zorlanmış konveksiyon etkisiyle çalışan hava soğutmalı sistemin performansı, farklı hava akış hızları (5, 10, 15 ve 20 m/s) altında değerlendirilmiştir. Analizler başlangıç ortam sıcaklığının 27 °C olduğu sabit koşulda gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sıcaklık dağılım haritalarına göre:

- Bir borulu sistem, soğutma performansı açısından en zayıf konfigürasyon olarak değerlendirilmiştir. Bu yapıdaki hava akışı, batarya hücrelerinin yalnızca sınırlı bir kısmıyla doğrudan temas edebilmekte ve bu durum, özellikle hücreler arası sıcaklık farklarının artmasına neden olmaktadır. Ayrıca, ilk temastan kaynaklı olarak batarya paketi üzerinde oluşan şok etkisi, ani ve yoğun hava akışı nedeniyle bazı bölgelerde lokal termal streslere yol açmaktadır. Hava hızı 5 m/s olduğunda, sistemin maksimum sıcaklığı yaklaşık 40–44 °C seviyelerinde gerçekleşmiş ve sıcaklık dağılımı dengesiz şekilde ortaya çıkmıştır. Bu durum, başlangıç sıcaklığı 27 °C olan sistemde yaklaşık +13–17 °C' lik bir sıcaklık artışına karşılık gelmekte olup, batarya güvenliği açısından kritik bir seviyedir. Hava hızının 10 m/s'ye yükseltilmesiyle birlikte maksimum sıcaklık 37–42 °C seviyelerine gerilemiş ve soğutma etkisi gözle görülür şekilde artmıştır. 15 m/s hava hızında sıcaklıklar 34–38 °C aralığına düşmüş, 20 m/s hızda ise maksimum sıcaklık yaklaşık 30–36 °C seviyelerine inerek sistem nispeten daha güvenli bir çalışma alanına yaklaşmıştır. Ancak, bu konfigürasyonda hava hızının yükselmesine rağmen sıcaklık dağılımının hâlâ homojen olmadığı ve belirli bölgelerde lokal ısınmaların devam ettiği tespit edilmiştir. Bu da, tek borunun sınırlı temas alanı nedeniyle ısı transfer veriminin düşük kaldığını göstermektedir.
- İki borulu sistemde hava, batarya diziliminin hem alt hem de üst kısmından sağlandığı için, soğutma akışı batarya hücreleriyle daha geniş yüzey alanında temas etmektedir. Bu durum, konvektif ısı transfer katsayısını artırmakta ve hücreler arası sıcaklık farklılıklarını azaltarak daha dengeli bir sıcaklık dağılımı sağlamaktadır. İlk temastan kaynaklı olarak oluşan şok etkisi, hava akışının çift yönlü olması sebebiyle daha geniş alana yayılmakta ve termal stresler dengelenmektedir. 5 m/s hava hızında dahi sistemdeki maksimum sıcaklık 38–42 °C civarına düşmüş, tek borulu sisteme göre yaklaşık 10 °C' lik bir iyileşme sağlanmıştır. Bu iyileşme, hava akışının iki yönlü olması sayesinde batarya hücrelerinin daha etkin soğutulduğunu göstermektedir. 10 m/s hızda sıcaklıklar 33–36 °C seviyelerine gerilemiş ve sistem güvenli çalışma koşullarına daha da yaklaşmıştır. 15 m/s hızda sıcaklıklar 30–34 °C, 20 m/s'de ise 29–32 °C seviyelerinde sabitlenmiştir. Bu hızda, batarya hücrelerinin tamamına yakın bir bölgesinde sıcaklıklar başlangıç değerine oldukça yakın değerlere ulaşmıştır. Ayrıca, bu konfigürasyonda sıcaklık dağılımı homojenleşmiş, lokal ısınma bölgeleri büyük ölçüde ortadan kalkmıştır. İki borulu sistem, fan gücü ile birlikte düşünüldüğünde verimlilik açısından önemli bir avantaj sunmaktadır.
- Üç borulu sistem, soğutma havasını batarya paketine üç farklı noktadan yönlendirerek en geniş temas alanını sağlamaktadır. Bu yapı sayesinde konvektif soğutma daha homojen dağılmakta ve sıcaklık farkları minimum düzeye inmektedir. İlk temastan kaynaklanan şok etkisi, hava akışının çoklu giriş noktalarıyla dağıtılması sonucu minimize edilmekte, böylece batarya yüzeyinde termal stresler en aza indirgenmektedir. 5 m/s hava hızında dahi sistem maksimum sıcaklığı 35–38 °C arasında kalmış, bu değer tek borulu sistemde 10 m/s hızla elde edilen değerlerle neredeyse eşdeğer olmuştur. Bu sonuç, üç borulu sistemin düşük hızlarda bile oldukça etkili bir soğutma gerçekleştirebildiğini göstermektedir. 10 m/s hava hızında batarya hücre sıcaklıkları 30–32 °C seviyesine inerken, 15 m/s hızda sıcaklıkların 28–30 °C civarına gerilediği ve sıcaklık dağılımının oldukça homojen hale geldiği gözlemlenmiştir. 20 m/s hızda ise sistemin genel sıcaklığı 27–28 °C seviyesine kadar düşmüş, yani ortam sıcaklığına oldukça yakın bir değer elde edilmiştir. Bu durumda batarya hücrelerinin tamamında minimum termal stres oluşmuş ve paket, en ideal sıcaklık koşullarında çalışmaya devam etmiştir. Bu yapı, özellikle düşük hızlarda dahi yüksek soğutma performansı sağladığı için enerji verimliliği açısından da tercih edilebilir bir konfigürasyon olarak öne çıkmaktadır.

Sayısal analizlerden elde edilen bulgular, özellikle 2 borulu soğutma konfigürasyonunun belirli hava hızlarında etkin bir termal performans sergilediğini ve batarya hücreleri arasında daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağladığını ortaya koymuştur. Bu doğrultuda, deneysel çalışmalar yalnızca 2 borulu sistem üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu tercih, hem sayısal analiz sonuçlarının deneysel olarak doğrulanması hem de uygulamaya yönelik en verimli ve uygulanabilir çözümün detaylı şekilde incelenmesi amacıyla yapılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında, batarya paketine uygun özel bir test düzeneği oluşturulmuştur. Bu düzende, batarya hücrelerinin yalnızca bir yüzeyiyle temas edecek şekilde iki adet bakır ısı borusu

yerleştirilmiştir. Geometrik yerleşim gereği, ısı borularından biri dizilimin alt, diğeri ise üst kısmına konumlandırılmış; böylece hücrelerin karşılıklı yüzeyleri üzerinden çift taraflı ve çift yönlü bir soğutma sağlanmıştır. Bu yerleşim, her ne kadar sınırlı bir temas yüzeyi sunsa da, hava akışının yönlendirilmiş şekilde uygulanması sayesinde sıcaklık dağılımlarının gözlemlenebilir düzeyde kontrol altına alınmasına olanak tanımıştır. Isı borularının yüksek termal iletkenlik özellikleri sayesinde, belirli konfigürasyonlarda anlamlı düzeyde sıcaklık düşüşleri elde edilmiştir. Ancak, bazı durumlarda boru yerleşiminden kaynaklanan geometrik kısıtlar nedeniyle ısı yayılım sınırlı kalmış ve ısı transfer etkinliğinde düşüşler gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, ısı borularının yerleşimi ve hücrelerle temas yüzeyleri dikkate alınarak iki farklı senaryo değerlendirilmiş ve bu senaryoların termal performans üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak analiz edilmiştir.

Soğutma performansının değerlendirilmesi amacıyla, deneysel düzende farklı hava akış hızlarında testler gerçekleştirilmiştir. 10 A sabit deşarj akımı altında, ısı borularına sırasıyla 5 m/s, 10 m/s ve 12 m/s hızlarında hava akışı uygulanmış ve sıcaklık dağılımları hassas sıcaklık sensörleriyle izlenmiştir. Daha yüksek bir termal yük senaryosu oluşturmak amacıyla 15 A deşarj akımı altında ise, 5 m/s ve 10 m/s olmak üzere iki farklı hava akışı hızı kullanılarak sistemin sıcaklık tepkisi analiz edilmiştir. Elde edilen deneysel veriler, sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, 2 borulu soğutma sisteminin uygun yerleşim stratejileriyle birlikte hem maksimum sıcaklık değerlerinin azaltılmasına hem de sıcaklık dağılımının homojenleştirilmesine anlamlı katkılar sağladığı açıkça ortaya konmuştur. Böylece, hem sayısal hem deneysel çalışmaların bütüncül değerlendirilmesi sonucunda, 2 borulu konfigürasyonun optimum yerleşim koşulları altında yüksek termal kararlılık sağlayabileceği doğrulanmıştır.



Şekil 5. Isı borulu deneysel çalışma sonuçları

İki borulu konfigürasyonuna ait deneysel çalışmalarda elde edilen maksimum batarya paketi sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi gösterilmektedir. Çalışma kapsamında, iki farklı deşarj akımı (10 A ve 15 A) ve üç farklı hava hızı (5 m/s, 10 m/s, 15 m/s) altında sıcaklık değişimleri 20 dakika boyunca izlenmiştir. Deney sonuçlarına göre, batarya paketi sıcaklığı zamanla doğrusal olarak artış göstermektedir. Bu durum, belirli bir süre boyunca sistemin termal kararlılığa ulaşmadığını ve ısı birikiminin devam ettiğini göstermektedir. Özellikle 15 A deşarj akımı uygulanan testlerde (kırmızı tonlu eğriler), başlangıçtan itibaren daha yüksek sıcaklık artış oranları gözlemlenmiş, bu da akım şiddetinin batarya hücrelerinde oluşan ısı üretimini üzerinde belirleyici bir faktör olduğunu doğrulamıştır. 10 A akımı altında yapılan deneylerde, hava hızının artırılmasıyla sıcaklık eğimlerinin belirgin şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. 5 m/s hava hızında maksimum sıcaklık yaklaşık 43 °C, 10 m/s'de yaklaşık 40 °C, 15 m/s'de ise yaklaşık 38 °C seviyelerinde sınırlanmıştır. Bu durum, hava hızının artmasıyla birlikte konvektif ısı transfer katsayısının arttığını ve dolayısıyla batarya paketinden çevreye aktarılan ısı daha etkin şekilde uzaklaştırıldığını ortaya koymaktadır. 15 A akımı altında ise 5 m/s hızda maksimum sıcaklık 20. dakikada yaklaşık 47 °C seviyelerine ulaşmış, bu değer 10 m/s hızda yaklaşık 44 °C seviyelerine düştüğü gözlemlenmiştir. Her iki durumda da, yüksek akım nedeniyle oluşan ısı yükünün daha fazla olduğu ve buna bağlı olarak hava hızındaki artışın daha sınırlı bir soğutma etkisi sağladığı değerlendirilmiştir.

4. SONUÇLAR

Batarya paketinin termal yönetimi, boru sayısı ve hava akış hızına direkt bağlıdır. Tek borulu konfigürasyonda hava akışının sınırlı olmasından kaynaklı sıcaklık dengesiz dağılmış ve hücreler arası sıcaklık farkı yüksek seviyelere ulaşmıştır. İki borulu konfigürasyonda, alt ve üst kısımlardan sağlanan hava ile merkez bölgelerdeki sıcaklık farklarını azaltmakta, 10 m/s hava akış hızına yaklaşık 5 °C, 20 m/s hava akış hızında 3,5 °C'ye düşürmektedir. Üç borulu sistem ise hava akışını üç noktadan sağlayarak iç bölgelerdeki durgunluğu minimize etmekte ve sıcaklık dağılımını daha homojen hâle getirmektedir.

Hava akış hızının artırılması, özellikle 10 A deşarj akımı şartları altında termal performansı önemli ölçüde iyileştirmektedir. 15 A akımlarda ise batarya hücrelerinin ısı üretimi iyice artmakta ve mevcut soğutma sistemi kapasitesine yaklaşmaktadır.

Elde edilen bulgular, BTMS' de etkin performansın boru sayısı ve hava akış hızının optimize edilmesine bağlı olduğunu göstermektedir. Üç borulu sistemler, düşük hava hızlarında bile kabul edilebilir sıcaklık homojenliği sağladığı fakat uygulamada montaj karmaşıklığı, boru yerleşimi ve hava kaçağı risklerine dikkat edilmelidir. Bu sebeple, tasarım aşamasında sistemin sadeliği ve sistemi destekleyici yapısal çözümler göz önünde bulundurulmalıdır.

Sonuç olarak, çalışmada iki ve üç borulu hava soğutma sistemlerinin tek borulu sisteme kıyasla yüksek termal performans sunduğunu ve optimizasyon ile batarya paketlerinin güvenli, verimli ve uzun ömürlü çalışmasının sağlanabileceğini göstermektedir. Gelecek çalışmalar, ek pasif/aktif soğutma elemanları, geometrik düzenlemeler ve farklı akışkanlar ile daha verimli termal yönetim stratejileri geliştirmeye odaklanabilir. Bu bağlamda, elektrikli araçlara uygulanabilirlik ve ileriye yönelik çalışmalar şu şekilde özetlenebilir:

- Boru sayısı, yerleşim geometrisi ve hava akış yönünün çok amaçlı optimizasyonu yapay zekâ veya genetik algoritma teknikleri kullanılarak araştırılabilir.
- Hava soğutmalı sistemlerin, faz değiştiren malzemeler veya sıvı soğutmalı hibrit sistemlerle entegrasyonu incelenerek yüksek akım koşullarında performans karşılaştırmaları yapılabilir.
- Fan yerleşimi, hız kontrol stratejileri ve enerji tüketimi parametreleri bir bütün olarak değerlendirilip akıllı kontrol tabanlı tasarımlar geliştirilebilir.
- Deneysel çalışmalar, farklı çevresel koşullar (örneğin sıcak/soğuk ortam sıcaklığı, nem, basınç) altında gerçekleştirilerek sistemin dayanım ve kararlılığı değerlendirilebilir.

Gerçek araç uygulamalarına yönelik prototip tasarımlar geliştirilip montaj kolaylığı, bakım erişimi ve maliyet analizi yönlerinden uygulanabilirlik incelenebilir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, yazarın doktora tezinin bir parçası olup, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Doktora Burs Programı (Başvuru No: 1649B032205256) kapsamında desteklenmiştir. Ayrıca çalışma, Batman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından BTÜBAP-2022-Doktora-04 numaralı proje ile mali olarak desteklenmiştir. Sağlanan katkılar için TÜBİTAK'a ve Batman Üniversitesi'ne teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR

1. Kartal, M.T. (2022). The role of consumption of energy, fossil sources, nuclear energy, and renewable energy on environmental degradation in top-five carbon producing countries. *Renewable Energy*, 184, 871-880.
2. Herzog, A.V., Lipman, T.E. & Kammen, D.M. (2000). *Renewable Energy Sources*. Energy and Resources Group. University of California, Berkeley, USA
3. Alkan, Ö. & Albayrak, Ö.K. (2020). Ranking of renewable energy sources for regions in Turkey by fuzzy entropy based fuzzy COPRAS and fuzzy MULTIMOORA. *Renewable Energy*, 162, 712-726.

4. Alrwashdeh, S.S. (2022). Energy sources assessment in Jordan. *Results in Engineering*, 13, 100329.
5. Lahnaoui, A., Wulf, C., Heinrichs, H. & Dalmazzone, D. (2018). Optimizing hydrogen transportation system for mobility by minimizing the cost of transportation via compressed gas truck in North Rhine-Westphalia. *Applied Energy*, 223, 317-328.
6. Erdoğan, B., Tan, A. & Tümay, M. (2024). Elektrikli araçlarda kullanılan batarya şarj uygulamaları için genetik algoritma ile geliştirilmiş bir rezonans dönüştürücü tasarımı. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(4), 1129-1142.
7. Karadöl, İ., Baltacı, U.S. & Keçecioglu, Ö.F. (2024). Rüzgâr enerji santralleri rampa oranı: Türkiye örneği. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(3), 797-811.
8. Zhu, W. H., Zhu, Y. & Tatarchuk, B.J. (2014). Self-discharge characteristics and performance degradation of Ni-MH batteries for storage applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(34), 19789-19798.
9. Front Matter. (2021). In *Uncertainties in Modern Power Systems* [Internet]. Elsevier. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978012820491701001X>, Erişim tarihi: 22.03.2025.
10. Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S. & Ebrahimi, K (2018). *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles* (3rd ed.). CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/books/9780429504884>, Erişim tarihi: 22.03.2025.
11. Han, X., Ouyang, M., Lu, L. & Li, J. (2014). A comparative study of commercial lithium-ion battery cycle life in electric vehicle: Capacity loss estimation. *Journal of Power Sources*, 268, 658-669.
12. Wei, Y. & Agelin-Chaab, M. (2019). Development and experimental analysis of a hybrid cooling concept for electric vehicle battery packs. *Journal of Energy Storage*, 25, 100906.
13. Natkunarajah, N., Scharf, M. & Scharf, P. (2015). Scenarios for the return of lithium-ion batteries out of electric cars for recycling. *Procedia CIRP*, 29, 740-745.
14. Bulut, M. & Sözbir, N. (2022). Modeling and analysis of battery thermal control in a geostationary satellite. *Sakarya University Journal of Science*, 26(4), 666-676.
15. Li, Y., Chen, M., Bai, F., Song, W. & Feng, Z. (2019). Thermal equilibrium characteristic of large-size lithium-ion pouch battery: Resting time between charge and discharge. *Energy Procedia*, 158, 2623-2630.
16. Bai, F.-F., Chen, M.-B., Song, W.-J., Li, Y. & Feng, Z.-P. (2019). Thermal performance of pouch lithium-ion battery module cooled by phase change materials. *Energy Procedia*, 158, 3682-3689.
17. Baran, V., Mühlbauer, M.J., Schulz, M. & Pfanztel, J. (2019). In operando studies of rotating prismatic Li-ion batteries using neutron diffraction. *Journal of Energy Storage*, 24, 100772.
18. Wu, W., Wu, W. & Wang, S. (2018). Thermal management optimization of a prismatic battery with shape-stabilized PCM. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 121, 967-977.
19. Panchal, S., Dincer, I., Agelin-Chaab, M., Fraser, R. & Fowler, M. (2016). Experimental temperature distributions in a prismatic lithium-ion battery at varying conditions. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 71, 35-43.
20. Mastali, M., Foreman, E., Modjtahedi, A., Samadani, E., Amirfazli, A. & Farhad, S. (2018). Electrochemical-thermal modeling of LiFePO₄ pouch batteries. *International Journal of Thermal Sciences*, 129, 218-230.
21. Huang, Y., Lu, Y., Huang, R., Chen, J., Chen, F. & Liu, Z. (2017). Study on thermal interaction and heat dissipation of cylindrical lithium-ion cells. *Energy Procedia*, 142, 4029-4036.
22. Abdulvahitoğlu, A., Abdulvahitoğlu, A. & Kılıç, M. (2022). Elektrikli araç bataryalarının bütünleşik SWARA-TOPSIS metodu ile değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(4), 1061-1076.
23. Conte, F.V. (2006). Battery and battery management for hybrid electric vehicles: A review. *Elektrotech Inftech*, 123(10), 424-431.
24. Li, W., Chen, S., Peng, X., Xiao, M., Gao, L. & Garg, A. (2019). Clustering of similar-performance cells for lithium-ion EV battery module design. *Engineering*, 5(4), 795-802.
25. Fan, L., Khodadadi, J.M. & Pesaran, A.A. (2013). A parametric study on air-cooled Li-ion battery modules. *Journal of Power Sources*, 238, 301-312.
26. Zhang, Z., Wang, J., Feng, X., Chang, L., Chen, Y. & Wang, X. (2018). Solutions to EV air conditioning systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 443-463.
27. Li, Z., Huang, J., Liaw, B. Y., Metzler, V. & Zhang, J. (2014). A review of lithium deposition in Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 254, 168-182.
28. Mustafa, J. (2022). Effect of inlet/outlet size and battery spacing on cooling of Li-ion pack and using outlet air for HVAC. *Journal of Energy Storage*, 46, 103826.

29. Hasan, H.A., Togun, H., Mohammed, H.I., Abed, A.M. & Homod, R.Z. (2023). CFD simulation of spacing effect between Li-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 72, 108631.
30. Zhang, S.-B., Nie, F., Cheng, J.-P., Yang, H. & Gao, Q. (2024). Optimizing airflow for air-cooled Li-ion battery pack. *Applied Thermal Engineering*, 236, 121486.
31. Alihosseini, A. & Shafae, M. (2021). Experimental and numerical study of Li-ion battery cooling using heat pipe. *Journal of Energy Storage*, 39, 102616.
32. Ren, R., Zhao, Y., Diao, Y. & Liang, L. (2023). Bottom liquid cooling for Li-ion battery with multichannel flat tube. *Applied Thermal Engineering*, 219, 119636.
33. Çengel, Y. A., Boles, M. A. & Kanoglu, M. (2019). *Thermodynamics: An Engineering Approach* (9th ed.). McGraw-Hill Education.
34. Keleş, H. & Özmen, Y. (2024). 45° eğimli ikincil jetlere sahip jet dizilerinde ısı transferi incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(4), 923-937.
35. Fan, Y., Bao, Y., Ling, C., Chu, Y., Tan, X. & Yang, S. (2019). Experimental study on air cooling for high-energy cylindrical Li-ion batteries. *Applied Thermal Engineering*, 155, 96-109.
36. Rao, Z. & Wang, S. (2011). A review of power battery thermal energy management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4554-4571.
37. Malik, M., Dincer, I., Rosen, M.A., Mathew, M. & Fowler, M. (2018). Thermal and electrical performance of liquid-cooled Li-ion battery pack. *Applied Thermal Engineering*, 129, 472-481.

Değişken Kesitli Eksenel Fonksiyonel Derecelenmiş Eliptik Kirişlerin Serbest Titreşim Analizi

Timuçin Alp ASLAN^{1,a}

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-7558-3568

Makale Bilgileri

Geliş : 22.09.2025

Kabul : 03.11.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1789319

Sorumlu Yazar

Timuçin Alp ASLAN

taslan@cu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Eksenel fonksiyonel derecelenmiş

Eliptik kiriş

Serbest titreşim analizi

Tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemi

Laplace uzayı

Auf şekli: ASLAN, T.A., (2025). Değişken Kesitli Eksenel Fonksiyonel Derecelenmiş Eliptik Kirişlerin Serbest Titreşim Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(4), 867-874.

ÖZ

Bu çalışmada Eksenel Fonksiyonel Derecelenmiş (EFD) eliptik kirişlerin düzlem içi titreşim davranışı araştırılmıştır. Kayma deformasyon etkisinin göz önünde bulundurulduğu analizlerde eliptik kiriş, uzunluğu boyunca değişken kesite sahiptir. Elde edilen kanonik denklemler Laplace uzayında Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yöntemi (TFY) ile çözülmüştür. Fortran dilinde bir bilgisayar programı hazırlanarak sınır koşullarının, minimum yarıçapın ve malzeme değişim katsayısı serbest titreşim davranışı üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen frekans değerleriyle ANSYS sonuçlarının uyum içerisinde olduğu görülmüş ve önerilen yöntemin doğruluğu ve güvenilirliği ortaya konmuştur.

Free Vibration Analysis of Axially Functionally Graded Elliptical Beams with Variable Cross Section

Article Info

Received : 22.09.2025

Accepted : 03.11.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1789319

Corresponding Author

Timuçin Alp ASLAN

taslan@cu.edu.tr

Keywords

Axial functionally graded

Elliptical beams

Free vibration analysis

Complementary functions method (CFM)

Laplace domain

How to cite: ASLAN, T.A., (2025). Free Vibration Analysis of Axially Functionally Graded Elliptical Beams with Variable Cross Section. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(4), 867-874.

ABSTRACT

In this study, the in-plane vibration behavior of Axially Functionally Graded (AFG) elliptical beams is investigated. The elliptical beam has a variable cross-section along its length in the analyses where the shear deformation effect is considered. The obtained canonical equations are solved in the Laplace domain by the Complementary Functions Method (CFM). A computer program in Fortran language is prepared, and the effects of boundary conditions, minimum radius of elliptical beam, and material gradient index on the free vibration behaviour are studied in detail. It is seen that the ANSYS results are in harmony with the obtained frequency values, and the accuracy and reliability of the proposed method are demonstrated

1. GİRİŞ

Mühendislik ihtiyaçları doğrultusunda, yapısal mukavemetin artırılması ve malzeme kullanımının optimize edilmesi ortaya çıkmaktadır. Bu kapsamda, mekanik özellikleri sürekli değişen FD malzemeler mühendislik uygulamaları için yenilikçi çözümler sunmaktadır. Eliptik kemer geometrisi geniş açıklık geçme, yük dağılımını iyileştirme ve rijitliği artırma gibi avantajlar sağlarken; FD malzeme kullanımı ise stres konsantrasyonlarını azaltarak yapı ömrünü uzatmakta ve malzeme verimliliğini artırmaktadır. Bu tür yapısal elemanlar, köprü, tünel, sanayi yapıları ve enerji tesisleri gibi yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Bu nedenle eliptik kirişlerin serbest titreşim ve dinamik davranışının incelenmesi önem arz etmektedir.

Oh ve arkadaşları [1] eliptik kemerlerin serbest titreşim analizi üzerine çalışmalar gerçekleştirmiş ve bunları laboratuvar çalışmaları ile desteklemişlerdir. Nieh ve arkadaşları [2] eliptik kirişlerin titreşim davranışını analitik yöntemle araştırmışlardır. Mike [3] değişken kesite sahip eğri eksenli çubukların serbest titreşim frekanslarını matrikant yöntemiyle bulmuştur. Rajasekaran [4] diferansiyel dönüşüm yöntemini kullanarak FD eliptik kirişlerin serbest titreşim analizlerini gerçekleştirmiştir. Tsiatas ve Charalampakis [5] diferansiyel evrim yöntemini kullanarak EFD kemerlerin frekanslarını analiz etmişlerdir. Huynh ve arkadaşları [6] EFD eliptik kirişlerin titreşim analizini izogeometrik yöntemini kullanarak incelemişlerdir. Jin ve arkadaşları [7] spektral örnekleme yüzey yöntemini kullanarak eğri eksenli kirişlerin frekanslarını belirlemişlerdir. Zhang ve Wang [8], FD eğri eksenli kirişlerin serbest titreşim analizini, Mori-Tanaka yöntemi ile modifiye Fourier serisi yaklaşımına dayalı olarak gerçekleştirmiştir. Yang ve arkadaşları [9] farklı kiriş teorilerini kullanarak eliptik kemerlerin serbest titreşim davranışını ortaya koymuşlardır. Eroğlu ve Tüfekçi [10] sonlu elemanlar yöntemini (SEY) kullanarak eliptik kirişlerin titreşim analizini incelemişlerdir. Noori ve arkadaşları [11-13] eğri eksenli kirişlerin serbest titreşim analizi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Wan ve arkadaşları [14] değişken eğriliklere sahip FD Timoshenko kirişlerin statik analizini gerçekleştirmişlerdir. Qin ve arkadaşları [15], farklı sınır koşullarına sahip eğri eksenli kompozit kirişlerin serbest titreşim davranışlarını araştırmışlardır. Wang ve arkadaşları [16] kompozit eliptik kirişlerin titreşim analizini Timoshenko kiriş teorisi çerçevesinde gerçekleştirmişlerdir. Aydoğan ve arkadaşları [17] ANSYS programı aracılığıyla eliptik kirişlerin doğal titreşim frekanslarını bulmuşlardır. Ermis ve arkadaşları [18] karışık SEY kullanarak EFD eliptik kirişlerin serbest titreşim karakteristiklerini araştırmışlardır. Luo ve arkadaşları [19] Euler-Bernoulli eğri kirişin dinamik analizini gerçekleştirmiştir. Mohanty ve arkadaşları [20] eğri çubukların serbest titreşim analizini ANSYS yardımıyla gerçekleştirmiş ve sonuçları deneysel yöntemle birlikte vermişlerdir. EFD kirişinin frekanslarını ve mod şekillerini belirlemek için Lee ve arkadaşları [21] tarafından sayısal çözüm tekniği önerilmiştir. Nguyen [22] ve Nguyen ve arkadaşları [23] FD gözenekli ve FD sandviç eğri eksenli kirişleri analiz etmek için Ritz yöntemini kullanmışlardır. Jafari-Talookolaei ve arkadaşları [24] kompozit eğri eksenli kirişin serbest titreşimlerini analiz etmek için yeni bir matematiksel modelleme kullanmışlardır.

Yapılan literatür incelemesi sonucunda, değişken kesitli EFD eliptik kirişlerin serbest titreşim analizinin Laplace uzayında TFY kullanılarak gerçekleştirildiği herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle, mevcut çalışma bu alandaki boşluğu doldurmayı amaçlamakta olup, sınır koşullarının, minimum yarıçapın ve malzeme değişim katsayısının değişken kesitli EFD eliptik kirişlerin serbest titreşim davranışı üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

2. YÖNTEM

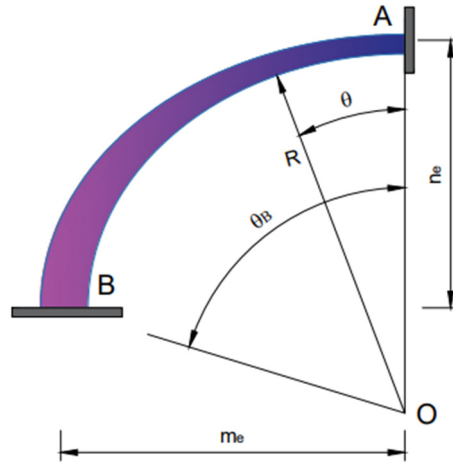
Şekil 1’de gösterilen değişken kesitli EFD düzlem eliptik kiriş, geometrisi ve malzeme özelliklerinin fonksiyonel değişkenliği dikkate alınarak modellenmiştir.

Eliptik kirişin malzeme değişim fonksiyonu (Elastisite modülü, E , kütleli yoğunluk, ρ , ve poisson oranı, ν) Eşitlik 1’de, kesit değişim fonksiyonu ise Eşitlik 2’de verilmektedir.

$$P(x) = (P_A - P_B) \left(1 - \frac{\theta}{\theta_B}\right)^{nz} + P_B \quad (1)$$

$$h(\theta) = h(0) * \left(1 + \frac{2\theta}{\pi}\right) \quad (2)$$

Burada P_A ve P_B sırasıyla metal ve seramiğin malzeme özellikleridir. Kirişin malzemesi $\theta = 0$ da metal $\theta = \theta_B$ de seramik olarak kabul edilmektedir. n_z malzeme değişim katsayısıdır.



Şekil 1. Değişken kesitli EFD eliptik kiriş

Düzlemi içinde yüklü çubukların dinamik davranışını idare eden diferansiyel denklemlerin kanonik formu Eşitlik (3-8)'de verilmektedir.

$$\frac{\partial U_t}{\partial \theta} = U_n + r_e \frac{T_t}{E(\theta)A(\theta)} \quad (3)$$

$$\frac{\partial U_n}{\partial \theta} = -U_t + r_e \Omega_b + r_e \frac{T_n \alpha_n}{G(\theta)A(\theta)} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Omega_b}{\partial \theta} = r_e \frac{M_b}{E(\theta)I_b(\theta)} \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_t}{\partial \theta} = r_e \rho(\theta) A(\theta) \frac{d^2 U_t}{dt^2} + T_n - r_e p_t \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_n}{\partial \theta} = r_e \rho(\theta) A(\theta) \frac{d^2 U_n}{dt^2} - T_t - r_e p_n \quad (7)$$

$$\frac{\partial M_b}{\partial \theta} = r_e \rho(\theta) I_b(\theta) \frac{d^2 \Omega_b}{dt^2} - r_e T_n - r_e m_b \quad (8)$$

Burada U_t ve U_n yer değiştirmenin teğetsel ve normal, Ω_b ise dönmenin bileşenidir. T_t ve T_n iç kuvvetlerin teğetsel ve normal bileşenleri, M_b ise eğilme momentidir. α_n , $G(\theta)$, $A(\theta)$, $I_b(\theta)$, p_t , p_n , m_b sırasıyla kayma düzeltme faktörünü, kayma modülünü, kesit alanını, atalet momentini, dış yayılı yükleri ve momentini ifade etmektedir.

Eliptik kemerin eğrilik yarıçapı $re = \frac{m_e^2 n_e^2}{\sqrt{(m_e^2 \sin^2 \theta + n_e^2 \cos^2 \theta)^3}}$ şeklindedir [16].

Değişken kesitli EFD eliptik kirişlerin davranışını idare eden eşitliklerin (3-8) Laplace dönüşümü alınırsa, kısmi diferansiyel denklemler cebrik denklem takımı haline dönüşmektedir. Laplace uzayında EFD çubukların dinamik davranışını ifade eden adi diferansiyel denklem takımı kanonik formda Eşitlik (9-14)'de sunulmuştur.

$$\frac{d \bar{U}_t}{d \theta} = \bar{U}_n + r_e \frac{\bar{T}_t}{E(\theta)A(\theta)} \quad (9)$$

$$\frac{d \bar{U}_n}{d \theta} = -\bar{U}_t + r_e \bar{\Omega}_b + r_e \frac{\bar{T}_n \alpha_n}{G(\theta)A(\theta)} \quad (10)$$

$$\frac{d \bar{\Omega}_b}{d \theta} = r_e \frac{\bar{M}_b}{E(\theta)I_b(\theta)} \quad (11)$$

$$\frac{d\bar{T}_t}{d\theta} = r_e z^2 \rho(\theta) A(\theta) \bar{U}_t + \bar{T}_n - r_e \bar{p}_t \quad (12)$$

$$\frac{d\bar{T}_n}{d\theta} = r_e z^2 \rho(\theta) A(\theta) \bar{U}_n - \bar{T}_t - r_e \bar{p}_n \quad (13)$$

$$\frac{d\bar{M}_b}{d\theta} = r_e z^2 \rho(\theta) I_b(\theta) \bar{\Omega}_b - r_e \bar{T}_n - r_e \bar{m}_b \quad (14)$$

Üst çizgi ($\bar{}$) ile gösterilen terimler, ilgili büyüklüklerin Laplace dönüşümünü ifade eder. Kompleks bir değişken olan Laplace parametresi z , serbest titreşim analizlerinde $z = i\omega$ dönüşümüyle tanımlanır. Bu analizlerde dış yükler sıfır alınarak, katsayılar matrisinin determinantını sıfırlayan değerler doğal frekansları verir. Frekans uzayında elde edilen diferansiyel denklemler, Runge-Kutta 5 (RK5) algoritması kullanılarak TFY yöntemi ile sayısal olarak çözülmektedir [25,26].

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışmada, çeşitli malzeme değişim katsayılarına, farklı minimum yarıçap uzunluklarına ve çeşitli sınır şartlarına (Çizelge 1) sahip EFD eliptik kirişlerin serbest titreşim frekansları sayısal olarak incelenmiştir. Eliptik kiriş için kesit ve malzeme özelliklerinin değişimi eksenel doğrultuda fonksiyonel olarak dikkate alınmıştır. Sayısal çözüm süreci, Laplace uzayında TFY kullanılarak yürütülmüş ve bu amaçla Fortran programlama diliyle özel bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Elde edilen bulgular, çeşitli parametrelerin sistemin serbest titreşim davranışı üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla çizelgeler hâlinde sunulmuş ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 1. Analizlerde kullanılan sınır şartları

Ankastre uç (A)	$U_t = U_n = \Omega_n = 0$
Sabit-Basit uç (B)	$U_t = U_n = M_b = 0$
Serbest uç (S)	$T_t = T_n = M_b = 0$

Yapılan parametrik analizlerde, modelin tanımlanmasında ve sayısal hesaplamaların gerçekleştirilmesinde, Çizelge 2’de sunulan malzeme özellikleri esas alınmıştır.

Çizelge 2. Analizlerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

Malzeme	E (Gpa)	ρ (kg/m³)	ν
Metal (P_A)	320.24	4429	0.2981
Seramik (P_B)	105.7	3750	0.26

Analizlerde kullanılan eliptik kirişin geometrik özellikleri aşağıda sunulmuştur.

Eliptik kirişin maksimum yarıçapı 10 m. dir.

Kesit yarıçapı, $h(0) = 0.25$ m olmak üzere kesit alanı ise

$A(\theta) = \pi * h(\theta)^2$ olarak hesaplanmaktadır.

Eğilme rijitliği $I_b(\theta) = \pi * \frac{h(\theta)^4}{4}$ ve

Kayma düzeltme faktörü 1.11 olarak alınmıştır.

3.1. Doğrulama Analizi

İlk olarak, önerilen yöntemin doğruluğunu ve geçerliliğini değerlendirmek amacıyla, A–S ve A–A sınır koşullarına sahip, minimum yarıçapı 7.5 m olan, sabit kesitli bir eliptik kiriş ele alınmıştır. Karşılaştırma yapmak üzere, aynı kiriş ANSYS [27] programında üç düğümlü BEAM189 elemanı kullanılarak modellenmiş ve yapı 20 elemana bölünmüştür. EFD eliptik kirişlerin BEAM189 sonlu elemanı ile

çözümlemesi için, kullanılan malzeme fonksiyonu için daha önce Excel üzerinde hazırlanmış 20 eleman için malzeme kodları ANSYS programına tanıtılmıştır. Malzeme değişim katsayısı ($nz = 0$ ve 2) için önerilen yöntemle elde edilen doğal frekans değerleri, ANSYS analizlerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve bulgular Çizelge (3–4)’te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Çizelge 3. A-S sınır koşullarına sahip eliptik kirişe ait karşılaştırmalı frekans değerleri (Hz.)

nz	0			2		
Mod	ANSYS	TFY	FARK (%)	ANSYS	TFY	FARK (%)
1	1.875	1.875	0.00	3.239	3.175	1.98
2	9.107	9.107	0.00	14.935	14.408	3.53
3	27.211	27.219	0.03	43.029	41.424	3.73
4	55.506	55.530	0.04	86.775	83.570	3.69
5	91.758	91.789	0.03	143.413	138.205	3.63

Çizelge 4. A-A sınır koşullarına sahip eliptik kirişe ait karşılaştırmalı frekans değerleri (Hz.)

nz	0			2		
Mod	ANSYS	TFY	FARK (%)	ANSYS	TFY	FARK (%)
1	27.354	27.367	0.05	41.664	40.255	3.39
2	48.568	48.596	0.06	74.249	71.398	3.84
3	83.372	83.3956	0.03	124.027	119.281	3.83
4	94.405	94.48240	0.08	144.569	139.516	3.50
5	142.963	143.0899	0.09	218.271	210.771	3.43

Malzeme değişim katsayısının 0 olduğu durumda (yani homojen kiriş), ANSYS ve TFY yöntemleri arasında son derece yüksek bir uyum mevcuttur. Beş modun tamamında fark %0.09’ın altındadır. Bu durum, önerilen sayısal yöntemin doğruluğunu ve güvenilirliğini açık biçimde göstermektedir. Malzeme değişim katsayısı 2’ye çıkarıldığında, TFY yöntemiyle elde edilen doğal frekanslar ANSYS sonuçlarına göre %1.98–3.84 aralığında daha düşük çıkmıştır. Bu fark, malzeme gradyanındaki değişim nedeniyle malzeme özelliklerinin eksenel yönde sürekli olarak değişmesi ve buna bağlı olarak sistemin etkin rijitliğinin farklı şekilde modellenmesinden kaynaklanmaktadır. Elde edilen değerler, EFD eliptik kirişlere ait serbest titreşim frekanslarının belirlenmesinde etkin bir şekilde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

3.2. Farklı Parametrelerin Serbest Titreşim Davranışına Etkisi

Bu bölüm kapsamında, kesit değişimi, malzeme değişim katsayısı, minimum yarıçap uzunluğu ve sınır şartları gibi parametrelerin, EFD eliptik kirişlerin serbest titreşim frekansları üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak irdelenmiş ve değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, her bir parametrenin sistemin dinamik davranışı üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymak amacıyla, ilgili alt başlıklar altında sunulmuştur.

3.2.1. Kesit Değişiminin Etkisi

Malzeme değişim katsayısı 5 olan eliptik kirişler üzerinde yapılan analizlerde, kesit değişiminin serbest titreşim frekansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda, farklı sınır şartlarına (B–B ve A–B) sahip, minimum yarıçapı 7.5 m olan EFD eliptik kirişler ele alınmış; bu kirişler hem sabit hem de değişken kesitli olarak modellenmiştir. Her bir durumda doğal frekans değerleri hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar, kesit özelliklerinin sistemin titreşim karakteristikleri üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak ortaya koymak amacıyla Çizelge 5’de verilmiştir.

Çizelge 5. A-A sınır koşullarına sahip eliptik kirişe ait karşılaştırmalı frekans değerleri (Hz.)

Mod	B-B		A-B	
	Sabit kesitli	Değişken kesitli	Sabit kesitli	Değişken kesitli
1	28.399	40.032	35.941	54.510
2	64.863	85.018	72.740	89.621
3	113.529	121.791	127.501	133.222
4	134.696	167.086	144.520	188.268
5	199.324	259.88	217.312	281.816

Çizelge 5’den görüldüğü üzere değişken kesitli kirişlerin doğal frekansları, her iki sınır koşulunda da sabit kesitli kirişlere göre daha yüksektir. Bu artış, kesitin eğrilik boyunca değişmesiyle rijitliğin artması sonucu sistemin titreşim frekansının yükselmesinden kaynaklanmaktadır.

3.2.2. Malzeme Değişim Katsayısının Etkisi

Bu uygulamada malzeme değişim katsayısının EFD eliptik kirişlerin serbest titreşim üzerine etkisi araştırılmıştır. Çeşitli malzeme değişim katsayılarında ($n_z = 1, 2$ ve 5) Minimum yarıçapı 5 m olan EFD eliptik kirişler için farklı sınır şartlarında (A-A,B-B,A-S) frekans değerleri hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 6’da sunulmuştur.

Çizelge 6. Malzeme değişim katsayıları için değişken kesitli EFD eliptik kiriş frekansları (Hz.)

n_z	A-A			B-B			A-S		
	1	2	5	1	2	5	1	2	5
1	53.937	58.423	65.735	34.436	37.944	43.291	6.804	7.574	8.5733
2	74.868	81.621	92.624	68.873	75.222	85.854	27.265	29.884	33.371
3	130.208	141.361	158.658	100.845	109.844	124.588	64.971	70.877	79.937
4	188.581	205.186	230.158	148.054	162.421	183.991	117.693	128.542	145.261
5	268.146	292.106	327.616	229.376	251.293	284.347	178.035	195.622	222.298

Çizelge 6’ya bakıldığında tüm sınır şartlarında malzeme değişim katsayısı arttıkça doğal frekanslarında arttığı gözlenmektedir. Bu davranış, malzeme değişim katsayısı arttıkça EFD kirişindeki seramik varlığının artmasıyla rijitliğin artmasına bağlanmaktadır.

3.2.3. Sınır Şartlarının Etkisi

Diğer bir uygulamada sınır şartlarının EFD eliptik kirişlerin serbest titreşim davranışına etkisi incelenmiştir. Minimum yarıçapı 7.5 m olan farklı sınır şartlarındaki (A-A,A-B,B-B,A-S) değişken kesitli EFD eliptik kirişlerin çeşitli malzeme değişim katsayısındaki ($n_z = 1$ ve 2) serbest titreşim frekansları hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 7’de verilmiştir.

Çizelge 7. Sınır şartları için değişken kesitli EFD eliptik kiriş frekansları (Hz.)

<i>nz</i>	1				2			
Mod	A-A	A-B	B-B	A-S	A-A	A-B	B-B	A-S
1	86.270	78.342	61.784	13.505	94.605	86.008	68.566	14.876
2	101.005	92.750	86.197	44.923	109.998	101.516	94.535	49.323
3	190.693	173.962	146.961	105.092	207.984	190.279	162.015	115.547
4	261.447	250.960	237.371	179.478	285.999	274.876	261.361	198.272
5	319.783	308.968	300.224	224.725	350.008	338.643	328.719	249.343

Çizelge 7 incelendiğinde elde edilen her iki malzeme değişim katsayısı için de en yüksek doğal frekans değerlerinin A-A sınır koşulunda, en düşük değerlerin ise A-S sınır koşulunda gözlemlendiği anlaşılmaktadır. Buradan da anlaşıldığı üzere kiriş iki ucundan da deplasmanı ve dönmesi engellendiğinden en rijit hâline gelmektedir.

3.2.4. Minimum Yarıçap Değişiminin Etkisi

Gerçekleştirilen parametrik çalışmalarda son olarak ise eliptik kirişin minimum yarıçap değişiminin ($n_e = 5, 7.5, 10$) serbest titreşim frekansları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Malzeme değişim katsayısı 2 olan farklı sınır şartlarındaki (A-A,A-B,A-S) değişken kesitli EFD eliptik kirişler için frekans değerleri bulunmuş ve sonuçlar Çizelge 8’de sunulmuştur.

Çizelge 8. Minimum yarıçaplar için değişken kesitli EFD eliptik kiriş frekansları (Hz.)

Mod	A-A			A-B			A-S		
	5	7.5	10	5	7.5	10	5	7.5	10
1	58.423	58.130	48.664	49.201	48.831	41.753	7.574	7.495	6.545
2	81.620	80.550	78.578	75.228	79.015	75.533	29.884	25.520	21.703
3	141.361	128.200	118.572	128.272	118.695	113.705	70.887	62.566	55.137
4	205.186	183.906	160.894	189.050	168.656	147.488	128.542	117.515	104.213
5	292.106	270.460	240.420	274.352	252.763	224.297	195.622	186.232	166.461

Çizelge 8 incelendiğinde eliptik kirişin yarıçapının artması durumunda her üç sınır şartı için de frekans değerinin azaldığı görülmektedir. Özellikle elipsin daireye (minimum yarıçap=maksimum yarıçap yaklaştığı) durumda düşüş daha da belirgin olmaktadır. Bu durumda kirişin daha esnek davranmaya başlamakta ve titreşimlere karşı daha duyarlı hale gelmektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, değişken kesitli EFD eliptik kirişlerin serbest titreşim davranışı incelenmiştir. Elde edilen kanonik denklemler, Laplace uzayında TFY kullanılarak çözülmüş ve çözüm süreci için Fortran dilinde bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Program aracılığıyla, kesit değişiminin, malzeme değişim katsayısının, sınır koşullarının ve minimum yarıçap uzunluğunun EFD kirişin serbest titreşim davranışı üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda ulaşılan önemli bulgular aşağıda maddeler hâlinde verilmiştir.

- Elde edilen doğal frekans değerlerinin ANSYS sonuçlarıyla uyum göstermesi, önerilen yöntemin doğruluğunu ve güvenilirliğini ortaya koymuştur.
- Değişken kesitli kirişlerin doğal frekanslarının farklı sınır koşullarında sabit kesitli kirişlere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu artış, kesitin eğrilik boyunca değişmesiyle rijitliğin artmasına ve dolayısıyla sistemin titreşim frekansının yükselmesine bağlanmıştır.
- Tüm sınır koşullarında, malzeme değişim katsayısının artışıyla birlikte doğal frekansların yükseldiği belirlenmiştir. Bu durum, seramik bileşen oranının artmasına bağlı olarak malzeme rijitliğinin artmasıyla açıklanmaktadır.
- Ayrıca, en yüksek doğal frekansların A–A sınır koşulunda, en düşük değerlerin ise A–S koşulunda elde edildiği görülmüştür. Bu, iki ucun da kısıtlandığı A–A koşulunda sistemin en rijit hâline ulaşmasından kaynaklanmaktadır.
- Bunun yanında, minimum yarıçap arttıkça tüm sınır koşullarında doğal frekansların azaldığı gözlenmiştir. Elipsin daireye yaklaştığı durumda bu düşüş daha belirgin olup, kirişin esnekliğinin artmasıyla ilişkilidir.

5. KAYNAKLAR

1. Oh, S.J., Lee, B.K. & Lee, I.W. (2000). Free vibrations of non-circular arches with non-uniform cross-section. *International Journal of Solids and Structures*, 37, 4871-4891.
2. Nieh, K.Y., Huang, C.S. & Tseng, Y.P. (2003). An analytical solution for in-plane free vibration and stability of loaded elliptic arches. *Computers & Structures*, 81, 1311-1327.
3. Mike, C.Ö. (2004). Değişken kesitli eğri eksenli çubukların düzlem dışı titreşimlerinin matris yöntemiyle incelenmesi. *Doktora tezi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
4. Rajasekaran, S. (2014). Analysis of curved beams using a new differential transformation based curved beam element. *Meccanica*, 49, 863-886.
5. Tsiatas, G.C. & Charalampakis, A.E. (2017). Optimizing the natural frequencies of axially functionally graded beams and arches. *Composite Structures*, 160, 256-266.
6. Huynh, T.A., Luu, A.T. & Lee, J. (2017). Bending, buckling and free vibration analyses of functionally graded curved beams with variable curvatures using isogeometric approach. *Meccanica*, 52, 2527-2546.
7. Jin, G., Ye, T. & Su, Z. (2017). Elasticity solution for vibration of 2-D curved beams with variable curvatures using a spectral-sampling surface method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 111, 1075-1100.
8. Zhang, C. & Wang, Q. (2019). Free vibration analysis of elastically restrained functionally graded curved beams based on the Mori–Tanaka scheme. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 26(1), 1821-1831.
9. Yang, F., Sedaghati, R. & Esmailzadeh, E. (2018). Free in-plane vibration of curved beam structures: A tutorial and the state of the art. *Journal of Vibration and Control*, 24, 2400-2417.
10. Eroğlu, U. & Tufekci, E. (2018). A new finite element formulation for free vibrations of planar curved beams. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 46, 730-750.

11. Noori, A.R., Aslan, T.A. & Temel, B. (2018). An efficient approach for in-plane free and forced vibrations of axially functionally graded parabolic arches with nonuniform cross section. *Composite Structures*, 200, 701-710.
12. Aslan, T.A., Noori, A.R. & Temel, B. (2019). In-plane free vibration frequencies of stepped circular beams. *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 1(1), 1-7.
13. Temel, B., Aslan, T.A. & Noori, A.R. (2021). In-plane vibration analysis of parabolic arches having a variable thickness. *International Journal of Dynamics and Control*, 9(3), 910-921.
14. Wan, Z.Q., Li, S.R. & Ma, H.-W. (2019). Geometrically nonlinear analysis of functionally graded Timoshenko curved beams with variable curvatures. *Advances in Materials Science and Engineering*, 6204145.
15. Qin, B., Zhao, X., Liu, H., Yu, Y. & Wang, Q. (2020). Free vibration analysis of curved laminated composite beams with different shapes, lamination schemes, and boundary conditions. *Materials*, 13(4), 1010.
16. Wang, Q., Choe, K., Tang, J., Shuai, C. ve Wang, A. (2020). Vibration analyses of general thin and moderately thick laminated composite curved beams with variable curvatures and general boundary conditions. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 27(12), 991-1005.
17. Aydoğan, G., Ermis, M., Aribas, U.N. & Omurtag, M.H. (2021). Free vibration analysis of axially functionally graded elliptical beams via finite element method. *Proc 22nd Natl Mech Congr, Çukurova Univ-Adana, Turkey*, 61-74.
18. Ermis, M., Akdoğan, G., Kir, O., Aribas, U.N. & Omurtag, M.H. (2022). The static and free vibration analyses of axially functionally graded elliptical beams via mixed FEM. *Journal of Structural Engineering and Applied Mechanics*, 22(5), 22-39.
19. Luo, J., Zhu, S. & Zhai, W. (2022). Formulation of curved beam vibrations and its extended application to train-track spatial interactions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 165, 108393.
20. Mohanty, N., Mishra, U.K. & Sahu, S.K. (2023). An adaptive neuro fuzzy inference system model for studying free in-plane and out-of-plane vibration behavior of curved beams. *Structures*, 47, 1836-1845.
21. Lee, J.K., Yoon, H.M., Oh, S.J. & Lee, B.K. (2024). Free vibration of axially functionally graded Timoshenko circular arch. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 68(2), 445-458.
22. Nguyen, N.D. (2025). Analysis of functionally graded porous curved beams with various boundary conditions. *International Journal of Mechanical and Materials Design*, 1-24.
23. Nguyen, N.D., Bui, V.T., Nguyen, T.K. & Vo, T.P. (2025). Higher-order shear deformation theory and Ritz method for analysis of functionally graded sandwich curved beams. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 1-18.
24. Jafari-Talookolaei, R.A., Ghandvar, H., Jumaev, E. & Mikhliev, O. (2025). Free vibrations of a laminated composite curved beam with arbitrary layouts. *ZAMM – Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 105(6), e70120.
25. Aslan, T.A., Noori, A.R. ve Temel, B. (2019). Birinci mertebe kayma deformasyon teorisine dayalı FD düz eksenli kirişlerin serbest titreşim analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(4), 21-28.
26. Noori, A.R., Rasooli, H., Aslan, T.A., ve Temel, B. (2020). Fonksiyonel derecelenmiş sandviç kirişlerin Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yöntemi ile statik analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(4), 1091-1102.
27. ANSYS®, *Academic Research Mechanical*, Release 2025 R1. ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, USA.

Current Status and Future Forecast of Global CO₂ Concentration Using Statistical and Deep Learning Time Series Methods

Sergen TUMSE^{1,a}

¹Çukurova University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Adana., Türkiye

^aORCID: 0000-0003-4764-747X

Article Info

Received : 02.09.2025

Accepted : 06.11.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1776709

Corresponding Author

Sergen TUMSE

stumse@cu.edu.tr

Keywords

CO₂ concentration

Deep learning,

Global warming

Time series methods

How to cite: TUMSE, S., (2025). Current Status and Future Forecast of Global CO₂ Concentration Using Statistical and Deep Learning Time Series Methods. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(4), 875-888.

ABSTRACT

In this study, four models were developed and assessed, including Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA), Feedforward Neural Network (FNN), Gated Recurrent Unit (GRU), and Long Short-Term Memory (LSTM) to evaluate current status and future forecast of global CO₂ concentration. A total of 554 global monthly datasets were employed to train and test the developed models, aimed at estimating future CO₂ concentrations. Then, each developed model was also utilized to estimate CO₂ concentrations for the future 110 months, from March 2025 to February 2035. Among all generated techniques, the LSTM model showed the highest estimation accuracy with an MAPE of 0.05%, an MAE of 0.2028 ppm, and an RMSE of 0.3216 ppm. Whereas GRU and FNN techniques also obtained good results with the same MAPE of 0.05%, their MAE and RMSE values were slightly higher. The four developed models (ARIMA, FNN, GRU, and LSTM) agree on a continuous rise in atmospheric CO₂ level within the range between March 2025 and early 2035, and they typically show CO₂ concentrations starting from approximately 425 ppm in early 2025 to 442-443 ppm by the end of 2034.

İstatistiksel ve Derin Öğrenme Zaman Serisi Yöntemleri Kullanılarak Küresel CO₂ Yoğunluğunun Mevcut Durumu ve Gelecekteki Tahmini

Makale Bilgileri

Geliş : 18.04.2025

Kabul : 27.05.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1776709

Sorumlu Yazar

Sergen TUMSE

stumse@cu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Karbondioksit emisyonu

Derin öğrenme

Küresel ısınma

Zaman serisi yöntemleri

Atıf şekli: TUMSE, S., (2025). İstatistiksel ve Derin Öğrenme Zaman Serisi Yöntemleri Kullanılarak Küresel CO₂ Yoğunluğunun Mevcut Durumu ve Gelecekteki Tahmini. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(4), 875-888.

ÖZ

Bu çalışmada global CO₂ yoğunluğunun güncel durumunu ve gelecek tahminini değerlendirebilmek amacıyla, Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (ARIMA), İleri Beslemeli Sinir Ağı (FNN), Kapılı Yinelemeli Birim (GRU) ve Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) olmak üzere dört model geliştirilmiştir. Gelecekteki CO₂ yoğunluklarını tahmin etmeyi amaçlayan bu modelleri eğitmek ve test etmek için toplam 554 aylık veri kullanılmıştır. Daha sonra geliştirilen her model, Mart 2025'ten Şubat 2035'e kadar olan 110 aylık süre için CO₂ yoğunluklarını tahmin etmek için de kullanılmıştır. Oluşturulan tüm teknikler arasında LSTM modeli, %0,05'lik bir MAPE, 0,2028 ppm'lik bir MAE ve 0,3216 ppm'lik bir RMSE ile en iyi tahmin doğruluğunu göstermiştir. GRU ve FNN teknikleri de aynı %0,05'lik MAPE ile iyi sonuçlar elde ederken, MAE ve RMSE değerleri biraz daha yüksek çıkmıştır. Geliştirilen dört model (ARIMA, FNN, GRU ve LSTM), Mart 2025 ile 2035 başı aralığında atmosferik CO₂ seviyesinde sürekli bir artış ve tipik olarak CO₂ yoğunluğunun 2025 başı yaklaşık 425 ppm'den başlayarak 2034 sonu itibarıyla 442-443 ppm arasına çıkması konusunda hemfikirlerdir.

1. INTRODUCTION

The significant impacts of global climate change and its outcomes have made it exceptionally important to accurately measure carbon emissions. The release of greenhouse gases plays a key role in driving global warming and exacerbating the environmental challenges related to climate change. Some regions of the world, having a greater impact on carbon emissions, lead to significant environmental and health issues. The magnitude of these problems requires creative solutions for the future of the world and humanity. Human activities such as burning fossil fuels, destroying forests, and using some traditional farming methods release large quantities of greenhouse gases, mainly carbon dioxide (CO₂) to the atmosphere. The global quantity of CO₂ produced in 2022 exceeded 2021 levels by nearly 1.5% [1]. After two sequential years characterized by unusual fluctuations in energy-related carbon emissions, an increase was detected last year. The COVID-19 pandemic rapidly reduced energy consumption in 2020, resulting in a decrease in emissions of more than 5%. Global CO₂ emissions rose by over 6%, exceeding pre-pandemic quantity, as economic recovery was driven by financial support and the widespread administration of vaccinations in 2021 [2]. Climate change creates an extraordinary environmental and societal challenge, with results that threaten the health, safety, and livelihoods of billions of people globally [3,4]. CO₂ emissions contribute to climate change. Analyzing CO₂ emissions is of great importance for combating climate change. Machine learning programs are becoming increasingly important for systematically monitoring CO₂ emissions.

Artificial intelligence has a major role in every field this century, facilitating many areas. Artificial intelligence, especially through the use of ML techniques, has gained significant importance for environmental sustainability. Machine learning methods are progressively accepted for supporting decision-making for environmental sustainability, especially in forecasting current CO₂ levels and estimating future emission levels [5].

Machine learning includes a diverse set of computational methodologies that deduce patterns from data, enabling the analysis of wide-reaching datasets and the modeling of nonlinear dynamics. Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) models and Long Short-Term Memory (LSTM) networks are two widely adopted methodological frameworks for forecasting CO₂ emissions [6,7]. In the study of Nuaimi et al. [8], various machine learning algorithms such as Artificial Neural Networks, Support Vector Machines, Extreme Learning Machines, and Ensemble Methods have been used to predict carbon emissions. This study emphasizes the strengths and limitations of the proposed models. According to authors, the automation of hyperparameter optimization and model training can remarkably improve the performance of emissions prediction techniques. Ma et al. [9] developed different algorithms to predict the CO₂ emission by utilizing 21 operating parameters from a municipal solid waste (MSW) incineration plant as input parameters. The outcomes demonstrated a powerful estimation performance for the generated algorithms, Random Forest (RF) and XGBoost, with coefficient of determination, $R^2=0.932$ and 0.903 , respectively. Begum and Mobin [10] applied six machine learning techniques to forecast CO₂ emissions through 2030 for the eleven maximum-emitting countries. They determined the mean estimation accuracy to be 96.21%. According to them, Russia is projected to exceed its specified decreasing commitments, in contrast to Germany and the United States, which are expected to experience small shortfalls in reaching their respective objectives. Alhussan et al. [11] proposed a detailed framework that combines advanced deep learning models containing Gated Recurrent Unit (GRU), Bidirectional GRU (BiGRU), Stacked GRU, and Attention-enhanced BiGRU with a unique hybrid optimization model, GGBERO, advanced by the combination of Greylag Goose Optimization (GGO) and the Al-Biruni Earth Radius (BER) technique. According to them, besides improving the estimation accuracy of CO₂ emissions, the introduced combined framework supplies remarkable insights into the main determinants of CO₂ emissions, thus helping policymakers and researchers, in making informed, data-driven decisions for diminishing climate change effects. Ayaz [12] compared the conventional ARIMA model and deep learning based LSTM model to assess current and future levels of CO₂ emissions in Türkiye, utilizing the data from the Global Carbon Atlas published in 2023. According to the results, the LSTM algorithm yielded the coefficient of determination as $R^2 = 90.4\%$, whereas the ARIMA algorithm yielded an R^2 score of 94.3% . The author stated that machine learning models are critical tools in mitigating climate change effects and provide

valuable insights to policymakers. Uluocak [13] investigated the estimations of CO, CO₂ and NO_x emissions from a diesel engine using two deep learning time series methods such as GRU and LSTM neural networks. According to results, the developed LSTM model demonstrated better accuracy in estimating CO₂ emissions whereas the GRU model yielded superior performance in estimating CO and NO_x emissions. Korkmaz [14] developed linear regression, XGBoost and kNN models to predict CO₂ emissions of vehicles. The results revealed that XGBoost model yields best accurate CO₂ emission values with a RMSE of 6.45, a MAE of 2.81 and R² of 0.9875.

The aim of this study is to predict the current and future trend of CO₂ by using 554 global monthly mean CO₂ concentration data recorded between January 1979 and February 2025 at the Mauna Loa Observatory, operated by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) using four different models: Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA), Feedforward Neural Network (FNN), Gated Recurrent Unit (GRU), and Long Short-Term Memory (LSTM).

2. METHODS

2.1. Data Description

The data employed in this investigation include global monthly average CO₂ concentrations (ppm) recorded by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)'s Mauna Loa Observatory for dates between January 1979 and February 2025. Before model applications, detailed preprocessing steps were established to improve the effectiveness and utility of the dataset for time series prediction. First, the raw atmospheric CO₂ concentration data were normalized utilizing the min-max scaling method. This technique converted the data into a uniform range between 0 and 1, thus providing stable and effective neural network training by diminishing the impact of differing magnitudes. The dataset including 554 global monthly records between January 1979 and February 2025 was separated into training and testing subsets in such a way, 80% of the dataset was used for model training that the remaining 20% was allocated for the testing process. To provide sequential modeling, the normalized data were arranged in input-output pairs in which each input sequence included a constant number of past months' data, which was utilized to estimate CO₂ concentration values of the following months. This arrangement allowed the models to handle both short-term fluctuations and long-term dependencies in the atmospheric CO₂ concentration time series distribution.

2.2. Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA)

ARIMA models are used when the output variable is affected not only by the current data but also by previous information. These models can only be employed for fixed time series data, so the data must first be checked and transformed, if required, to guarantee stationarity before model application. It is primarily applied for two purposes: to examine time series data for deeper insights and to estimate future trends. As an autoregressive statistical approach, ARIMA predicts further data using previous observations. A prevalent implementation of ARIMA models is the estimation of stock market prices, where forward prices of a stock are predicted utilizing its historical data. An ARIMA model is constituted of three components: AR, I, and MA. The "AR" means to autoregression, referring the variable is expressed by its own past values. This kind of model predicts future values from preceding records. The "I" refers "integrated," meaning to the differencing of time series data to provide stationarity. If a dataset is not fixed, it can be made stationary by modifying each data point by the difference between this value and its previous value. The final constituent, "MA," refers Moving Average and demonstrate the model's error as a linear combination of previous estimation errors [15]. ARIMA models can only be applied on stationary time series; in other words, non-stationary data must be converted before model building. Thus, the first step in creating an ARIMA model is to be sure the data are stationary [16]. Figure 1 demonstrates the structure of the ARIMA model.

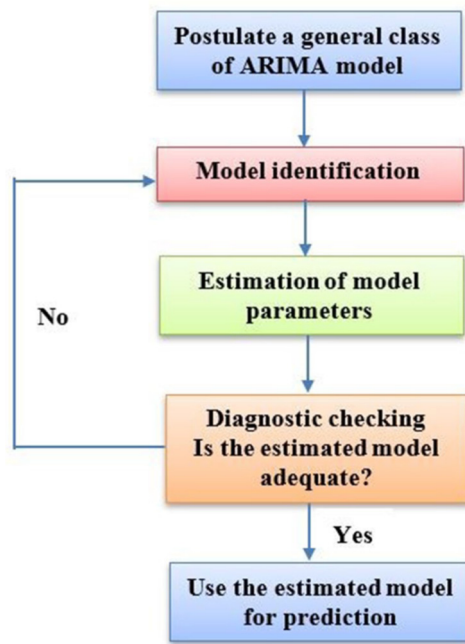


Figure 1. The structure of the ARIMA model [17]

2.2.1. Moving Average (MA) Process

A sequence $\{z_t\}$ is described as a moving average process of order q when it provides the defining circumstances.

$$z_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (1)$$

In Equation (1), θ_i ; $i=1,2,3,\dots,q$ are fixed constants whereas $\{a_t\}$ shows simply random process with zero mean and variance σ^2 [11].

2.2.2. Autoregressive (AR) Process

A sequence $\{z_t\}$ is described as an autoregressive process of order q when it fulfills the defining characteristics.

$$z_t = \phi_1 z_{t-1} - \phi_2 z_{t-2} - \dots - \phi_p z_{t-p} + a_t \quad (2)$$

In Equation (2), ϕ_i ; $i=1,2,3,\dots,p$ are fixed constants whereas $\{a_t\}$ shows simply random process with zero mean and variance σ^2 [11].

This model runs in a similar manner to multiple regression models.

2.2.3. Autoregressive Moving Average (ARMA) Process

The autoregressive (AR) and moving average (MA) constituents are associated with each other to create the autoregressive moving average (ARMA) model. For a time series, the $ARMA(p,q)$ model, which contains p (AR) components and q (MA) components, can be demonstrated as follows.

$$z_t = \sum_{i=1}^p \phi_i z_{t-i} - \sum_{j=1}^q \theta_j a_{t-j} + a_t; t = 1, \dots, T \quad (3)$$

In Equation (3), a_t describes a classic white noise process including zero mean and variance σ^2 . Here, the sign T denotes the time series length [18]. For validity, the AR components must satisfy the stationarity condition, whereas the MA components are needed to provide the invertibility condition.

2.3. Feed-forward Neural Network

Neural networks (NN) are improved computational techniques inspired by the constitution and mechanism of the human central nervous system [19]. Essentially, an NN applies nonlinear mapping, converting an available input value into a corresponding output pattern. A simple NN is constituted of connected artificial neurons or nodes, adjusted through three main layers, namely the input, hidden, and output layers. A neural network (NN) including a sufficient number of hidden nodes can predict any nonlinear function. But, the neuron number in the hidden layer depends on the type of problem involved, and they should be optimized to hinder overfitting [20]. Even though NNs have the capability of mapping an input value to the output pattern, they must be trained to understand the patterns of distribution in datasets to achieve successful mappings. The main aim of the training process is to specify the optimum set of biases and weights that reduce the error possibility of the developed network [21]. The training process can be carried out across supervised, unsupervised, or reinforcement learning. Determining a suitable training algorithm is a crucial issue of applying NNs [22]. Equation (4) explains the operation of neural networks in the estimation of a parameter. According to Equation (4), while the predicted value is specified as F and the output bias value is denoted by the symbol a , w_{ij} and v_j are called weights of input and output layers, respectively. Furthermore, the number of nodes in the hidden layer is represented by h ; the number of input parameters is denoted by k , whereas x is used to describe the input variable.

$$F = f \left(a + \sum_{j=1}^h v_j + \sum_{i=1}^k g w_{ij} x_i + b_j \right) \quad (4)$$

A feed-forward neural network (FNN) is the oldest and simplest type of artificial neural networks. In this technique, knowledge or data flows in only one direction, such as from the input layer to the output layer, and it does not include any feedback and recurrent interconnections [23]. A multilayer FNN is composed of multiple neuron layers connected sequentially in the forward direction [24].

2.4. Long Short-Term Memory (LSTM)

Hochreiter [25] played a key role in the progress of the LSTM model. Even though initially considered a kind of recurrent neural network (RNN), this technique solves the restrictions of classic RNNs by offering memory cells, or cell states, which help to diminish the gradient problem. The architecture of an LSTM layer is demonstrated in Figure 2. This figure demonstrates how a time series X , described by C properties (channels) and length S , is operated through the LSTM layer. Additionally, the hidden state specified as h_t serves as both an output and an explanation of the cell's condition at time step t . The LSTM unit produces the first output while synchronously updating the cell state at the first time step and for the initial network state. When the sequence proceeds, the LSTM component applies the preceding cell and hidden states (c_{t-1} , h_{t-1}) to simultaneously calculate the updated cell state (c_t) and the output at time step t [26].

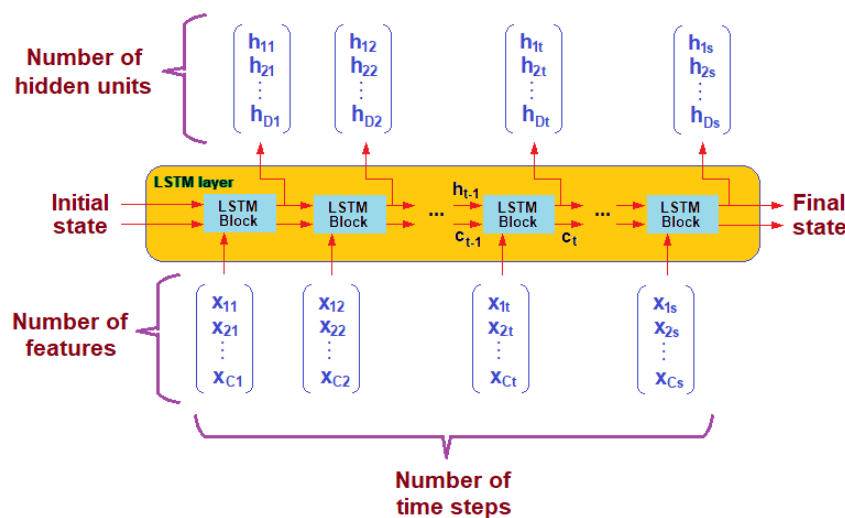


Figure 2. Schematic demonstration of an LSTM layer [26]

The LSTM model has three kinds of learnable components, namely input weights (W), recurrent weights (R), and biases (b). Furthermore, three matrices are constructed to contain these components for each gate. The united structure of these three matrices for all gate constituents is illustrated in Equation (5).

$$W = \begin{bmatrix} W_i \\ W_f \\ W_g \\ W_o \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} R_i \\ R_f \\ R_g \\ R_o \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} b_i \\ b_f \\ b_g \\ b_o \end{bmatrix} \quad (5)$$

In Equation (5), while the input gate is described with i , the forget gate and cell candidate are denoted with f and g , respectively. On the other hand, the sign 'o' represents the output gate, as demonstrated in each weight matrix.

2.5. Gated Recurrent Unit (GRU)

Gated recurrent unit (GRU) is a kind of recurrent neural network (RNN) with a simplified structure compared to LSTM to improve computational performance and accuracy. The internal component of the GRU is analogous to that of LSTM, except that it combines LSTM's forget and input gates into a single update port. This technique is inspired by the LSTM model but is considered easier to comment on and apply. This property enables the LSTM to solve the vanishing gradient issue. The internal structure of GRU is simpler, which facilitates a simpler training process compared to other models since it demands low computational effort to enhance its parameters. The reset gate identifies whether data or knowledge from the preceding state should be unified with data or knowledge of the current state. The update gate checks the extent to which data or knowledge from the preceding state is maintained in the present state. Figure 3 illustrates the GRU model structure. The subsequent equations explain the mathematical procedures that govern the GRU cell gating system [27]:

$$z_t = \sigma(x_t W^z + h_{t-1} U^z + b_z) \quad (6)$$

$$r_t = \sigma(x_t W^r + h_{t-1} U^r + b_r) \quad (7)$$

$$\tilde{h}_t = \tanh[(r_t \times h_{t-1} U + x_t W + b)] \quad (8)$$

$$h_t = (1 - z_t) \times \tilde{h}_t + z_t \times h_{t-1} \quad (9)$$

In these equations, the weight matrices related to the present input vector are defined as W^z , W^r , and W . On the other hand, the weight matrices of previous time steps are denoted as U^z , U^r , and U . Bias parameters are described with the symbols b_z , b_r , and b . Moreover, while the sign σ defines logistic sigmoid function, z_t present updating gate, r_t is reset gate and $\tilde{h}_t$ describes the candidate's secret layer [28].

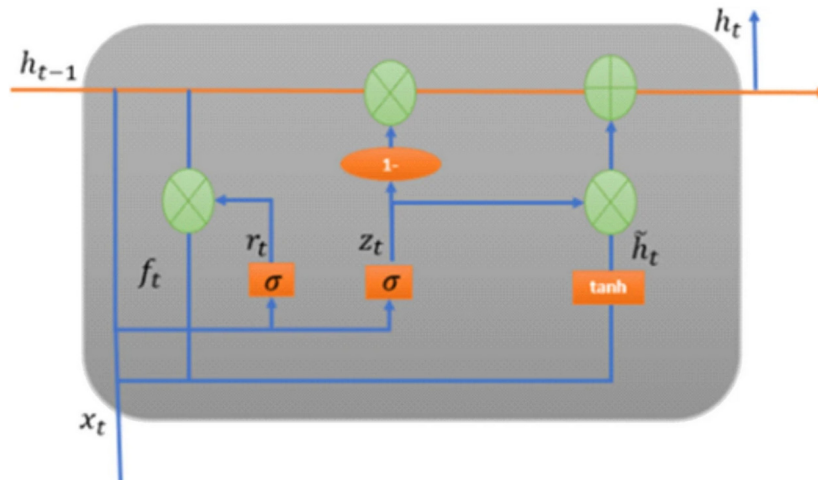


Figure 3. The schematic illustration of the GRU model structure [27]

In the current investigation, LSTM and GRU models were implemented to predict present and future CO₂ concentrations. The developed architectures were assessed by changing the number of hidden units between 5 and 100 with an interval of 5. Training was performed for 500 epochs. The learning rate, which is a main parameter for model convergence, was examined for values between 0.005 and 0.5. With respect to performance evaluations, the most accurate LSTM model was achieved by including 75 hidden units. The Adam optimizer was utilized for the update of parameters, whereas the hyperbolic tangent (tanh) was used for the activation function. The dimensions of the input layer were adjusted to one for the developed LSTM and GRU architectures.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1. Model Evaluation and Historical Forecasts (2016-2025)

As can be seen in Figure 4, during the testing phase, a comprehensive comparison is conducted for the period from 2016 to 2025 between actual atmospheric CO₂ concentrations (in ppm) and their corresponding predicted values generated by an ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) model. In order to prevent any misunderstanding, the actual CO₂ values are represented as a continuous blue line, whereas the ARIMA forecasted values are depicted as a red dashed line. Figure 4 presents the robustness of the ARIMA model to monitor both the long-term upward trend in atmospheric CO₂ content and the short-term seasonal oscillations. For example, at the beginning of 2016, the actual CO₂ level in the atmosphere was measured at 402.64 ppm, and the value reached 426.05 ppm by 2025. Likewise, by employing the ARIMA model, the forecasted CO₂ level in the atmosphere is estimated to be 401.12 ppm, in the beginning of 2016, while this value is projected to reach 424.31 ppm, in the beginning of 2025. According to these results, while the real CO₂ concentration rise is recorded as 23.41 ppm, this value is observed as 23.19 ppm with the ARIMA model between 2016 and 2025. Moreover, these perfect matchings also hold for the rest of the values, as can be seen in Figure 4, which proves the model's strong ability to capture the trend.

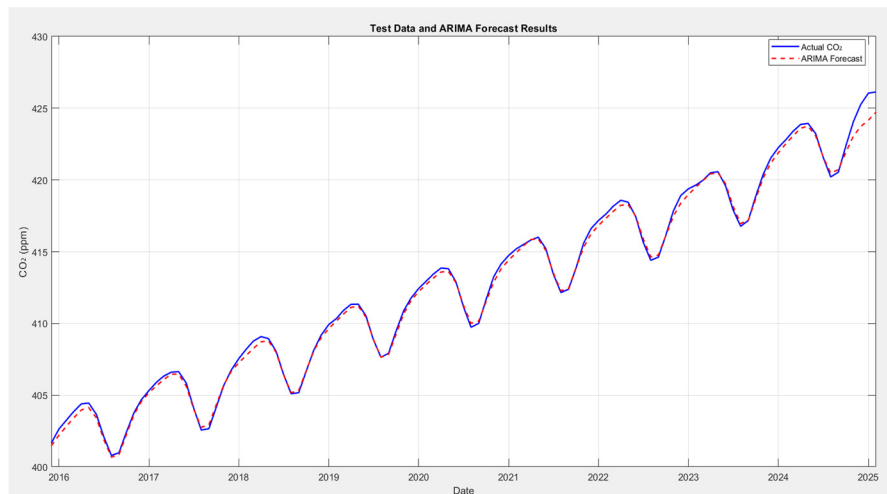


Figure 4. Comparison of actual and predicted CO₂ concentrations with ARIMA model in testing stage

Aside from the ARIMA model, another powerful model, the Feedforward Neural Network (FNN), is applied and illustrated in Figure 5. The figure represents a clear comparison between recorded CO₂ concentrations and the FNN model's predictions during the testing phase. To avoid any misinterpretation, the actual CO₂ values are denoted as a blue line, and the FNN forecasts are plotted as a red dashed line. These lines demonstrate nearly perfect correlations, which indicate the model's ability to monitor both the increasing tendency of CO₂ levels and the regional fluctuations of atmospheric CO₂ concentrations. For instance, in May 2016, the actual CO₂ content was recorded as approximately 404.45 ppm, while the suggested FNN model predicted 404.23 ppm. As can be seen in Figure 5, true values of CO₂ and the simulated values agree well with each other. Slight deviations exist between collected CO₂ and estimated CO₂ data, ranging from October 2024 to early 2025. The corresponding values are 422.87 ppm for actual CO₂ and 422.51 ppm for forecasted CO₂ model in October 2024, with values in early 2025 being 426.08 ppm for true CO₂ level and 424.78 ppm for predicted CO₂ content in the atmosphere. Although small

differences are noticeable in certain local regions, those disagreements are minimal and do not affect the overall performance of the proposed model. Furthermore, this situation contributes to the model's sensitivity to the natural variability, and highlights the model's capability of replicating the seasonal changes in atmospheric CO₂ levels.

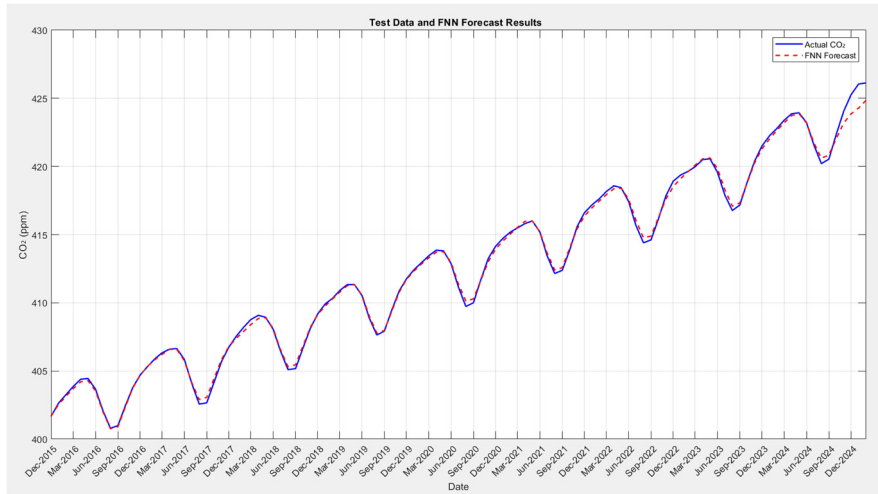


Figure 5. Comparison of actual and predicted CO₂ concentrations with FNN model in testing stage

To provide better performance analysis, the Gated Recurrent Unit (GRU) model is employed to forecast the atmospheric CO₂ concentrations. Here, Figure 6 visualizes the GRU model's prediction capacity during the implementation phase, which covers the period from late 2015 to early 2025. To provide a clear image, the actual CO₂ data are represented as a continuous blue line, while the GRU data are presented as a red dashed line. As can be inferred, the GRU model accomplishes the annual increase and seasonal fluctuations, and achieves strong alignment with the observed long-term growth pattern. For example, in the year 2020, the real CO₂ level is measured as 412.42 ppm, while the forecasted CO₂ value is estimated as 412.34 ppm. Furthermore, these perfect matchings are also applicable to the data presented in Figure 6. A few small differences are observed at the end of 2024. An example of the major deviation the true value of CO₂ at the beginning of 2025 is measured as 426.10 ppm, whereas the projected CO₂ content is 424.39 ppm. Thus, the differences are in the acceptable range, and to further validate the robustness of the proposed model, a quantitative evaluation table (Table 1) is generated. From Table 1, the Root Mean Square Error (RMSE) value is calculated as 0.3342 ppm, which indicates low standard deviation, and demonstrates the soundness of the model.

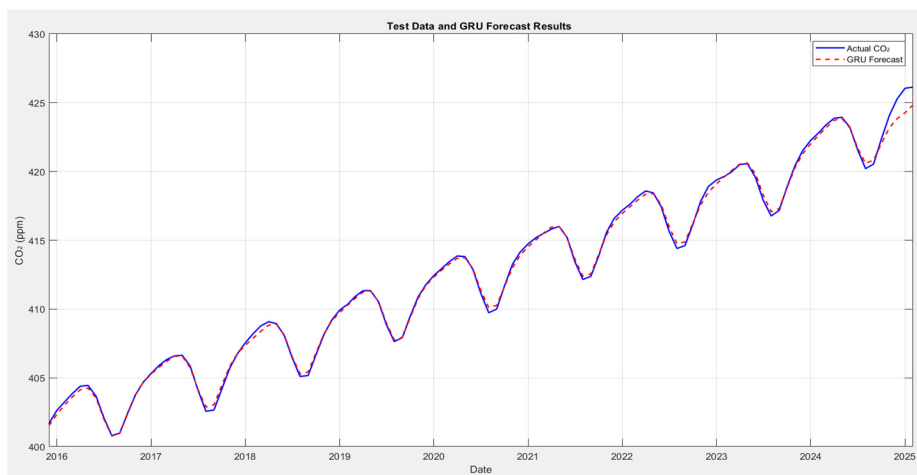


Figure 6. Comparison of actual and predicted CO₂ concentrations with GRU model in testing stage

Finally, an alternative machine learning model, the Long Short-Term Memory (LSTM), was performed, and its predictive performance is plotted in Figure 7 during the testing period ranging from late 2015 to 2025. The true CO₂ values are demonstrated as a continuous blue line, while the forecasted LSTM data is

denoted as a red dashed line. Likewise, the LSTM effectively captures the increasing trend, and the model shows good agreement with the measured CO₂ concentrations. As an example of this, the peak values of the forecasted and actual CO₂ levels in 2023 are found to be exactly 420.48 ppm for both. This perfect correlation is valid in most cases throughout the time series. While minor deviations occur at certain turning points of the seasonal curve, these differences are minimal and remain in the acceptable range. For example, an obvious deviation occurs at the end of 2024, and the corresponding values are 424.07 ppm for the proposed model, but it is 426.05 ppm for the recorded CO₂ concentrations. As can be seen, the percentage differences are calculated as less than 1%. the quantitative results tabulated in Table 1 further validate the model's ability to reflect the data.

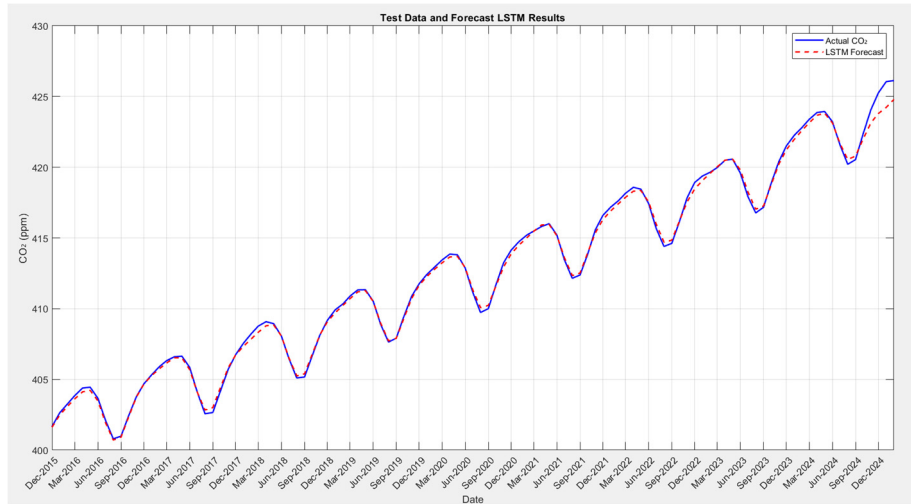


Figure 7. Comparison of actual and predicted CO₂ concentrations with LSTM model in testing stage

According to Table 1, among all generated techniques, the LSTM model showed the best estimation accuracy with a MAPE of 0.05%, a MAE of 0.2028 ppm, and an RMSE of 0.3216 ppm. Whereas GRU and FNN techniques also obtained good results with the same MAPE of 0.05%, their MAE and RMSE values were a bit greater. On the other hand, the conventional statistical approach, which is called as ARIMA model, yielded the worst performance with a MAPE of 0.06%, a MAE of 0.2488 ppm, and an RMSE of 0.3672 ppm, revealing limited ability in handling nonlinear trends and seasonal dynamics. The results in Table 1 reveal the strong performance of deep learning models—particularly LSTM—in modeling complex environmental time series such as atmospheric CO₂. The LSTM's internal memory mechanism allows it to effectively capture long-term dependencies and seasonal variations in the data.

Table 1. Error metrics for the developed models

Model	MAPE (%)	MAE (ppm)	RMSE (ppm)
ARIMA	0.06	0.2488	0.3672
FNN	0.05	0.2036	0.3246
GRU	0.05	0.2145	0.3342
LSTM	0.05	0.2028	0.3216

3.2. Future Predictions (2025-2035)

In Figure 4, ARIMA-based and actual CO₂ concentrations are presented and compared extensively during the testing stage from 2016 to 2025. The near-perfect matching observed between real CO₂ and predicted values which proves the validity and precision of the model. Accordingly, in Figure 8, the extended version of the ARIMA model, is forecasted from March 2025 to December 2035. The model exhibits a continued increase in atmospheric CO₂ concentration, starting from approximately 426 ppm to around 444 ppm by the end of 2035. The model also clearly reveals the different seasonal oscillations, which indicate its capability of monitoring cyclical and distinct trend components through the decades. Furthermore, the average predicted CO₂ concentration in 2025 is found to be 424.98 ppm, while the 2026 estimate is 426.84 ppm, and the increase is calculated as 1.86 ppm. According to the ARIMA model, the average annual raise is calculated as around 1.8 ppm per year up to 2035, which is consistent with historical growth rate, and the

total increase from 2025 to 2035 is detected as 18.38 ppm. This compactness validates the model's future monitoring capabilities and demonstrates its ability to maintain accurate and dependable long-term estimations.

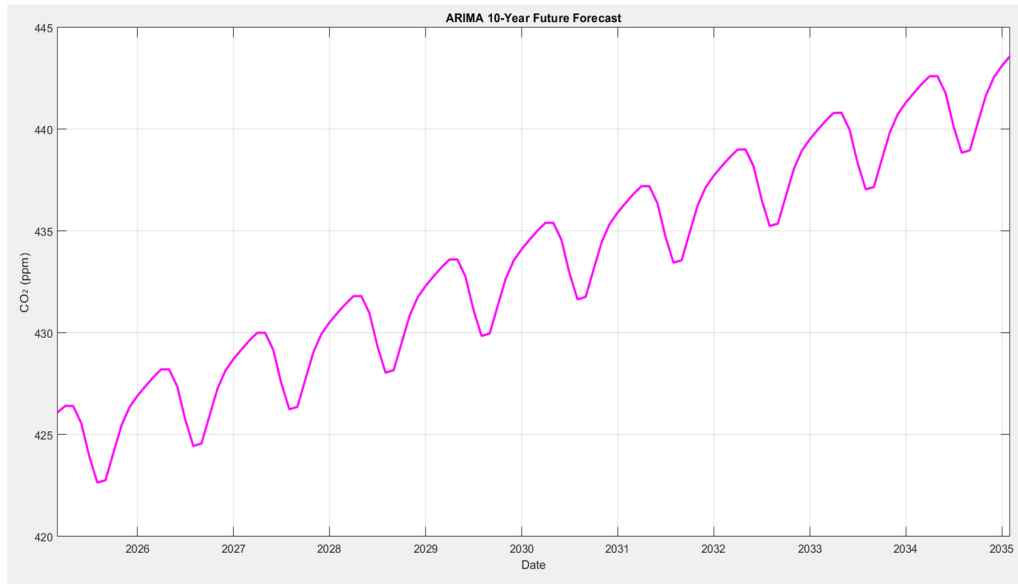


Figure 8. Predicted CO₂ concentration in future from March 2025 to December 2033 with ARIMA model

The testing performance of the Feedforward Neural Network (FNN) from late 2016 to the end of 2024 was represented in Figure 5, and a wide-ranging comparison was made between observed and predicted CO₂ concentrations. According to Figure 5, the real and forecasted CO₂ data are in good agreement and the FNN model can accurately determine both the trend and the seasonal changes. The long-term FNN estimations for the period 2025-2035 are demonstrated in Figure 9. Similar to the ARIMA model, the FNN model predicts a continuous increase in CO₂ level in the atmosphere, reaching up to 442.65 ppm by early 2035. For example, the average projected CO₂ concentration for 2025 is determined as 424.18 ppm, while the arithmetical mean of CO₂ content for 2026 is depicted as 425.99 ppm, and the difference between these two years are calculated as 1.81 ppm, which is 0.05 ppm less than the ARIMA model. Throughout the forecasting data, CO₂ levels in the atmosphere rise around 4% from 425.21 ppm on the first of March 2025 to 442.65 ppm on the first of February 2035. Those findings state that the suggested FNN model clearly simulates the future of atmospheric CO₂ levels, confirming the expected increase in CO₂ contents while precisely capturing the seasonal variability.

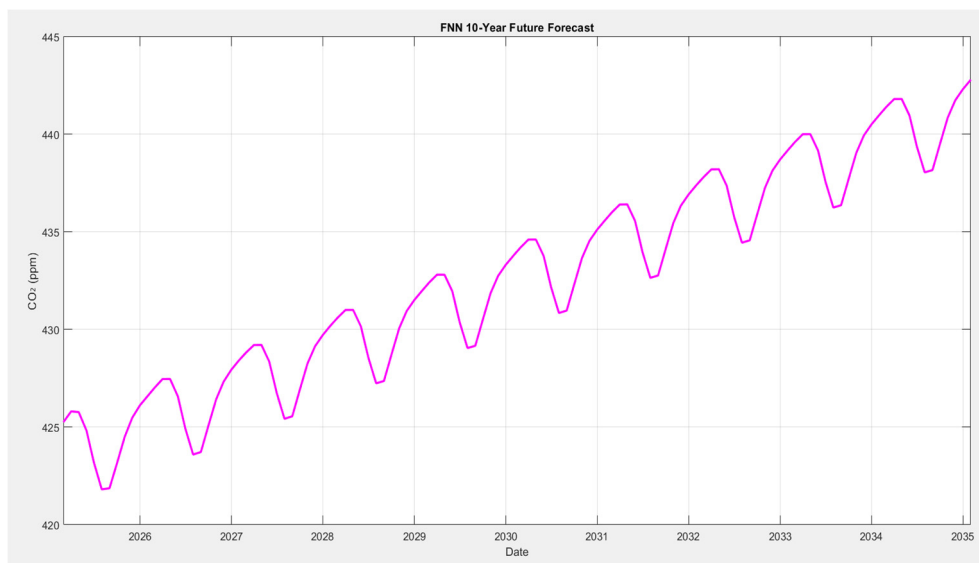


Figure 9. Predicted CO₂ concentration in future from March 2025 to December 2033 with FNN model

In Figure 6, the performance of the Gated Recurrent Unit (GRU) model is specified for atmospheric CO₂ concentration predictions from 2016-2025, during the testing phase. Additionally, the trained GRU model is briefly implemented on the unseen data to evaluate its forecasting accuracy against actual observations. In Figure 10, based on the GRU model's validated performance, the GRU is employed to generate a long-term CO₂ level forecast from March 2025 to December 2035. According to Figure 10, the atmospheric CO₂ value increases from 425.20 ppm in early 2025 to 442.84 ppm by the end of 2035. Similar to Figure 6, the proposed model successfully simulates the characteristics of seasonal oscillations across the forecasted years, which validates the model's capacity to extend sequential dependencies into the future for monitoring. For instance, the peak of CO₂ level is estimated to be 427.46 ppm in May 2026, while the highest CO₂ concentration is found to be 429.26 ppm in May 2027. For the selected years, the GRU model's forecast differences between May 2026 and May 2027 are found to be 1.8 ppm, whereas the FNN model's findings for the same time period are found to be 1.7 ppm, which is 0.1 ppm less than the GRU model's outputs. Both models predict an increase in CO₂ value and suggest almost identical values, which demonstrates the models' excellent predictive capability.

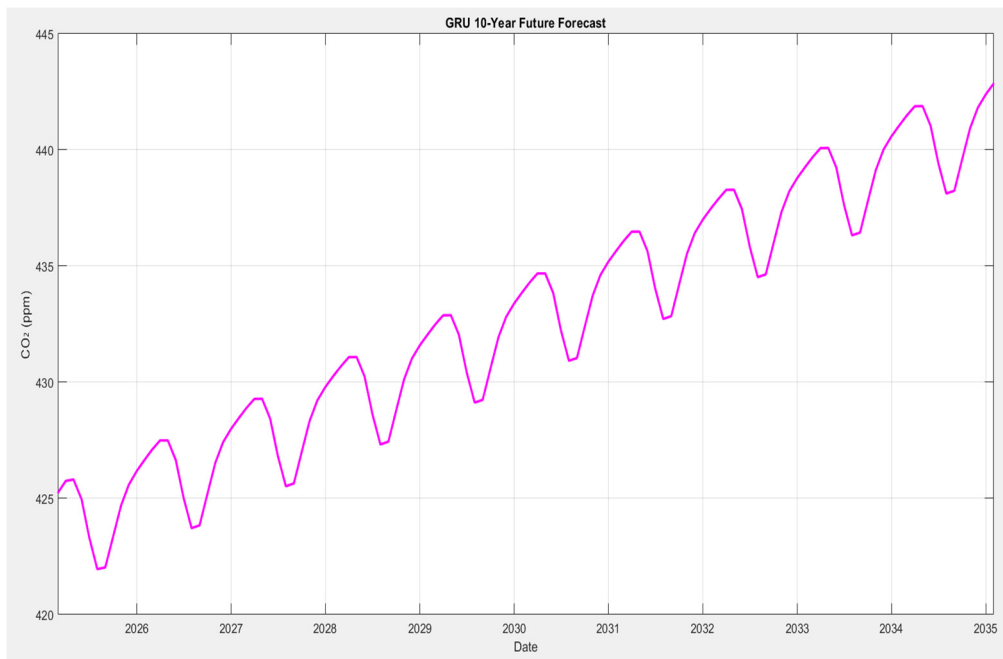


Figure 10. Predicted CO₂ concentration in future from March 2025 to December 2033 with GRU model

A testing capacity of the Long Short-Term Memory (LSTM) model is demonstrated in Figure 7 for the atmospheric CO₂ prediction from 2016 to 2025. Figure 7 briefly explores the robustness of the trained LSTM network, which is trained on invisible data to estimate the forecasting accuracy against the true observations. Furthermore, the performance metrics reported in Table 1 demonstrate the robustness of the LSTM algorithm. In Figure 11, a wide range of future atmospheric CO₂ concentration analyses is considered, starting from March 2025 to December 2034. Likewise, those findings suggest a steady increase in CO₂ availability in the atmosphere from 425.23 ppm to 442.26 ppm across the time interval. More specifically, the lowest CO₂ level is determined to be 435.71 ppm in August 2033 and the lowest CO₂ value is 437.51 ppm in August 2034; the total increase is detected to be 1.8 ppm. Also, quite similar increases in CO₂ content are observed in other models, which generalizes the learned sequential dependencies beyond the training period. All in all, the four models (ARIMA, FNN, GRU, and LSTM) agree on a continuous rise in atmospheric CO₂ levels between March 2025 and early 2035, with CO₂ concentrations starting from approximately 425 ppm in early 2025 to between 442 - 443 ppm by the end of 2034. Despite methodological variations, each model independently confirms a steady increase in atmospheric CO₂ values of 1.7-1.9 ppm per year. This multi-model agreement highlights the reliability of the model's future projections and the soundness of the forecasting framework.

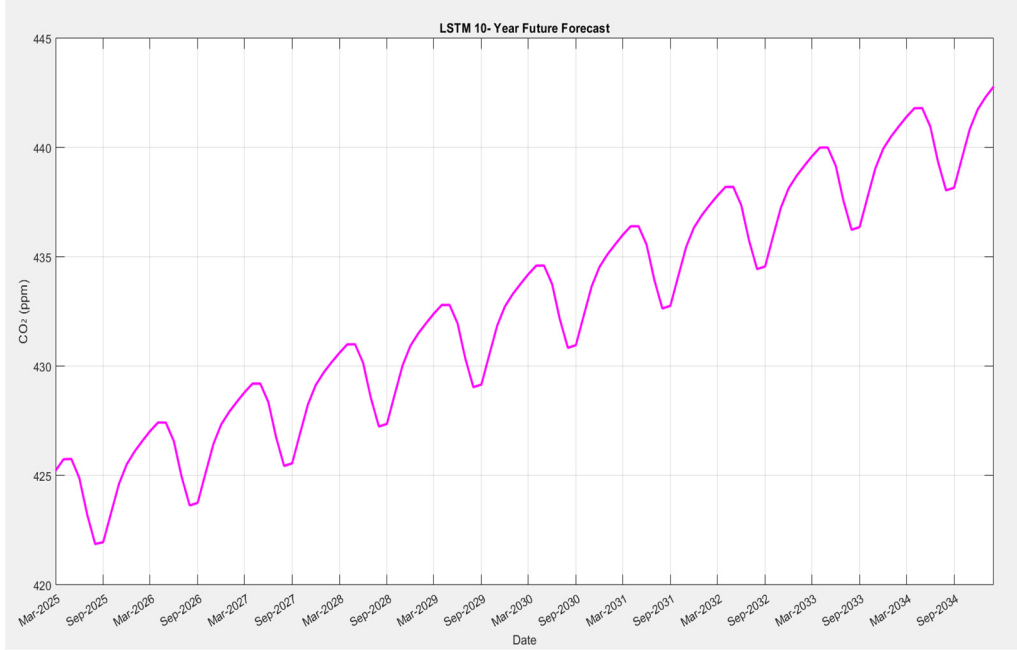


Figure 11. Predicted CO₂ concentration in future from March 2025 to December 2033 with LSTM model

4. CONCLUSIONS

In this study, various models were developed to estimate current and future CO₂ concentrations by using data recorded between January 1979 and February 2025. Four different models were generated and compared with each other, namely ARIMA, FNN, GRU, and LSTM. A total of 554 global monthly data points were applied to train and test generated models. Then each developed model was also used to forecast CO₂ concentrations for the future 110 months, from March 2025 to February 2035. Among all developed models, the LSTM model yielded the best prediction accuracy with a MAPE of 0.05%, an MAE of 0.2028 ppm, and an RMSE of 0.3216 ppm. Whereas GRU and FNN techniques also obtained good results with the same MAPE of 0.05%, their MAE and RMSE values were a bit greater. On the other hand, the conventional statistical approach, which is called the ARIMA model, yielded the worst performance with an MAPE of 0.06%, an MAE of 0.2488 ppm, and an RMSE of 0.3672 ppm, revealing limited ability in handling nonlinear trends and seasonal dynamics. The four models (ARIMA, FNN, GRU, and LSTM) agree on a continuous rise in atmospheric CO₂ level between March 2025 and early 2035, predicting CO₂ concentrations starting from approximately 425 ppm in early 2025 to between 442 to 443 ppm by the end of 2034. Despite methodological variations, each model independently confirms a steady increase in atmospheric CO₂ values at an average increase of 1.7-1.9 ppm per year. This multi-model agreement highlights the model's reliability of the future projections and the sound of the forecasting framework. The results of this work reveal the strong performance of the LSTM technique in modeling complex environmental time series such as atmospheric CO₂. This study shows the applicability and accuracy of AI-based prediction techniques in climate-related applications and supplies a stable methodological framework for future investigation in environmental monitoring, climate policy planning, and data-driven sustainability initiatives.

5. REFERENCES

1. Liu, Z., Deng, Z., Davis, S. & Ciais, P. (2023). Monitoring Global Carbon Emissions in 2022. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(4), 205-206.
2. Liu, B., Chang, H., Li, Y. & Zhao, Y. (2023). Carbon emissions predicting and decoupling analysis based on the PSO-Elm combined prediction model: Evidence from chongqing municipality, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(32), 78849-78864.
3. Wang, B. & Liu, J. (2024). Impact of climate change on green technology innovation-an examination based on microfirm data. *Sustainability*, 16(24), 11206.

4. Arora, N.K. (2019). Impact of climate change on agriculture production and its Sustainable Solutions. *Environmental Sustainability*, 2(2), 95-96.
5. Fan, Z., Yan, Z. & Wen, S. (2023). Deep Learning and Artificial Intelligence in sustainability: A review of sdgs, renewable energy, and environmental health. *Sustainability*, 15(18), 13493.
6. Li, X. & Zhang, X. (2023). A comparative study of statistical and machine learning models on carbon dioxide emissions prediction of China. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(55), 117485-117502.
7. Yildirim, M., Bingol, H., Cengil, E., Aslan, S. & Baykara, M. (2023). Automatic classification of particles in the urine sediment test with the developed artificial intelligence-based hybrid model. *Diagnostics*, 13(7), 1299.
8. Al Nuaimi, H.S., Acquaye, A. & Mayyas, A. (2025). Machine learning applications for carbon emission estimation. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 27, 200263.
9. Ma, Y., He, P.J., L, F., Zhang, H., Yan, S., Cao, D., Mao, H. & Jiang, D. (2024). Machine learning-based prediction of the CO₂ concentration in the flue gas and carbon emissions from a waste incineration plant. *ACS ES&T Engineering*, 4(3), 737-747.
10. Begum, A.M. & Mobin, M.A. (2025). A machine learning approach to carbon emissions prediction of the top eleven emitters by 2030 and their prospects for meeting Paris agreement targets. *Scientific Reports*, 15(1), 1-40.
11. Alhussan, A.A., Metwally, M. & Towfek, S.K. (2025). Predicting CO₂ emissions with advanced deep learning models and a hybrid greylag goose optimization algorithm. *Mathematics*, 13(9), 1481.
12. Ayaz, İ. (2024). Forecasting co₂ emissions with machine learning methods: Türkiye example and future trends. *NATURENGS MTU Journal of Engineering and Natural Sciences Malatya Turgut Ozal University*, 5(2), 82-87.
13. Uluocak, İ. (2025). Comparative study of emission prediction using deep learning models. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 40(2), 337-346.
14. Aslan, E. (2024). Araçlarda CO₂ emisyonlarının farklı yapay sinir ağı modelleri kullanılarak tahminlerinin karşılaştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(2), 309-324.
15. What Is ARIMA Modeling, (2023). *Master's in Data Science*, edX.org, [Online]. Available: <https://www.mastersindatascience.org/learning/statistics-data-science/what-is-arima-modeling>. Access date: 20.10.2025.
16. Koçak, H. (2024). Time series prediction of temperature using Seasonal Arima and LSTM models. *Gazi Journal of Engineering Sciences*, 9(3), 574-584.
17. Kaur, J., Parmar, K.S. & Singh, S. (2023). Autoregressive models in environmental forecasting time series: A theoretical and application review. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(8), 19617-19641.
18. Box, G.E.P., Jenkins, G.M. & Reinsel, G.C. (1994). *Time series analysis: forecasting and control*. 3rd edn. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
19. Hornik, K., Stinchcombe, M. & White, H. (1989). Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural Networks*, 2(5), 359-366.
20. Engelbrecht, A.P. (2007). *Computational intelligence: an introduction*. Wiley, New York.
21. Abdulkarim, S.A. & Engelbrecht, A.P. (2020). Time series forecasting with feedforward neural networks trained using particle swarm optimizers for dynamic environments. *Neural Computing and Applications*, 33(7), 2667-2683.
22. Milano, P. & Elettrotecnica, D. (2004). PSO as an effective learning algorithm for neural network applications. *Proceedings. ICCEA 2004. 3rd International Conference on Computational Electromagnetics and Its Applications*, , 557-560.
23. Tumse, S., Bilgili, M. & Sahin, B. (2022). Estimation of aerodynamic coefficients of a non-slender delta wing under ground effect using artificial intelligence techniques. *Neural Computing and Applications*, 34(13), 10823-10844.
24. Arora, I., Gambhir, J. & Kaur, T. (2020). Data normalisation-based solar irradiance forecasting using artificial neural networks. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(2), 1333-1343.
25. Hochreiter, S. & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735-1780.
26. Mathworks, (2020). *Long short-term memory networks*. <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ug/longshort-term-memory-networks.html>. Access date: 20.10.2025.

27. Mateus, B.C., Mendes, M., Farinha, J.T., Assis, R. & Cardoso, A.M. (2021a). Comparing LSTM and GRU models to predict the condition of a pulp paper press. *Energies*, 14(21), 6958.
28. Lynn, H.M., Pan, S.B. & Kim, P. (2019). A deep bidirectional GRU network model for biometric electrocardiogram classification based on recurrent neural networks. *IEEE Access*, 7, 145395-145405.

Effects Carbon Dioxide Curing on 3D Printed Cement Paste Incorporating Magnesium Oxide

Abdullah Huzeyfe AKCA^{1,a}, Shiho KAWASHIMA^{2,b}

¹Yildiz Technical University, Department of Civil Engineering, İstanbul, Türkiye

²Columbia University, Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, New York, USA

^aORCID: 0000-0003-1151-5520; ^bORCID: 0000-0002-3332-3936

Article Info

Received : 09.05.2025

Accepted : 11.11.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1696395

Corresponding Author

Abdullah Huzeyfe AKCA

aakca@yildiz.edu.tr

Keywords

3D printing

Carbonation

Magnesium oxide

Microstructure

How to cite: AKCA, A.H., KAWASHIMA, S., (2025). Effects Carbon Dioxide Curing on 3D Printed Cement Paste Incorporating Magnesium Oxide. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(4), 889-898.

ABSTRACT

Magnesium oxide cement is a promising alternative to Portland Cement considering its carbon capture ability. Hydration of magnesium oxide produces magnesium hydroxide with a low compressive strength. However, after carbon dioxide curing application significant strength development can be obtained. The efficiency of carbon dioxide curing depends mainly on the depth of carbonation which is related to the surface area/volume ratio. In this study, 3D printed specimens were produced in order to enhance the rate of carbon dioxide penetration. The compression tests and microstructural investigations (TGA, SEM, XRD) were conducted on the specimens. The compressive strength of carbonated 3D printed P0M100 specimens was 7 times higher than of air cured ones. According to microstructural investigations the main form of carbonated magnesium was found to be nesquehonite.

Karbondioksit Kürünün Magnezyum Oksit İçeren 3B Baskılı Çimento Hamuru Üzerindeki Etkileri

Makale Bilgileri

Geliş : 09.05.2025

Kabul : 11.11.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1696395

Sorumlu Yazar

Abdullah Huzeyfe AKCA

aakca@yildiz.edu.tr

Anahtar Kelimeler

3B baskı

Karbonatlaşma

Magnezyum oksit

İç yapı

Atıf şekli: AKCA, A.H., KAWASHIMA, S., (2025). Karbondioksit Kürünün Magnezyum Oksit İçeren 3B Baskılı Çimento Hamuru Üzerindeki Etkileri. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(4), 889-898.

ÖZ

Magnezyum oksit çimentosu, karbon yakalama kabiliyeti de düşünüldüğünde Portland Çimentosu yerine kullanılabilecek umut vadeden bir alternatif olabilir. Magnezyum oksit hidrate olduktan sonra düşük basınç dayanımına sahip magnezyum hidroksit oluşur. Ancak, karbondioksit kürleme uygulamasından sonra malzemede önemli bir dayanım gelişimi elde edilebilir. Karbondioksit kürlemenin verimliliği, esas olarak yüzey alanı/hacim oranıyla ilişkili olan karbonatlaşma derinliğine bağlıdır. Bu çalışmada, karbondioksit penetrasyonu artırarak için 3B yazdırılmış numuneler üretilmiştir. Numuneler üzerinde basınç testleri ve mikro yapısal incelemeler (TGA, SEM, XRD) gerçekleştirildi. Karbonatlaştırılmış 3B yazdırılan P0M100 numunelerinin basınç dayanımı, hava ile kürlenen aynı seri numunelerinkinden 7 kat daha yüksek ölçüldü. Mikro yapısal incelemelere göre, karbonatlı magnezyumun ana formunun nesquehonite olduğu bulundu.

1. INTRODUCTION

When the high demand for concrete is taken into account, Portland cement production has an energy requirement equivalent to 7% of global energy consumption [1, 2]. In addition to carbon dioxide released during the calcination of clinker in the rotary kiln, the fuels used to heat the kiln also release carbon dioxide and the combination of these carbon dioxide emissions makes Portland cement production responsible for 8% of the global carbon emissions. [1-3]. Therefore, the increasing global concrete demand has to be met by sustainable alternatives [4-6]. These alternative products should be used instead of Portland cement or at least partially replace Portland cement in concrete mixtures [7]. Subsequently, comprehensive microstructural characterization and durability assessments are essential to evaluate the performance of these sustainable concretes.

For example, magnesium oxide cement has an important potential to become an environmentally friendly alternative to Portland cement which poses serious environmental problems in the world [8]. Especially, when magnesium oxide is derived from seawater the environmental damage during its production is minimized [9]. Additionally, magnesium hydroxide ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), which can be used as magnesium oxide cement source, is highly abundant in the oceans and seas [9,11-13]. Since magnesium hydroxide requires low calcination temperatures compared to Portland cement calcination the process requires considerably less amount of energy and no toxic gases are emitted during production. Moreover, magnesium oxide powder can be carbonated to gain strength and consume carbon dioxide during concrete production, which can mean negative carbon emission [14,15]. Recent studies on magnesium based materials also showed that magnesium oxide cement has some positive effects on the properties of concrete [9,10].

On the other hand, environmental conditions during hydration and carbonation influence the products of magnesium oxide cement [16-19]. These magnesium based products are mainly nesquehonite ($\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), hydromagnesite ($4\text{MgCO}_3 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) and dypingite ($4\text{MgCO}_3 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) and their strength depends mostly on the conditions during the carbonation process because carbonation causes strength development by filling the pores in the medium. For example, a few researches inferred that nesquehonite showed higher strength than other products due to its denser structure compared to other magnesium carbonate hydrate forms [20]. Unluer and Al-Tabbaa (2012) attributed this behavior to the 2.34x volume increase of magnesium hydroxide due to newly formed needle like structures in its morphology after carbonation [20]. This solid volume increase reduces the voids in the matrix and causes significant increase in rigidity and strength. However, it is very difficult to obtain high quality nesquehonite due to the effects of environmental conditions aforementioned [21]. For example, nesquehonite starts to lose its stability and may turn to other magnesium carbonate hydrates such as hydromagnesite and dypingite. Although these new forms are more stable changes in microstructure may cause reduction in material's strength [22].

Dimensions and the surface area/volume ratio of the materials are important parameters in terms of both carbon dioxide penetration and extent of carbonation. Various materials can be printed by using 3D printing technology with tailored shape and dimensions [23]. In this study it was aimed to increase the carbon penetration surface area of specimens via 3D printing techniques and specimens with infill pattern were produced by 3D printing applications [24]. In order to understand the efficiency of 3D printing application on the extent of carbonation thermal gravimetric analyses and mechanical tests were performed on the specimens.

2. EXPERIMENTAL STUDY

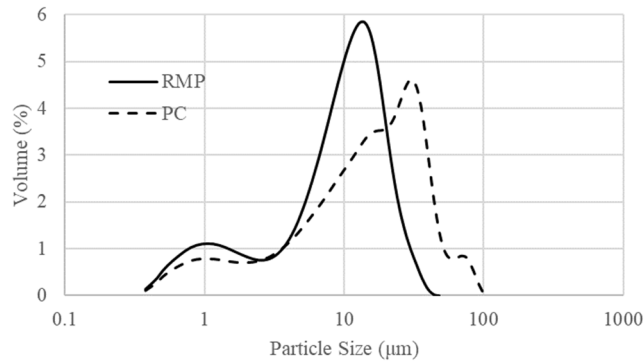
2.1. Materials and Mix Proportions

In the study, CEM I type 42.5 R Portland cement (PC) and reactive magnesium oxide powder (RMP) were used. The chemical compositions of the binders are given in Table 1. Acid neutralization was performed to measure the reactivity of RMP. Phenolphthalein (pH indicator) was added to the mixture of 0.28 g RMP and 50 ml 0.07 mol/l citric acid solution. In this measurement, a shorter neutralization time indicates higher reactivity. The color change, i.e. neutralization, occurred in 195 seconds.

Table 1. The chemical compositions of the binders.

Binder	Chemical Oxide (%)							Loss on ignition
	MgO	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cl	SO ₃	
RMP	98.2	0.8	0.35	0.15	0.1	0.35	0.05	1.7
PC	2.9	62.6	19.1	2.3	5	-	3.3	2.8

Particle size distributions of PC and RMP are given in Figure 1. 0.43 water to binder (w/b) ratio was used for 100% PC paste and 1.1 w/b ratio was used for 100% magnesium oxide paste to obtain similar yield behavior. Mixing proportions of other hybrid groups were determined considering 10% and 50% paste replacement of cement paste by volume. Binder powders and water were mixed for two minutes with a hand mixer and the paste sample was immediately poured into the syringe mold. 3D printed cylindrical specimens were produced by using four different mixtures (Table 2). Printing pattern and 3D printing of the specimens by using a syringe based 3D printer are shown in Figure 2. Two hours after printing the specimens were moved to their curing medium. The in-seam for the infill pattern specimen was rotated by 3.5° for every subsequent layer. The rheological properties of mixtures affected the dimensions of the 3D printed specimens, especially their radius. The dimensions of the specimens are given in Table 3. The average radius of the 3D printed specimens was $27.3 \text{ mm} \pm 0.4 \text{ mm}$ and the average height of the 3D printed specimens was $25.5 \pm 0.6 \text{ mm}$. The wall thickness of the specimens was 4 mm. Compared to the total surface area/volume ratio of a solid cylinder, that of 3D printed specimens increased 2.5 times. By this way it is aimed to facilitate carbon dioxide penetration to the 3D printed specimens.

**Figure 1.** Particle size distributions of RMP and PC**Table 2.** Mix proportions and specimen designations.

Specimen group	w/b	Water (kg/m ³)	Portland cement (kg/m ³)	RMP (kg/m ³)
P0M100	1.1	800	0	730
P50M50	0.67	690	670	360
P90M10	0.47	600	1200	70
P100M0	0.43	580	1340	0

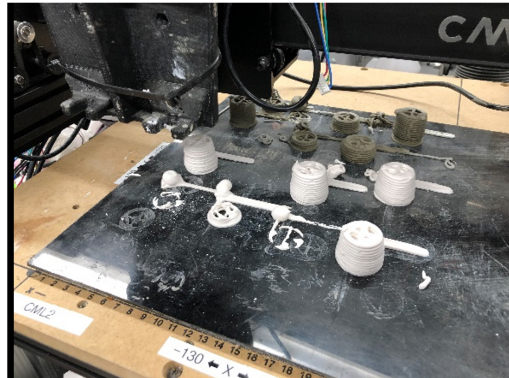
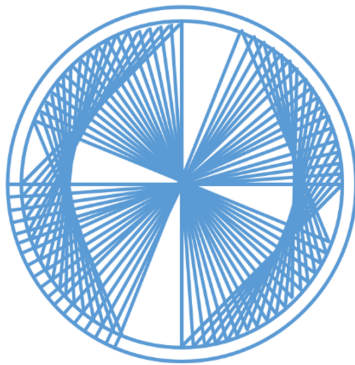
**Figure 2.** Printing pattern of specimens (left), 3D printing of specimens (right)

Table 3. Dimensions of the 3D printed specimens

Curing	Specimen number	P0M100		P50M50		P90M10		P100M0	
		Ø (mm)	h (mm)	Ø (mm)	h (mm)	Ø (mm)	h (mm)	Ø (mm)	h (mm)
%10 CO ₂	1	27.3	25.1	27.1	25.2	27.8	26.2	27.6	25.4
	2	27.2	25.3	27.1	25.7	28.3	26.1	27.8	25.2
	3	27.2	25.9	27.5	25.0	27.0	26.7	26.9	25.7
Air	1	27.2	25.0	27.7	25.2	27.1	26.4	27.0	25.0
	2	27.1	25.2	27.5	25.0	27.6	26.2	27.3	25.0
	3	27.1	25.1	27.1	25.8	26.9	26.6	27.9	25.0

Ø represents the diameter of the 3D printed specimens
h represents the height of the 3D printed specimens

2.2. Rheological Tests

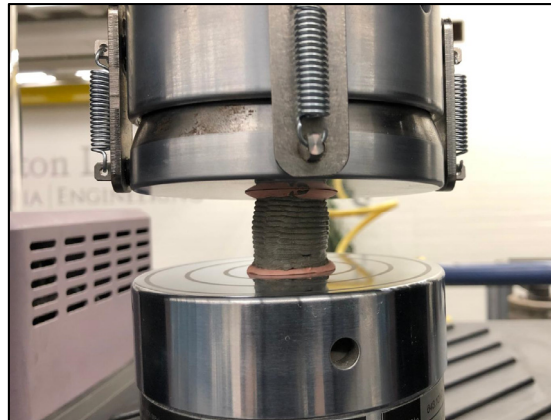
Binder powders and water were mixed for two minutes with a hand mixer and the paste sample was poured on a rheometer plate. Platen adjustment was completed in two minutes and each test started at 5th minute of mixing. Parallel plates were used to test the sample and the rheological properties were monitored during the test.

2.3. Curing

Specimens were subjected to CO₂ and air curing. Half of the specimens were cured in a carbon dioxide incubator at 20% ± 1% CO₂ concentration, 25°C ± 2°C temperature and 85% ± 5% RH for 7 days and the remaining specimens were kept in an air curing chamber at temperature of 25°C ± 3°C and a RH of 70% ± 10% for 7 days. At the end of curing period compression tests and thermal gravimetric analyses were conducted on the 3D printed specimens.

2.4. Compression Test

Before compression tests capping was applied by using dental stone gypsum. The dimensions of the specimens varied since their rheological properties were not exactly the same. Therefore, displacement controlled loading was applied in this study instead of load-rate controlled loading. The compression tests were performed using an electromechanical testing machine (MTS Criterion C43 Universal Testing Machine, MTS, USA) with a loading rate of 0.15 mm/min as it is shown in Figure 3.

**Figure 3.** Compression test of a 3D printed specimen

2.5. Thermal Gravimetric Analysis

After the compression tests, the broken samples were ground into powder using a mortar and pestle and sieved using a 150 µm sieve. 20 mg of sample was taken from the powder mixture and loaded into the thermal gravimetric analyzer (TGA Q50, TA Instruments, USA). The temperature was increased linearly from 25 to 1000 °C with a heating rate of 20 °C/min under a nitrogen flow of 60 mL/min.

3. RESULTS

3.1. Rheological Test Results

Parallel plates were used to test the sample and the rheological properties were monitored during the test. Table 4 shows rheological properties of all the groups. The results showed that replacement of 10% of Portland cement paste with magnesium oxide paste had no significant effect on rheological properties of the paste but 50% replacement affected rheological properties prominently.

Table 4. Rheological properties of all the mixtures

Specimen group	Yield strength (Pa)	Storage modulus (kPa)	Plastic viscosity (Pas)
P0M100	47.6	23.84	1.21
P50M50	327.7	161.90	4.12
P90M10	62.5	48.30	1.88
P100M0	57.0	54.80	1.97

3.2. Compression Test Results

Compression tests were applied on the specimens after curing by using a uniaxial compression testing device. Cross-sectional area of each of the 3D printed specimens were determined by using Equation 1.

$$A = \frac{\pi}{4} (\emptyset^2 - (\emptyset - 2t)^2) + 2 \times (\emptyset - 2t) \times t \quad (1)$$

A is the calculated cross-sectional area, $\emptyset$ is the measured diameter, t is the wall thickness (4 mm). After compression tests the peak loads were recorded and by using the calculated cross-sectional areas of the specimens their compressive strength values were calculated. The measured peak load and the calculated cross-sectional area of the specimens were given in Table 5. The average compressive strength value of each group was given in Figure 4. Also, increase in the compressive strength of specimens after carbonation was calculated and given in Table 6.

Table 5. The measured peak loads and the calculated cross-sectional areas of the specimens

Curing	Specimen number	P0M100		P50M50		P90M10		P100M0	
		P.L. (kN)	A (mm ²)	P.L. (kN)	A (mm ²)	P.L. (kN)	A (mm ²)	P.L. (kN)	A (mm ²)
%10 CO ₂	1	10.10	447	11.10	443	13.12	457	8.95	453
	2	11.27	445	10.85	443	11.91	468	9.92	457
	3	9.85	445	11.53	451	11.72	441	10.15	439
Air	1	1.29	445	3.68	455	2.35	443	6.21	441
	2	1.58	443	4.35	451	3.22	453	5.71	447
	3	0.85	443	2.44	443	2.20	439	6.13	460

P.L. represents the peak load

A represents the cross-sectional area

The compressive strength of 3D printed P100M0 and P90M10 specimens was measured as 13.3 MPa and 5.9 MPa after 7 days of air curing. On the other hand, the compressive strength of 3D printed P50M50 and P0M100 specimens was measured as 7.7 MPa and 3.0 MPa after 7 days of air curing. Probably, the increased surface area of the 3D printed specimens caused rapid drying which may reduce compressive strength during air curing [23,25].

Moreover, 3D printed specimens incorporating magnesium oxide showed higher strength development after carbonation. P0M100 specimens showed 698% increase in the compressive strength while P100M0 specimens showed only 58% increase in the compressive strength after 7 days of carbon dioxide curing. According to the results it seems that carbonation of MgO has much more potential to improve the compressive strength than Portland cement. Since magnesium based specimens has much more potential for carbonation the increase surface area caused prominent strength development compared to the specimens incorporating Portland cement.

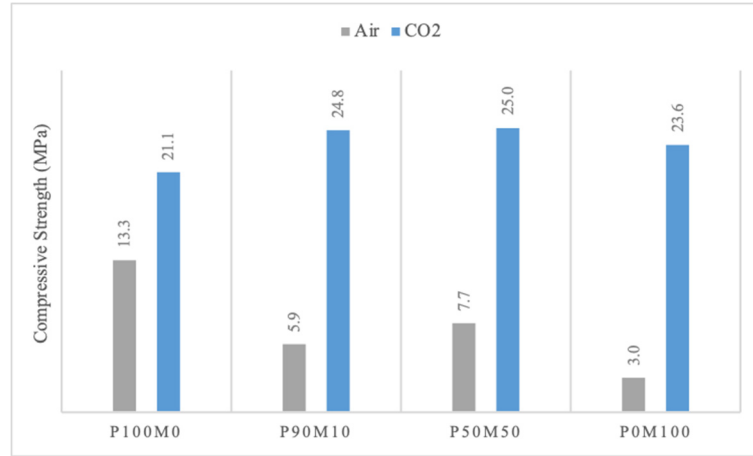


Figure 4. Compressive strength of 3D printed specimens at 7 days

Table 6. Improvement in the compressive strength of 3D printed specimens after carbonation

Specimen group	Improvement in compressive strength after carbonation (%)
P0M100	698
P50M50	223
P90M10	320
P100M0	58

3.3. Thermal Gravimetric Analysis Test Results

Powder samples were taken from the specimens after compression tests and these samples were subjected to thermal gravimetric analysis. The samples were heated up to 1000°C and after analysis Differential thermogravimetry (DTG) curves were obtained. Figure 5 shows DTG results of all the groups.

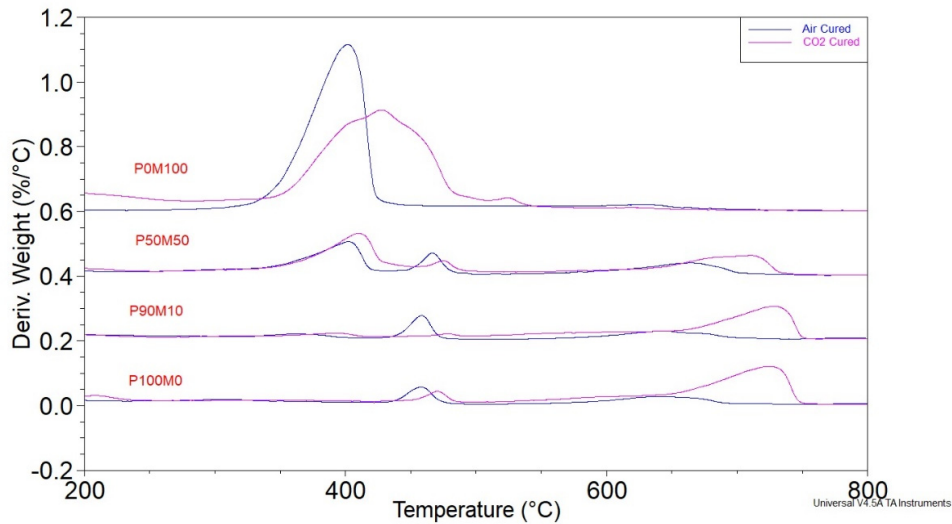


Figure 5. DTG diagrams of all the 3D printed groups

DTG peaks give information about phase changes in the material and the peaks around 450°C and 700°C in PC based materials represent dehydration of calcium hydroxide and decarbonation of calcium carbonates [26, 27]. Similarly, the peaks around 400°C and 450°C in RMP based materials represent decomposition of magnesium hydroxide and hydrated magnesium carbonates [28]. According to the results it can be concluded that carbon dioxide curing caused reduction in the amount of both hydroxide compounds in the 3D printed specimens and caused increase in the amount of both carbonated compounds. The total amount of calcium carbonate in the hybrid groups was very close to that of only PC paste after carbonation. There was an additional peak at 525 °C representing the presence of magnesium carbonate (Magnesite) in P0M100 specimens [22].

3.4. X-ray Diffraction Test Results

X-ray diffraction (XRD) tests were conducted on the sample taken from 3D printed specimens and XRD results are given in Figure 6.

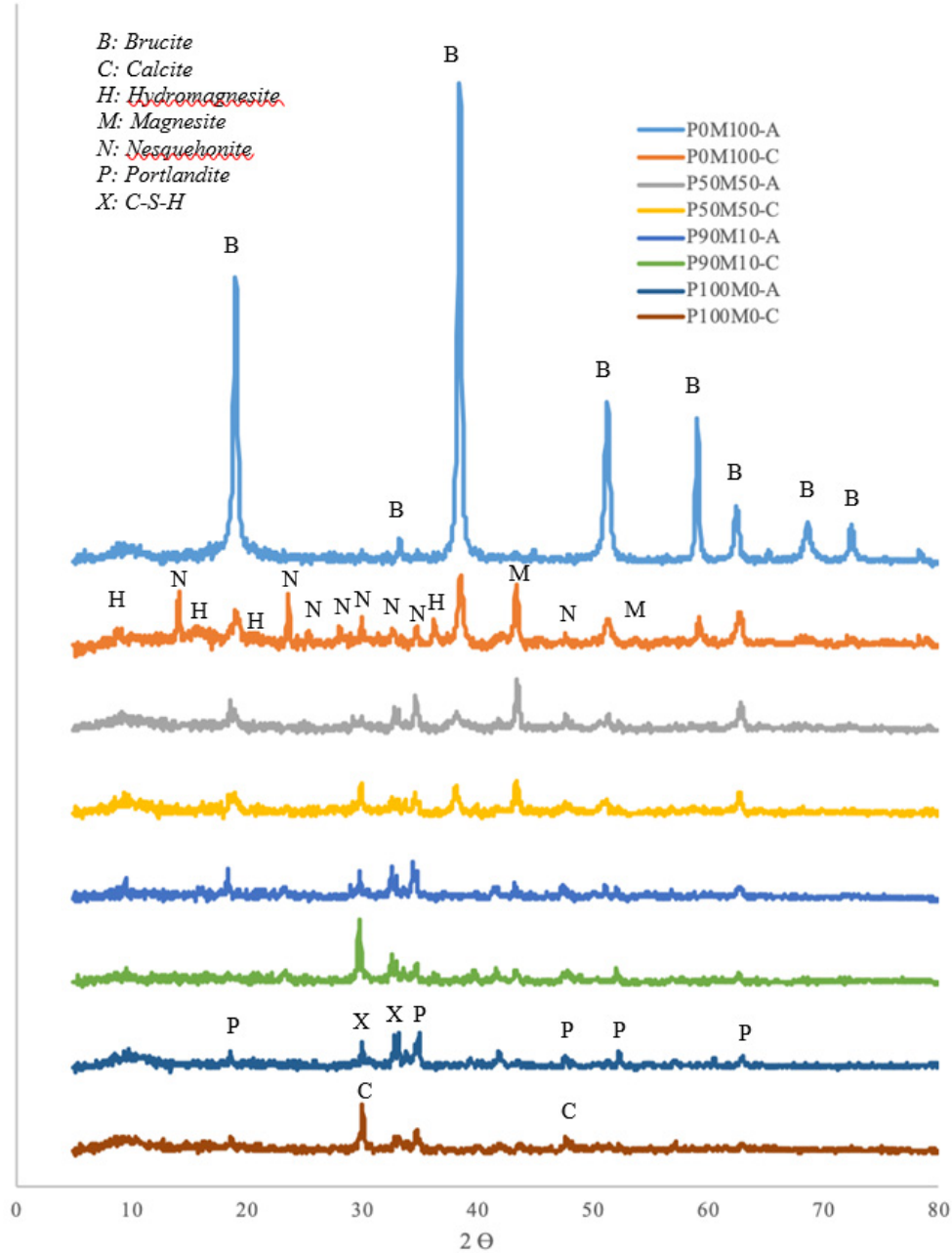


Figure 6. XRD results of 3D printed specimens

Results showed that hydroxide contents of the specimens turned to carbonated forms after carbonation. Calcium hydroxide (Portlandite) content decreased in the specimens incorporating PC and it turned to calcium carbonate (Calcite) after carbonation and similarly magnesium hydroxide (Brucite) content decreased in the specimens incorporating RMP and it turned to carbonated forms such as nesquehonite, hydromagnesite and magnesite. As it is seen in the XRD results a significant change was observed in P0M100 specimens after carbonation. Therefore, the prominent strength development in P0M100 specimens after carbon dioxide curing can be attributed to this massive phase transformation in P0M100 due to carbonation.

3.5. SEM Investigation

SEM analyses were conducted on the samples taken from 3D printed specimens and SEM images are given in Figure 7. Overall morphology of P0M100 sample after carbonation can be considered as nesquehonite while the overall morphology of P100M0 sample is calcite. There are some magnesium rich crystals, probably nesquehonite, among calcite formations in the P90M10 specimens. However, the microstructure of P50M50 is very complicated since it has various hydrated and carbonated forms in it.

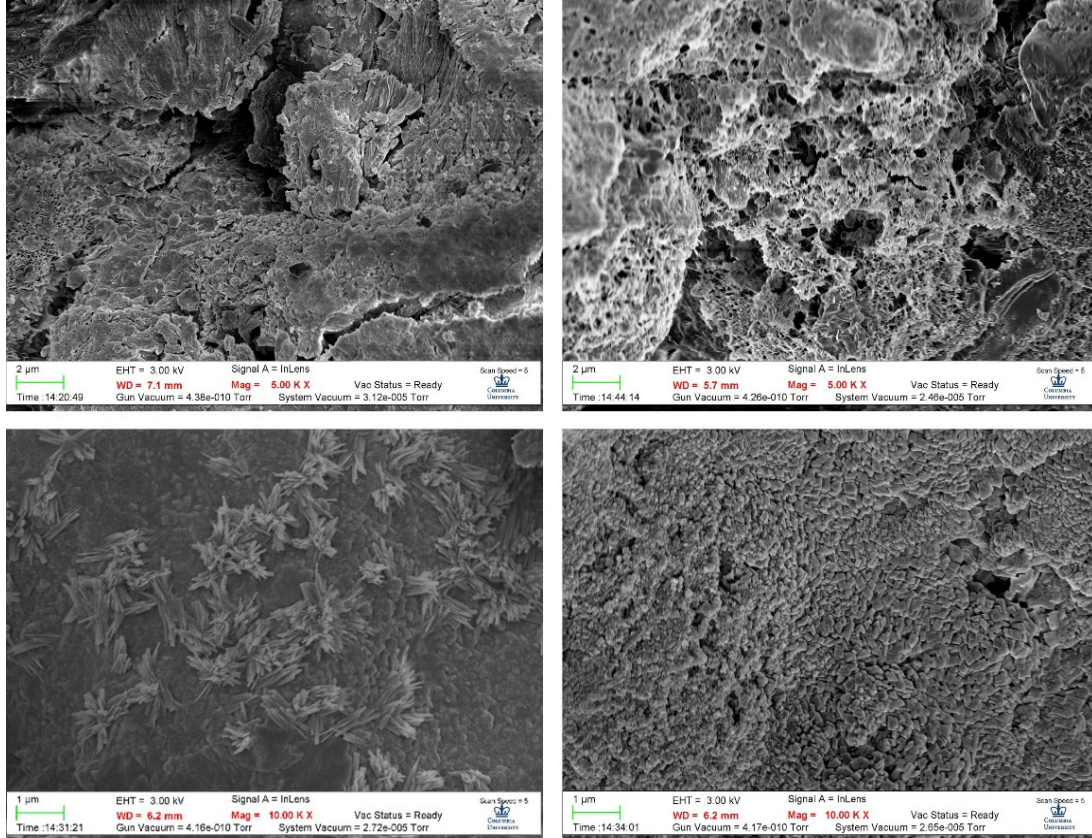


Figure 7. SEM images of P0M100 (upper left), P50M50 (upper right), P90M10 (lower left), P100M0 (lower right) after carbonation

4. CONCLUSIONS

This study investigated 3D-printed specimens produced with four mix designs (as defined in Section 2.1) and compared CO₂-cured versus air-cured conditions. For the Mg-based printable paste P0M100, CO₂ curing increased compressive strength by 7 times relative to its air-cured counterpart. The carbonated P0M100 specimens achieved strengths that were 12% higher than carbonated P100M0 and 77% higher than air-cured P100M0 controls. The strength gains are consistent with the formation of Mg-carbonate phases under CO₂ curing and the microstructural analyses identified nesquehonite as the dominant carbonate. Since nesquehonite is unstable above 50 °C [10], the thermal durability of CO₂-cured Mg-based materials may be limited and exposure to elevated temperatures can influence the carbonate content and compromise strength. Overall, CO₂ curing of Mg-based printable pastes can be considered an effective route to early and significant strength for pattern filled design.

Considering the carbon dioxide uptake capacity of magnesium based materials these results are promising for a better future. With the improvements in the technology, 3D printing applications will be more common in the world and it will be probably easier to harvest magnesium based materials from seawater [9]. Future work should target the efficiency of carbonation on larger specimens and systematic durability tests under elevated temperatures to establish service limits.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to acknowledge Columbia University's School of Engineering and Applied Science (SEAS) Interdisciplinary Research Seed (SIRS) Program for financial support, and technical support by the staff of Columbia University's Carleton Laboratory. The first author is grateful for the financial support given by The Scientific and Technical Research Council of Turkey (TÜBİTAK). We also thank Siwei Ma and AlaEddin Douba for fruitful discussions throughout this work.

6. REFERENCES

1. Andrew, R.M. (2022). Global CO₂ emissions from cement production. *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 195-217.
2. US Geological Survey (2022). *Mineral commodity summaries 2021* (Mineral Commodity Summaries, US Geological Survey, Reston, VA, USA).
3. Al-Antaki, T.S.W. & Niş, A. (2025). The influence of using basaltic pumice powder as a binder on the mechanical strength of geopolymer mortars. *Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering*, 40(3), 687-697.
4. Mehmetoğlu, M. (2023). Strength investigation of slag-based geopolymer composites incorporating different amounts of colemanite waste and silica fume under different exposure conditions. *Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering*, 38(3), 841-849.
5. International Energy Agency (2018). *Technology roadmap-Low-Carbon transition in the cement industry*.
6. Allen, M., Babiker, M., Chen, Y., de Coninck, H., Connors, S., van Diemen, R., Dube, O., Ebi, K., Engelbrecht, F., Ferrat, M., Ford, J., Forster, P., Fuss, S., Guillén Bolaños, T. Harold, J., Hoegh-Guldberg, O., Hourcade, J.C., Huppmann, D. & Zickfeld, K. (2018). Summary for policymakers, Intergovernmental Panel on Climate Change, 3-24.
7. Shi, C., Jimenez, A.F. & Palomo, A. (2011). New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 750-763.
8. Ma, S., Akca, A.H., Esposito, D. & Kawashima, S. (2020). Influence of aqueous carbonate species on hydration and carbonation of reactive MgO cement. *J. CO₂ Util.*, 41, 101260.
9. Badjatya, P., Akca, A.H., Fraga Alvarez, D.V., Chang, B., Ma, S., Pang, X., Wang, E., Van Hinsberg, Q., Esposito, D.V. & Kawashima, S. (2022). Carbon-negative cement manufacturing from seawater-derived magnesium feedstocks. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 119(34): e2114680119.
10. Akca, A.H., Ma, S., Esposito, D. & Kawashima, S. (2022). Evaluation of mechanical performance of compacted magnesium hydroxide after carbonation curing. *J. Mater. Civ. Eng.*, 34(5), 1-11.
11. Moras, C.A., Cyronak, T., Bach, L.T., Joannes-Boyau, R. & Schulz, K.G. (2024). Effects of grain size and seawater salinity on magnesium hydroxide dissolution and secondary calcium carbonate precipitation kinetics: implications for ocean alkalinity enhancement. *Biogeosciences*, 21, 3463-3475.
12. Fontana, D., Forte, F., Pietrantonio, M., Pucciarmati, S. & Marcoaldi, C. (2023). Magnesium recovery from seawater desalination brines: A technical review. *Environment, Development and Sustainability*, 25(12), 13733-13754.
13. Sano, Y., Hao, Y. & Kuwahara, F. (2018). Development of an electrolysis based system to continuously recover magnesium from seawater. *Heliyon*, 4(11), e00923.
14. Haque, M.A., Dai, J.-G. & Zhao, X.-L. (2024). Magnesium cements and their carbonation curing: A state-of-the-art review. *Low-carbon Materials and Green Construction*, 2(2), 1-27.
15. Dung, N.T. & Unluer, C. (2019). Performance of reactive MgO concrete under increased CO₂ dissolution. *Cement and Concrete Research*, 118, 92-101.
16. Unluer, C. & Al-Tabbaa, A. (2013). Impact of hydrated magnesium carbonate additives on the carbonation of reactive MgO cements. *Cement and Concrete Research*, 54, 87-97.
17. Liska, M. & Al-Tabbaa, A. (2009). Ultra-green construction: reactive magnesia masonry products. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management*, 162, 185-196.
18. Shand, M.A. (2006). *The chemistry and technology of magnesia*. John Wiley & Sons, New Jersey.
19. Taylor, H.F. (1997). *Cement chemistry*. Thomas Telford, London.
20. Unluer, C. & Al-Tabbaa, A. (2012). Effect of aggregate size distribution on the carbonation of reactive magnesia based porous blocks. *18th Annual International Sustainable Development Research Conference*, Hull, UK.

21. Botha, A. & Strydom, C.A. (2001) Preparation of a magnesium hydroxy carbonate from magnesium hydroxide. *Hydrometallurgy*, 62, 175-183.
22. Frost, R.L., Bahfenne, S., Graham, J. & Martens, W.N. (2008). Thermal stability of artinite, dypingite and brugnatellite-Implications for the geosequestration of greenhouse gases. *Thermochimica Acta.*, 475, 39-43.
23. Zhao, H., Wang, Y., Liu, X., Wang, X., Chen, Z., Lei, Z., Zhou, Y. & Singh, A. (2024). Review on solid wastes incorporated cementitious material using 3D concrete printing technology. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03676.
24. Douba, A., Badjatya, P. & Kawashima, S. (2022). Enhancing carbonation and strength of MgO cement through 3D printing. *Construction and Building Materials*, 328, 126867.
25. Jung, I.D., Lee, M.S., Lee, J. & Lee, Y. (2020). Embedding sensors using selective laser melting for self-cognitive metal parts. *Additive Manufacturing*, 33, 101145.
26. Akca, A.H. & Özyurt Zihnioglu, N. (2013). High performance concrete under elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 44, 317-328.
27. Akca, A.H. & Özyurt, N. (2018). Effects of re-curing on microstructure of concrete after high temperature exposure. *Construction and Building Materials*, 168, 431-441.
28. Unluer, C. & Al-Tabbaa, A. (2013). Characterization of light and heavy hydrated magnesium carbonates and their thermal decomposition behavior. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 111(3), 1973-1983.

Mobil Yaşam Alanlarında Karbon Ayak İzinin Azaltılması: Enerji Verimliliği ve Çift Tanklı Su Isıtıcı Modelleri

Mehmet Akif KARTAL ^{1,a}, Ahmet FEYZİOĞLU ^{2,b}

¹Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Uzaktan Eğitim Uygulama ve Araştırma Merkezi, Balıkesir, Türkiye

²Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-9156-8907; ^bORCID: 0000-0003-0296-106X

Makale Bilgileri

Geliş : 25.03.2025

Kabul : 17.11.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665293

Sorumlu Yazar

Mehmet Akif KARTAL

mkartal@bandirma.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Tank kontrolü

Sera gazı emisyonu

Karbonsuzlaştırma

LSTM

Maliyet-etkinlik analizi

Atıf şekli: KARTAL, M.A., FEYZİOĞLU, A., (2025). Mobil Yaşam Alanlarında Karbon Ayak İzinin Azaltılması: Enerji Verimliliği ve Çift Tanklı Su Isıtıcı Modelleri. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(4), 899-914.

ÖZ

Bu çalışma, karavan ve mobil konutlar için tek tanklı (STE) ve çift tanklı (DUT) elektrikli su ısıtıcılarını karşılaştırmaktadır. Beş yıllık veri ve LSTM tabanlı yaz tüketim tahminiyle, sıcak su kullanımının mevsimler arası farkının azaldığı ve yıllık %0.56 düşüş gösterdiği belirlenmiştir.

Simülasyonlar, 200 L/1 kW DUT sisteminin STE'ye göre litre başına enerji tüketimini %12.2 azalttığını, Türkiye şebeke emisyon faktörüyle hesaplanan GHG emisyonunu ise ortalama %47.1 düşürdüğünü ortaya koymuştur.

Yüksek başlangıç maliyetine rağmen DUT sistemlerinin geri ödeme süresi ortalama 3.5 yıl (yüksek elektrik fiyatlarında 2.65 yıl) olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar, DUT mimarisinin mobil yaşam alanlarında sürdürülebilir, düşük karbonlu ve ekonomik bir çözüm olduğunu kanıtlamaktadır.

Reducing Carbon Footprint in Mobile Living Spaces: Energy Efficiency and Double Tank Water Heater Models

Article Info

Received : 25.03.2025

Accepted : 17.11.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665293

Corresponding Author

Mehmet Akif KARTAL

mkartal@bandirma.edu.tr

Keywords

Tank control

Greenhouse gas emission

Decarbonization

LSTM

Cost-effectiveness analysis

How to cite: KARTAL, M.A., FEYZİOĞLU, A., (2025). Reducing Carbon Footprint in Mobile Living Spaces: Energy Efficiency and Double Tank Water Heater Models. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(4), 899-914.

ABSTRACT

This study compares single-tank (STE) and dual-tank (DUT) electric water heaters for caravans and mobile homes. Based on five years of data and an LSTM-based summer consumption forecast, it was determined that seasonal differences in hot water usage are decreasing, with an annual decline of approximately 0.56%.

Simulations revealed that the 200 L/1 kW DUT system reduces energy consumption per litre by up to 12.2% compared to STE, and achieves an average 47.1% reduction in GHG emissions (calculated using Turkey's grid emission factor).

Despite the higher initial cost, the payback period for DUT systems is calculated at an average of 3.5 years (as low as 2.65 years in regions with high electricity prices). The results demonstrate that the DUT architecture provides a sustainable, low-carbon, and economically viable hot water solution for mobile living spaces.

1. GİRİŞ

Avrupa Birliği (AB), 2050 yılına kadar net sıfır karbon hedefine ulaşmak için tasarlanmış, iddialı bir plan olan Yeşil Mutabakatı devreye sokmuştur. AB, bu çevre odaklı büyüme modelini benimseyerek, ekonomik ilerleme ile ekolojik sorumluluğu birleştirmeyi ve küresel CO₂ azaltım çabalarına öncülük etmeyi hedeflemektedir [1].

Ayrıca, Paris İklim Anlaşması'nın belirlediği, küresel ısınmayı sanayi dönemi öncesi seviyelere göre 1,5°C'de sınırlama hedefine ulaşmak için, karbonsuzlaşma (dekarbonizasyon) kritik bir zorunluluk haline gelmiştir. GHG salınımını azaltma ve atmosferdeki CO₂ yoğunluğunu düşürme süreci olan karbonsuzlaşma; ileri teknolojilerden (rüzgâr ve güneş enerjisi gibi) toprağın doğal karbon tutma kapasitesini artırmaya yönelik çözümlere kadar geniş bir yelpazede yöntemleri kapsamaktadır. Bu strateji, hem bilimsel camianın hem de hükümetlerin en önemli araştırma ve uygulama gündemidir [2].

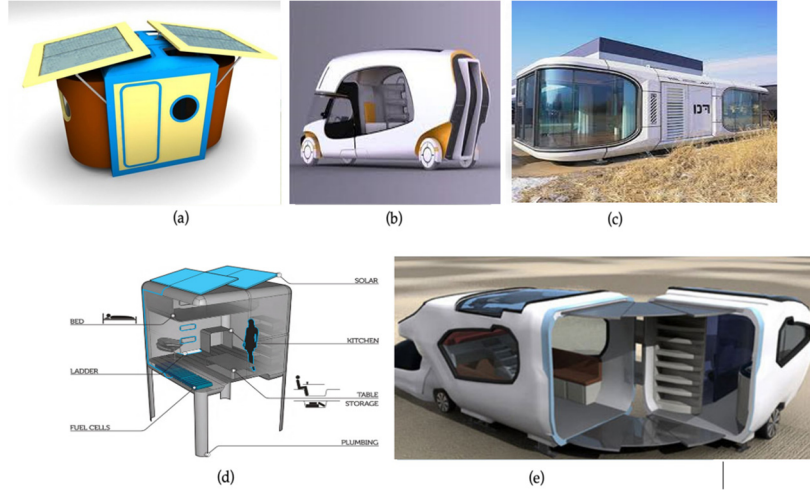
Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan bir modelleme çalışması, Kaliforniya'daki konut tipi su ısıtma sistemlerinin karbonsuzlaştırılmasına odaklanmıştır. Bu analiz, 2050'ye gelindiğinde ısı pompaları, güneş enerjisi ve akıllı sistemlerin entegrasyonu sayesinde, GHG emisyonlarında 1990 seviyesine kıyasla yüzde 80'in üzerinde bir düşüş sağlanabileceğini ve yıllık 10 milyon tonluk bir tasarruf potansiyeli olduğunu göstermektedir. Bu tür bir enerji dönüşümünün ekonomik yükü, teknolojinin gelişimi, enerji maliyetlerindeki değişimler ve hane halkı su tüketimi gibi faktörlere bağlı kalacaktır [3]. Benzer şekilde, konutlarda mekan ve su ısıtmasının elektrifikasyon yoluyla karbonsuzlaştırılması, fosil yakıt kullanımını azaltarak önemli emisyon düşüşleri sağlayabilir [4]. Karbonsuzlaşma, tüm ulusların iklim değişikliğinin yıkıcı etkilerini hafifletmek ve dünya sıcaklığındaki artışı makul sınırlar içinde tutmak için uygulaması zorunlu olan, merkezi bir politikadır. Dolayısıyla emisyon düşürücü yeşil enerjilere de sürekli yönelim gösterilmesi bunun bir sonucudur [5-8].

1.1. Karavancılıkta Sürdürülebilirlik ve Düşük Karbonlu Seyahatin Yükselişi

Günümüzde, seyahat ve konaklama tercihlerinde karavan kullanımı önemli bir yer tutmaktadır. Avrupa'da bu eğilim oldukça güçlüdür; örneğin, Almanya 673.800'ü aşan karavan sayısı ile lider konumdadır, onu 550.000'den fazla karavanla Birleşik Krallık takip etmektedir [9]. Eurostat verilerine göre, 2019 yılında Avrupa Birliği genelinde vatandaşlar 419 milyonu geçkin geceyi karavan veya kampta geçirmişlerdir. Bu konaklamaların büyük bir kısmı Fransa (128,99 milyon), İngiltere (58,95 milyon) ve İtalya'da (54,99 milyon) gerçekleşmiştir. Bu eğilim ABD'de de görülmekte olup, Outdoor Industry Association 2016'da Amerikalıların yaklaşık 587,01 milyon gün kamp yaptığını raporlamıştır [10].

Çevresel etkiler açısından, karavan seyahati giderek daha fazla ilgi odağı olmaktadır. Gezginler artık tatillerinin iklim üzerindeki etkilerini daha fazla önemsemektedir [11]. Heidelberg merkezli Enerji ve Çevre Araştırmaları Enstitüsü (IFEU) tarafından yapılan bir değerlendirme, karavanla yolculuk yapmanın, uçakla seyahate veya otel konaklamasına kıyasla daha düşük sera gazı salımına neden olduğunu ortaya koymuştur [12]. Benzer şekilde, Öko-Institut tarafından 2007 ve 2013'te yapılan iki çalışma, karavancılığın genel olarak olumlu bir iklim dengesi sunduğunu desteklemektedir [12]. Başka bir analiz, karavan/kamp tatilinin, uluslararası yolculuklara göre daha az maliyetli ve daha az zaman gerektirdiğini belirtmektedir. Tipik bir aile, karavanla seyahat ederek ulaşım harcamalarından %92'ye, CO₂ emisyonlarından ise %95'e varan oranda tasarruf sağlayabilirken, yolculuk süresi de yaklaşık 8,6 saat azalmaktadır [10]. Çevreye duyarlı karavan ve mobil ev tasarımları da bu trendi desteklemektedir. Şekil 1'de görülen, (a), (b), (c) T-Van, (d) Habitat microhome ve (e) ForFreedom gibi yeni nesil mobil evler, sürdürülebilirlik, aerodinamik ve fütüristik görünüme odaklanmaktadır.

Bu araçlar genellikle güneş enerjisi panelleri, gelişmiş yalıtım, entegre tuvalet ve su sistemleri gibi donanımlarla çevresel ayak izlerini minimize etmektedir [13]. Ayrıca, bina entegre fotovoltaiik (BIPV) sistemler içeren solar ev tasarımları, yenilenebilir enerji entegrasyonu ile karavan ve mobil yapıların sürdürülebilirliğini daha da artırabilir [14]. Bu çalışmanın temel hedefi, kamp ve mobil ev sektöründe kullanılan elektrikli su ısıtıcısı (EWH) tankları için optimum bir model geliştirmektir. Daha az enerji tüketen, dolayısıyla daha düşük karbon salımına yol açan bu yeni modelin, karavanların çevre dostu ve sürdürülebilir niteliklerine önemli bir katkı sağlaması beklenmektedir.



Şekil 1. Çevre dostu karavan ve mobil evler: (a) , (b) , (c) T-Van, (d) Habitat microhome mobil ev, (e) ForFreedom karavan [13]

Karavanlarda sıcak su depolama ve ısıtma çözümlerinin iyileştirilmesi, karavan tatillerini daha cazip hale getirecek ve dolaylı olarak düşük karbonlu turizmi teşvik edecektir. Mevcut karavan su ısıtma sistemleri, genellikle gaz, elektrik, dizel veya bunların hibrit kombinasyonları ile çalışabilmektedir [15]. Karavanlar için iki temel sıcak su sistemi türü mevcuttur: suyu bir tankta depolayan depolamalı sistemler ve suyu anlık olarak ısıtan sürekli akışlı (tankless) sistemler [16]. Bu çalışma, kavramsal olarak DTE tarafından tasarlanan, düşük enerji tüketimi ve karbon emisyonu vadeden yeni bir EWH modelini geliştirmeyi ve bu modeli piyasada yaygın olarak kullanılan tek tanklı modellerle karşılaştırmayı amaçlamaktadır.

1.2. Konut Sektöründe Karbonsuzlaştırma Stratejileri ve Elektrikli Su Isıtıcısı Tank Sistemlerinin Enerji Performansı Analizi

Konut sektörü, toplam enerji talebinin artmasında kritik bir rol oynamaktadır. Evlerdeki elektrikli cihazların yaygınlaşması ve kullanım yoğunluğunun yükselmesi hem enerji rezervlerini zorlamakta hem de zararlı çevresel salımları artırmaktadır. Bu meydan okumaya karşı en etkili çözüm, bina yapılarının karbondan arındırılmasıdır. Yenilenebilir güç kaynaklarının entegrasyonu ve binaların enerji performansının yükseltilmesiyle maliyetler düşürülebilirken, ekolojik etkiler de azaltılabilmektedir. Mevcut potansiyelin yüksek olması, bu yönde acil eyleme geçilme gereğini ortaya koymaktadır [17-19]. Avrupa'da yapılan araştırmalar, bina içi elektrik kullanımının artırılması ve özellikle ısı pompaları gibi verimli teknolojilerin, emisyonların düşürülmesindeki kilit rolünü teyit etmektedir [20-22]. Amerika Birleşik Devletleri'nde konutlarda fosil yakıt tüketimi, 2014 yılında ülkenin toplam sera gazı salımlarının (yaklaşık 345,09 milyon metrik ton CO₂ eşdeğeri) yaklaşık %4,99'unu oluşturmuştur [23]. Bu tüketimin büyük kısmı (%69,01) mekân ısıtmasından, önemli bir kısmı ise (%22,10) su ısıtmasından kaynaklanmaktadır [24]. Türkiye gibi doğal gaz fiyatlarının yüksek olduğu bölgelerde, elektrikle çalışan yeni nesil ısıtma cihazları maliyet avantajları nedeniyle tüketiciler tarafından daha çok tercih edilmektedir.

Elektrikli su ısıtıcıları (EWH) ve klimalar, buzdolabı veya çamaşır makinesi gibi diğer ev aletlerine kıyasla yüksek güç gereksinimine sahiptir. Bazı ülkelerde EWH sistemleri, şebekedeki en yüksek talep anlarının önemli bir bölümünü karşılayarak diğer ev aletlerinin %29'undan fazla enerji tüketebilmektedir [25]. Bu sistemlerin en çok iyileştirilme ihtiyacı olan bileşeni EWH tankıdır; çünkü bu tanklar hem ciddi miktarda ev enerjisi harcar hem de termal depolama yetenekleri sayesinde şebekenin pik talep anlarına uyum sağlamak için büyük güç kullanma eğilimindedir [26]. Bu durum, su ısıtıcılarında verimliliği artırmak için konutların anlık talebine uyum sağlayabilen kontrol mekanizmaları geliştirmeyi ve en uygun yönetim sistemini seçmeyi zorunlu kılmaktadır [27-29].

Sıcak su ısıtıcılarının enerji verimliliği, çeşitli koşullar altında pek çok araştırmada incelenmiştir. Bir çalışma, düşük hacimli sıcak su çekimi yapan ailelerin verilerine dayanarak tipik sıcak su tüketim desenlerini belirlemiştir [30-31]. Bu tüketimlerin kısa aralıklarla (yalnızca 10 ila 20 dakika aryla) gerçekleşme eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Dinamik bir boru modeli kullanılarak yapılan analizde, ortalama haneler için boru hatlarındaki termal kayıpların, sıcak su tankının sağladığı toplam termal

enerjinin %19 dan fazlasını aştığı tespit edilmiştir. Boru yalıtımı uygulamasının bu kayıpları %5 ila %7 aralığına düşürebileceği öne sürülmüştür [30].

ABD hanelerinden elde edilen ortalama saatlik sıcak su talep profili referans alınarak [32], farklı boyut ve güçteki tek tanklı (STE) ve çift tanklı (DTE) sistemler analiz edilmiştir [33]. Tek tanklı ısıtıcıların sağladığı su hacminin tank kapasitesinden ziyade daha çok güç derecesiyle ilişkili olduğu görülmüştür. Ancak tank hacminin büyümesiyle enerji kullanımının da arttığı saptanmıştır. STE, DTE (seri bağlantılı) ile karşılaştırılarak sıcak su çıktısı ve enerji tasarrufu potansiyeli değerlendirilmiştir. Seri bağlı DTE'lerin, litre başına daha az enerji harcayarak daha fazla sıcak su sağladığı, en iyi performansın ise ikinci tank hacminin toplam hacmin %25'i ve gücünün toplam gücün %75'i olduğu konfigürasyonda elde edildiği belirlenmiştir. Kar ve diğerlerinin daha ileri bir simülasyon çalışması, tek tanklı, tam karışimli DTE ve kademeli DTE performanslarını karşılaştırmıştır [34]. Tam karışimli DTE'nin, aynı boyut ve güçte STE'ye göre litre sıcak su başına %60'a kadar daha fazla sıcak su sağlayarak enerji tüketiminde %55'e kadar düşüş sağladığı gözlemlenmiştir. Genel olarak, yapılan incelemeler STE'lerin performansının kısıtlı olduğunu ve DTE'lerin her koşulda üstün performans sergilediğini ve daha az enerji tüketimine katkıda bulunduğunu doğrulamıştır [35].

EWH ve klimaların davranışını modellemek ve etkin yerel talep yanıt uygulamaları için bir yöntem sunmak üzere iki farklı model geliştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, bu modellerin su ve oda sıcaklığını yönetirken senaryo çeşitliliğine ve ayar noktalarına uyum sağlayabildiğini ve doğru çalıştığını göstermiştir. Konut talep yanıt sistemleri uygulandığında, ev gücü tüketiminin kontrol altına alınabileceği ve bu sayede tasarruf edilebileceği gözlemlenmiştir. Mabina ve Mukoma da benzer bir yaklaşımla EWH'leri, stratejik yük azaltma ve yük kaydırma amacıyla doğrudan yük kontrolü için kullanmışlardır [36]. Kontrol stratejileriyle güç tüketimindeki düşüşü ve elektrik fiyatlandırması üzerinden finansal kazançları incelemişlerdir. Çalışmaları, EWH kullanımının planlanması ve yükün düşük maliyetli zamanlara kaydırılmasıyla hem enerji hem de maddi tasarruf elde edilebileceğini göstermiştir. Bu yaklaşımla yaklaşık %36 enerji ve %41 maliyet düşüşü sağlanmıştır. Kepplinger ve arkadaşları [37], tamamen karışimli termal model kullanarak su ısıtıcıları için talep tarafı yönetimini optimize etmişlerdir. Tahmin edilen talep, geçmiş veriler ve en yakın komşu algoritmasıyla belirlenmiştir. Uzun süreli simülasyonlar, gece tarifesine geçişle %12 maliyet ve %12 enerji tasarrufu potansiyeli olduğunu ortaya koymuştur. Booysen ve arkadaşları [38] ise evsel su ısıtma için termostatsız üç farklı kontrol stratejisini incelemiştir: enerji arzını sıcak suyla eşleştirme, sıcaklık çıktısını eşleştirme ve Legionella sterilizasyonunu içeren ikinci stratejinin bir varyasyonu.

Ritchie ve arkadaşları [39-40], iki düğümlü bir EWH termal modeli ekleyerek ve enerji tasarruflarını hesaplayarak bu çalışmaları ileriye taşımıştır. A* optimizasyon algoritması ile tahmin edilen su talebi için en uygun EWH kontrol sırasını belirlemişlerdir. Geçmiş kullanım verilerine dayalı bir su kullanım modeli ile tahminler yaparak, sıcaklık eşleştirme stratejilerinin %2,2, enerji eşleştirme stratejilerinin ise %9,6 enerji tasarrufu sağladığını bulmuşlardır.

Mevcut çalışma, Ritchie ve arkadaşlarının [41] çalışmasının bir devamı ve genişletilmiş halidir. Enerji tüketimi hesaplamalarında diğer araştırmalardaki tank modellerine benzer şekilde tek ve çift tank modellerine odaklanılmaktadır [26,34,42,43]. Bu araştırma, enerji tüketimi hesaplamalarında hem tek hem de çift tank konfigürasyonlarını temel almıştır. Ancak, çalışmamızın bilimsel farklarından biri, yalnızca enerji verimliliğine odaklanmak yerine, bu su ısıtıcı tanklarının sera gazı (GHG) salımlarını hesaplayarak ve iki tank tipini bu emisyon açısından karşılaştırarak, dekarbonizasyon sürecine sağladıkları katkıyı nicel olarak ortaya koymasındır."

2. MATERYAL VE METOT

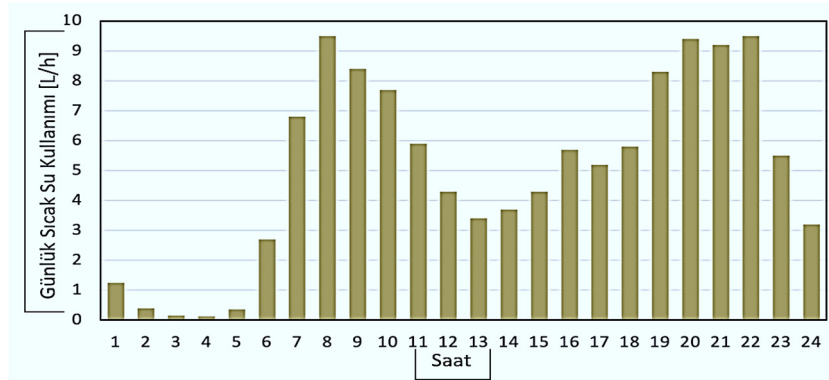
2.1. Konut Tipi Sıcak Su Talep Verilerinin Derlenmesi ve Analizi

Elektrikli su ısıtıcılarının (EWH) performansını değerlendirmede, hanelerin saatlik sıcak su tüketim kalıplarını gösteren profillerin kullanılması esastır. Hane halkı sıcak su kullanım eğilimleri, birçok akademik çalışma ile detaylı olarak incelenmiştir [32,44-46]. İstatistiksel analizler, günlük periyotlarda sıcak su kullanımının saatlik ortalamalar arasında önemli değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur [47,48]. Bu tanımlanmış ve analiz edilmiş veriler, su ısıtıcılarının enerji verimliliğini artırmaya yönelik karşılaştırmalı çalışmalar için temel oluşturur [49].

Bu araştırmanın gereklilikleri doğrultusunda, tank simülasyonlarında kullanılmak üzere hane halkı sıcak su tüketim verileri ölçülerek derlenmiştir. Toplam 25 farklı hanenin 24 saatlik sıcak su kullanım bilgileri, sonbahar ve kış mevsimlerini kapsayan (Ekim'den Mart'a kadar) altı aylık bir süre boyunca kaydedilmiştir. Bu altı aylık dönemin verileri ortalama alınarak, tipik bir ailenin günlük sıcak su kullanım alışkanlığını temsil eden bir tüketim profili oluşturulmuştur. EWH simülasyonunda kullanılan temel fiziksel ve kontrol parametreleri Çizelge 1'de gösterilmiştir.

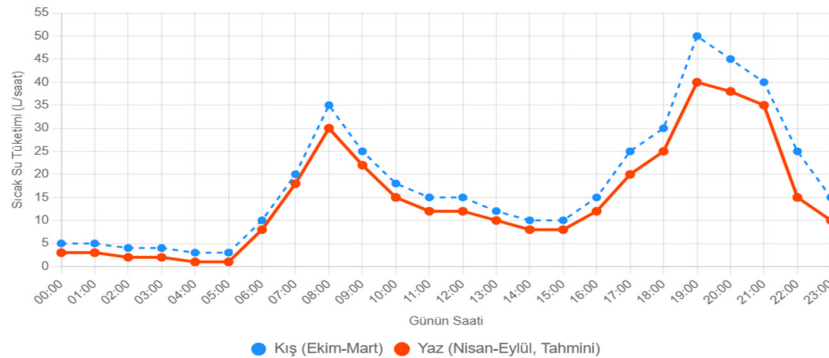
Çizelge 1. EWH simülasyonunda kullanılan temel fiziksel ve kontrol parametreleri

Parametre	Birim	Değer	Açıklama
Toplam tank hacmi V_{top}	L	40	Mobil yaşam alanları için tipik kabul edilen hacim
DUT birinci tank hacmi V_1	L	30	Hızlı ısıtma sağlayan ön tank
DUT ikinci tank hacmi V_2	L	10	Daha düşük sıcaklıkta depolama tankı
Ortam sıcaklığı T_{amb}	C	18	Karavan içi ortalama kış ortam sıcaklığı
Giriş suyu sıcaklığı T_{in}	C	15	Kış dönemi (Ekim-Mart) ortalama şebeke/tank sıcaklığı
Simülasyon süresi t_{sim}	Saat	24	Tipik günlük sıcak su kullanım profilini kapsar
Tank ısı kaybı katsayısı UA	W/°C	0,55	Poliüretan yalıtımlı tipik EWH için kabul edilen değer
Suyun özgül ısı c_p	J/kg°C	4186	Termal analizde kullanılan standart değer



Şekil 2. Saatlik sıcak su kullanım profili

Şekil 2'deki saatlik kullanım profili, tank modellerinin MATLAB/Simulink platformundaki simülasyonlarında girdi olarak kullanılmıştır. Günlük profil incelendiğinde, genellikle sabah erken saatlerde ve akşam saatlerinde olmak üzere iki belirgin tüketim zirvesi görülmektedir. Bu durum, bireylerin tipik olarak uyanma, işten/okuldan dönme ve akşam dinlenme rutinleri sırasında su kullanımını arttırmalarından kaynaklanır.



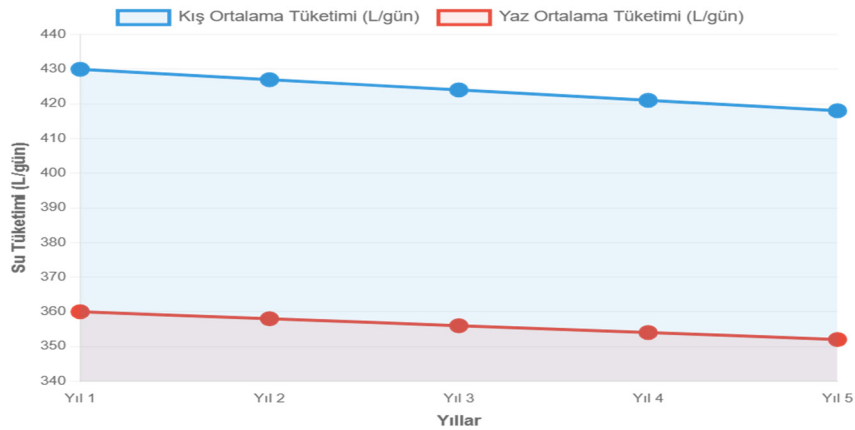
Şekil 3. Kış ve yaz dönemlerinin saatlik sıcak su kullanım profil karşılaştırması

Şekil 3, çizgi türünde gösterilen bir grafik olmakla birlikte iki veri setini içermektedir: Kış (Ekim-Mart) verileri mavi kesikli çizgiyle gösterilirken, Yaz (Nisan-Eylül, Tahmini) verileri ise turuncu düz çizgiyle gösterilmektedir. X eksenini günün saatlerini (00:00 - 23:00), Y eksenini ise sıcak su tüketimini (0 - 55 L/saat) temsil etmektedir. Şekil 3, makalenin 2.1 bölümünde kullanılan Ekim-Mart dönemine ait ortalama günlük sıcak su tüketim profili (Kış Ortalaması) ile bu veriler kullanılarak LSTM tahmin modeliyle elde edilen Nisan-Eylül dönemi (Yaz Tahmini) profilini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır.

Tahmin edilen yaz profili, günün her saatinde kış ortalamasının belirgin şekilde altında yer almaktadır. Bu düşüş, aşağıdaki iki temel fiziksel ve davranışsal faktörle doğrudan ilişkilidir:

- Fiziksel Etki (Giriş Suyu Sıcaklığı): Yaz aylarında şebekeden gelen soğuk suyun sıcaklığı yükseldiği için, suyun istenen 60°C sıcaklığına çıkarılması için gereken termal enerji daha düşüktür. Aynı konfor seviyesini sağlamak için hanelerin toplam hacimsel sıcak su çekim miktarı azalmaktadır.
- Davranışsal Etki: Yaz dönemi boyunca kullanıcıların ev dışında geçirdikleri sürenin artması (tatil, dış mekan aktivitesi) ve buna bağlı olarak ev içi sıcak su talebinin azalması, özellikle akşam zirvesindeki düşüşü desteklemektedir.

Sonuç olarak; LSTM modelinin sunduğu bu profil, DUT için geliştirilen akıllı kontrol stratejisinin hayati önemini göstermektedir. Yaz döneminde toplam tüketimin %16 daha az olacağının öngörülmesi, DUT'un ısıtma döngülerini ve depolama seviyelerini gereksiz yere aşırı ısıtma yapmayacak şekilde ayarlamasına olanak tanır. Bu proaktif kontrol sayesinde, sistemin özellikle gece ve öğle saatlerindeki termal bekleme kayıpları daha da azaltılarak DUT'un mevsimsel enerji verimliliği maksimize edilecektir. Bu da GHG emisyonu azaltım bulgularının özellikle 1 kW ve 2 kW gibi düşük güç seviyelerinde daha da güçlenmesine sebep olacaktır.



Şekil 4. Beş (5) yıllık sıcak su tüketim grafiği

Şekil 4'e göre, beş yıllık dönemde hem kış hem de yaz mevsimlerinde su tüketiminde istikrarlı bir azalma eğilimi gözlemlenmektedir. Kış tüketimi 430 L/gün'den 418 L/gün'e (%2,8), yaz tüketimi ise 360 L/gün'den 352 L/gün'e (%2,2) düşerek, yıllık bazda yaklaşık %0,56'lık sabit bir azalma gerçekleşmiştir. Bu düşüş eğilimi, su tasarruflu teknolojilerin yaygınlaşması, su koruma bilincinin artması ve uygulanan su yönetimi politikalarının etkinliği gibi yapısal faktörlere işaret etmektedir. Ayrıca, kış ve yaz tüketimleri arasındaki farkın 70 L/gün'den 66 L/gün'e daralması, mevsimsel tüketim alışkanlıklarının zamanla daha homojen hale geldiğini göstermektedir.

Elde edilen bulgular, mevcut su verimliliği politikalarının sürdürülmesi ve tasarruf teknolojilerine yönelik teşviklerin devam etmesi gerektiğini desteklemektedir. Doğrusala yakın seyreden azalma eğrisi, tüketimdeki düşüşün geçici değil kalıcı davranış değişikliklerinden kaynaklandığını ve sistemik bir dönüşümü yansıttığını ortaya koymaktadır. Mevcut trendin devam etmesi halinde, önümüzdeki beş yılda toplam tüketimde yaklaşık %5,4'lük ilave bir düşüş beklenebilir. Bu çalışma, mevsimsel tüketim desenlerinin uzun dönemli analizinin su yönetimi politikalarının etkinliğinin değerlendirilmesinde önemli bir metodolojik araç olarak kullanılabileceğini de göstermektedir.

Çizelge 2. Beş yıllık sıcak su tüketim verilerinin karşılaştırılması

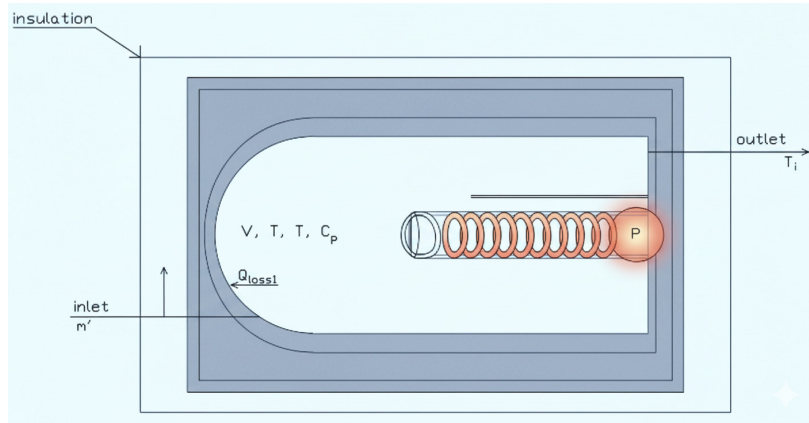
Yıllar	Kış ort. (L/gün)	Yaz ort. (L/gün)	Yıllık ortalama tüketim eğilimi
Yıl 1	430 L	360 L	Referans düzeyi
Yıl 2	427 L	358 L	≈%0.7 Düşüş
Yıl 3	424 L	356 L	≈%1.4 Düşüş
Yıl 4	421 L	354 L	≈%2.1 Düşüş
Yıl 5	418 L	352 L	≈%2.8 Düşüş

5 yıllık dönemde hem kış hem de yaz aylarında su tüketiminde düzenli bir düşüş eğilimi gözlemlenmektedir. Kış aylarında ortalama tüketim 430 L/gün'den 418 L/gün'e, yaz aylarında ise 360 L/gün'den 352 L/gün'e düşmüştür. Buda Çizelge 2'de, toplamda yaklaşık %2.8'lik bir azalmaya karşılık olarak gösterilmektedir.

2.2. EWH Sistemlerinin Termodinamik Modellemesi: STE ve DUT Konfigürasyonları

Çalışmanın modelleme kısmında, Tek Tanklı EWH sistemi Şekil 5'te gösterildiği gibi, tek bir elektrikli ısıtma rezistansına sahip, homojen olarak karışık bir tank olarak tasarlanmıştır. Bu EWH'ler, 50 mm fiberglas yalıtım ile çevrili ve 2 mm çelik tank duvarlarına sahip yapılar olarak modellenmiştir [50]. Her tank için dış yüzey alanı ve tank hacmi arasındaki ilişki, yaklaşık olarak aşağıdaki Eşitlik 1 ile belirlenmiştir:

$$A=6V^{(2/3)} \quad (1)$$



Şekil 5. Debi, enerji, sıcaklık ve hacmi gösteren tek tanklı bir su ısıtıcısının modeli

Bu hesaplamada, boy/çap oranının 2 olduğu varsayılmış ve yalıtım kalınlığından dolayı dış yüzey alanında %10 oranında bir artış faktörü eklenmiştir.

Tank yüzeyinden çevreye yayılan ısı kaybı Eşitlik 2 ile hesaplanmıştır [51]:

$$Q_{loss}=UA(T-T_a) \quad (2)$$

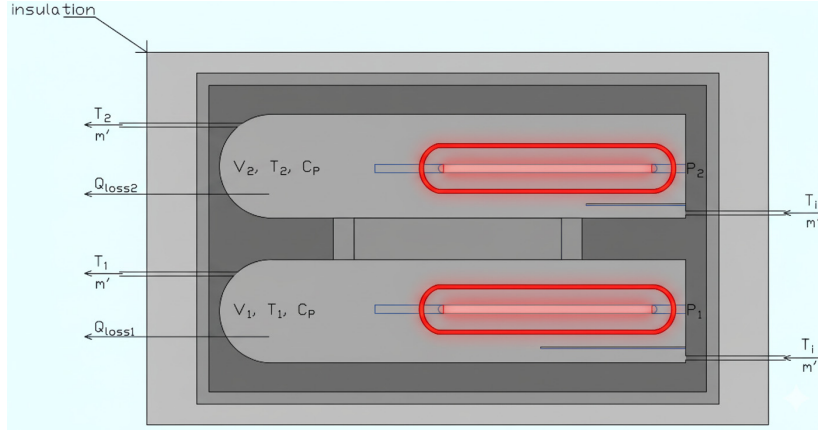
Burada {U}, genel ısı transfer katsayısını; {A}, tankın yüzey alanını; {T}, tank içindeki suyun sıcaklığını; {T_a} ise 20 °C olarak kabul edilen ortam hava sıcaklığını temsil eder [52]. Gelen su sıcaklığı hesaplamalarda 15 °C olarak sabitlenmiştir.

Tank içindeki enerji değişimi ve ısı dengesi ise Eşitlik 3 ile ifade edilmektedir [51-52]:

$$\rho VC_p dT/dt=P+m C_p(T_i-T)-AU(T-T_a) \quad (3)$$

Bu enerji dengesi formülünde ρ suyun yoğunluğunu, V tank hacmini, C_p suyun özgül ısısını, T sıcaklığı, t zamanı, m sıcak su akış hızını, T_i gelen soğuk su sıcaklığını ve T_a ortam sıcaklığını ifade eder [52-56].

Çalışmada incelenen Çift Tanklı DTE sistemi, Şekil 6'da gösterildiği gibi seri olarak birbirine bağlanmış iki ayrı tanktan oluşur. Bu DTE konfigürasyonu, toplam hacim kapasitesi $V = V_1 + V_2$ ve toplam güç derecesi $P = P_1 + P_2$ açısından tek tanklı eşdeğerine eşdeğerdir. İki tankın ayrı ayrı hacimleri ve güçleri, maksimum sıcak su çıktısı ve en yüksek enerji tasarrufu sağlayacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 6. Akış hızını, enerjiyi, sıcaklığı ve hacmi gösteren bir DUT su ısıtıcısının modeli

Birinci tank için geçici enerji dengesi Eşitlik 4'te, ikinci tank için ise Eşitlik 5'te sunulmuştur:

$$\rho V_1 C_p \frac{dT_1}{dt} = P_1 + \dot{m} C_p (T_i - T_1) - A_1 U (T_1 - T_a) \quad (4)$$

$$\rho V_2 C_p \frac{dT_2}{dt} = P_2 + \dot{m} C_p (T_1 - T_2) - A_2 U (T_2 - T_a) \quad (5)$$

Burada m' sıcak su akış hızını, T_1 ve T_2 ilgili tank bölümlerinin sıcaklıklarını, A_1 ve A_2 ise yüzey alanlarını gösterir. İkinci tank T_2 sıcak suyun kullanıma sunulduğu kısım olduğu için bu sıcaklık kritik öneme sahiptir.

Simülasyonlarda kullanılan hem tek tanklı hem de DTE sistemlerinin toplam kapasiteleri 100 litre ve 200 litre olarak belirlenmiştir. Optimizasyon süreci boyunca, her bir tanka 1, 2, 3 ve 4 kW değerlerinde güç yüklenmiştir. MATLAB/Simulink ortamında sistemin dengeye ulaşması için simülasyonlar 120 saat (5 gün) boyunca kesintisiz çalıştırılmıştır. Tek tanklı EWH'ler için yapılan parametrik optimizasyon, her tank hacmi ve güç seviyesi için günlük sağlanabilecek maksimum sıcak su miktarını belirlemeyi amaçlamıştır. İkinci tank hacminin toplam hacmin %25'i ve gücünün toplam gücün %75'i olduğu konfigürasyonda elde edilmiştir. Isıtıcıdaki suyun başlangıç sıcaklığı tüm optimizasyonlar için 60 °C kabul edilmiş ve ANSI Standartlarına uygun olarak, Açma-Kapama termostatik kontrol mekanizması kullanılarak bu sıcaklık 60°C ile 65°C aralığında tutulmuştur.

2.3. Tüketilen Elektrik Enerjisi Üzerinden Emisyonların Belirlenmesi

Tek tanklı ve Çift Tanklı su ısıtıcılarının sera gazı {GHG} salımlarını karşılaştırmak amacıyla, öncelikle hesaplanan enerji tüketim değerleri kullanılarak karbon emisyon miktarlarının bulunması gerekmektedir. Herhangi bir elektrikli cihazın çalışması için kullanılan elektrik enerjisi, üretim sürecinde (fosil yakıtlardan elektrik elde edilirken) belli miktarda GHG yayılmasına neden olur. Bu GHG salım miktarını öngörmek için, kullanılan yakıt çeşitlerinin (kömür, doğal gaz, petrol gibi) elektrik üretimindeki payları ve bunlara özgü emisyon faktörleri hesaba katılmalıdır [57]. Elektrik üretimi sırasında ortaya çıkan karbondioksit ve diğer salımlar, kullanılan yakıt karışımına ve santralin operasyonel niteliklerine göre değişkenlik gösterir; bu veriler ülke bazında spesifik olarak sunulur. Ureden ve Ozden [58] tarafından yapılan çalışmada, elektrik tüketiminden kaynaklanan emisyonların hesaplanmasında kullanılan temel formülasyon sunulmuştur. Bu araştırmada da Elektrikli Su Isıtıcısı için emisyon miktarı bu formül esas alınarak tahmin edilmiştir. Elektrik tüketiminden kaynaklanan toplam emisyon miktarını hesaplamak için kullanılan matematiksel ifade Eşitlik 6'da detaylandırılmıştır [59-62]:

$$\frac{E_{kgCO_2}}{year} = \left(\frac{FV_{kWh}}{year} \times EF_{kgCO_2}{kWh} \times T\&DL\% \right) + \left(\frac{FV_{kWh}}{year} \times EF_{kgCO_2}{kWh} \right) \quad (6)$$

burada;

$\frac{E_{kgCO_2}}{year}$ Karbondioksit emisyonu kg'dır $\frac{kgCO_2}{year}$,

FV Faaliyet verileridir (kWh/yıl) Yılda tüketilen toplam elektrik miktarı,

EF Emisyon Faktörüdür (kg CO₂/kWh) (Türkiye için 0,6488 kg CO₂/kWh olarak alınmış ve detaylı bilgi TEİAŞ yıllık raporlarından alınmıştır) [62, 58].

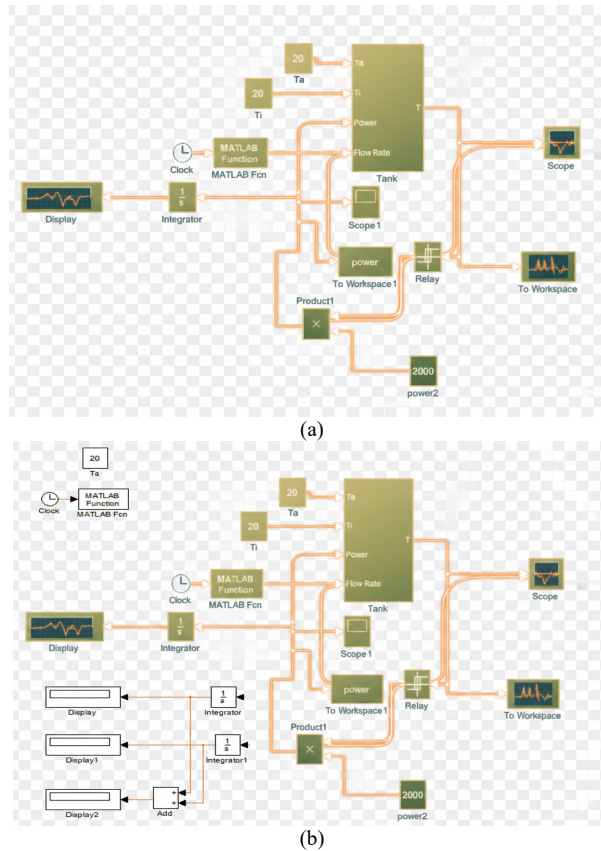
T&DL İletim ve Dağıtım Kayıpları (%13,8)'dir (Türkiye için ortalama %13,8 olarak alınmış ve detaylı bilgi TEİAŞ yıllık raporlarından alınmıştır) [57, 52].

Eşitlik 1'deki FV (kWh/yıl) verisinin kWh/gün verisi olarak kullanılması nedeniyle bu çalışmada emisyon miktarının E kg CO₂/gün olarak hesaplandığını belirtmekte fayda vardır.

3. BULGULAR

3.1. Tank Modelleri Üzerinde Yapılan Simülasyonların Enerji Tüketim Bulguları

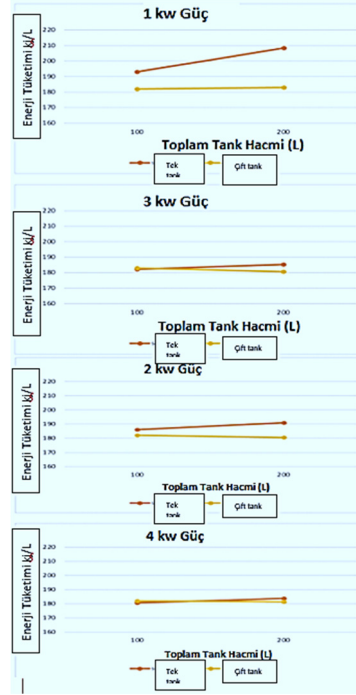
Tek tanklı sistemin enerji sarfıyatı sonuçları, Bölüm 2.2 tanımlanan eşitliklerin uygulanması ve saatlik sıcak su üretiminin günlük toplam tüketim eğilimine göre ayarlanmasıyla elde edilmiştir. Hem tek tanklı hem de çift tanklı sistemler için geliştirilen MATLAB/Simulink ortamındaki açma-kapama kontrollü modeller Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 7a,b. Tek ve çift tank MATLAB/Simulink açma-kapama kontrol modelleri

STE ve DUT konfigürasyonlarının istenen sıcak su hacmini sağlamak için ihtiyaç duyduğu enerji miktarı hesaplanmış ve bu sonuçlar, farklı tank hacimleri ve güç seviyeleri baz alınarak Şekil 8'de sunulmuştur.

Şekil 8'deki bulgulara göre, STE simülasyonlarında, aynı güç derecesi ve aynı sıcak su çıktısı sağlansa bile, litre sıcak su başına harcanan enerji miktarı tank hacmi büyüdükçe artış göstermektedir. Daha küçük tanklar litre başına daha az enerji gerektirse de ürettikleri toplam sıcak su miktarı daha düşüktür.



Şekil 8. Farklı güç oranları için sıcak suyun litre başına enerji tüketim eğrileri

Öte yandan, DUT sistemlerinde, aynı güç seviyesi ve çıktı korunurken, litre başına enerji ihtiyacı tank boyutu büyüdükçe azalma eğilimine girer. Bu durum, Şekil 8'deki eğrilerde net biçimde gözlemlenmektedir. Genel olarak, küçük tankların günlük kullanım için sağladığı sıcak suyun daha az olduğu ve ısıtılmış suyun litre başına daha fazla enerji sarfiyatına neden olduğu tespit edilmiştir.

Açma-kapama termostatik kontrol kullanılan STE ile karşılaştırıldığında, DTE ortalama enerji tüketiminde daha düşük değerler sağlamıştır: 1 kW'ta yaklaşık %9; 2 kW'ta yaklaşık %3,7; 3 kW'ta yaklaşık %1,1 ve 4 kW'ta %0,2 gibi düşüşler kaydedilmiştir. 100 litrelik hacim hariç, açma-kapama kontrollü çift tanklı EWH'nin enerji tüketimi oldukça düşüktür. Özellikle 200 litrelik hacim ve 1 kW güç seviyesinde, DUT sisteminin STE'ye göre %12,2 daha az enerji tükettiği belirlenmiştir.

3.2. Tüketilen Elektrik Enerjisi Üzerinden GHG Emisyonunun Hesaplanması

Tek tank ve DUT'un ideal güç oranlarında çalıştırılmasıyla hesaplanan toplam enerji tüketimi ve GHG emisyon değeri (E kg CO₂/gün) Çizelge 3 ve Çizelge 4'te verilmiştir. Simülasyon çalışmalarında kullanılan tank boyutu 100 litredir. Günlük GHG emisyonu (CO₂ eşdeğeri) değerleri, tankların günlük enerji tüketimi kullanılarak Eşitlik 1'e göre hesaplanmıştır.

Çizelge 3. Enerji tüketimi açısından tek tank için GHG analizi

Güç (W)	Bekleme süresi	Enerji tüketimi (J)	Güç tüketimi (kWh)	GHG emisyon (kg CO ₂ /gün)
45	9.50	1704.74	4.74×10^{-4}	7.31×10^{-4}
50	9.15	1688.27	4.69×10^{-4}	7.24×10^{-4}
65	8.19	1632.84	4.54×10^{-4}	7×10^{-4}
75	7.60	1591.79	4.42×10^{-4}	6.83×10^{-4}
80	7.32	1570.30	4.36×10^{-4}	6.74×10^{-4}

Çizelge 4. Enerji tüketimi açısından DUT için GHG analizi

Güç (W)	Bekleme süresi	Enerji tüketimi (J)	Güç tüketimi (kWh)	GHG emisyon (kg CO ₂ /gün)
45	5.51	910.07	2.53×10^{-4}	3.90×10^{-4}
50	5.28	899.41	2.50×10^{-4}	3.86×10^{-4}
65	4.66	863.86	2.40×10^{-4}	3.71×10^{-4}
75	4.29	837.82	2.33×10^{-4}	3.59×10^{-4}
80	4.12	824.27	2.29×10^{-4}	3.54×10^{-4}

STE ve DUT sistemlere ait GHG emisyon değerleri, Çizelge 5'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu verilere göre, DUT sistemi, uygulanan tüm güç seviyelerinde tek tanklı sisteme göre daha düşük GHG emisyon değerlerine sahiptir. Bu sonuç, EWH modellerinde DUT konfigürasyonlarının tercih edilmesinin, yüksek karbon salımından düşük karbon salımına doğru bir geçişi mümkün kıldığını göstermektedir. Bu geçişin çarpıcı bir örneği olarak, 80 W güç seviyesinde yapılan simülasyon, DUT'un tek tanklı sisteme kıyasla %47,5 oranında daha az GHG salımı yaptığını ortaya koymuştur.

Çizelge 5. DUT'un tek tankla karşılaştırılması

Güç (W)	DUT'un tek tank ile karşılaştırılması
45	%46.62 daha az
50	%46.73 daha az
65	%47.09 daha az
75	%47.37 daha az
80	%47.51 daha az

3.3. DUT Isıtıcıların Enerji Tasarrufu Potansiyelinin Maliyet-Etkinlik Açısından İncelenmesi

3.3.1. Başlangıç Yatırım Giderleri

DUT modelinin, tek tanklı muadillerine göre daha sofistike bir yapıya sahip olması nedeniyle, ilk yatırım maliyetinin daha yüksek olması beklenir. Örneğin, piyasada tek tanklı bir su ısıtıcısının maliyeti 450 ile 1100\$ arasında değişirken, çift tanklı bir sistemin fiyatı yaklaşık 900\$ ile 1600\$ civarında olabilir. Bu durum, DUT modelinin başlangıçta yaklaşık %50 ile %98 arasında daha pahalı olabileceğine işaret etmektedir.

3.3.2. Yatırımın Geri Dönüş Süresi (Amortisman)

DUT modelinin enerji tüketiminde ortalama %47,1'lik bir azalma sağladığı belirtilmiştir. Enerji maliyetlerinin hesaplanmasında bir hanenin yıllık elektrik tüketimini ve elektrik birim fiyatı baz alınmıştır:

Yıllık Enerji Tüketimi: Tek tanklı bir su ısıtıcısı yılda yaklaşık 2000 kWh enerji tüketebilir.
 Elektrik Birim Fiyatı: Türkiye'de ortalama elektrik fiyatı 0,15 USD/kWh olarak alınabilir.
 Yıllık Enerji Maliyeti: $2000 \text{ kWh} \times 0,15 \text{ USD/kWh} = 300 \text{ USD/yıl}$.

DUT modeli enerji tüketimini %47,1 azalttığına göre:
 Yıllık Tasarruf: $300 \text{ USD} \times 0,471 = 141,3 \text{ USD/yıl}$.

Eğer DUT modelinin ilk yatırım maliyeti tek tanklı modele göre 500 USD daha fazla ise:
 Geri Ödeme Süresi: $500 \text{ USD} / 141,3 \text{ USD/yıl} \approx 3,5 \text{ yıl}$.

3.3.3. Uzun Vadeli Finansal Avantajlar

DUT modelinin sağladığı yıllık tasarruf 141,3 USD olarak hesaplanmıştır. 10 yıllık bir kullanım ömrü boyunca:
 Toplam Tasarruf: $141,3 \text{ USD/yıl} \times 10 \text{ yıl} = 1413 \text{ USD}$.

Bu, DUT modelinin uzun vadede önemli bir ekonomik avantaj sağlayabileceğini göstermektedir.

3.3.4. Uzun Vadeli Finansal Avantajlar

Elektrik fiyatları bölgelere göre değişiklik gösterebilir. Örneğin, elektrik fiyatının 0,20 USD/kWh olduğu bir bölgede:

Yıllık Enerji Maliyeti: $2000 \text{ kWh} * 0,20 \text{ USD/kWh} = 400 \text{ USD/yıl}$.

Yıllık Tasarruf: $400 \text{ USD} * 0,471 = 188,4 \text{ USD/yıl}$.

Geri Ödeme Süresi: $500 \text{ USD} / 188,4 \text{ USD/yıl} \approx 2,65 \text{ yıl}$.

Bu durumda, elektrik fiyatlarının yüksek olduğu bölgelerde DUT modelinin geri ödeme süresi daha da kısalmaktadır.

3.3.5. İşletme ve Bakım Giderleri

Çift tanklı sistemin daha karmaşık yapısı, potansiyel olarak bakım masraflarını artırabilir. Örneğin, tek tanklı bir sistemin yıllık bakım maliyeti 20\$ iken, DUT modelinin bakım maliyeti 30\$ ila 40\$ civarında seyredebilir. Bu da yıllık 10\$ ila 20\$'lık bir ek maliyet anlamına gelir. Ancak, bu ek giderler, elde edilen yıllık enerji tasarrufuyla karşılaştırıldığında ihmal edilebilir düzeyde kalmaktadır.

Nihai Sonuçlar: DUT modelinin ilk yatırım maliyeti STE'ye göre yaklaşık 500-510\$ daha fazla olabilir. Ortalama geri ödeme süresi 3,4-3,5 yıl civarındadır ve yüksek elektrik fiyatlı bölgelerde 2,4-2,7 yıla kadar düşebilir. 10 yıllık kullanım süresinde 1350\$-1450\$ civarında toplam tasarruf sağlanması beklenirken, ek bakım giderleri önemsizdir. Bu sonuçlar, DUT modelinin hem çevresel GHG azaltımı hem de ekonomik açıdan avantajlı bir çözüm olduğunu desteklemektedir.

3.4. ÇTESİ Modelinin Kontrol Mekanizması

3.4.1. On-Off Kontrol Yaklaşımı

ÇTESİ modelinde uygulanan on-off kontrol mekanizması, tank içine entegre edilmiş sıcaklık algılayıcıları ile senkronize olarak işler. Bu sensörler, tank içindeki suyun termal durumunu sürekli izleyerek, sıcaklık belirlenmiş bir üst veya alt limite ulaştığında ısıtma elemanını aktive ederek ya da pasif duruma getirerek devreden çıkarır. Bu yöntem sayesinde, enerji sarfiyatı en düşük duruma indirgenirken sistemin genel verimliliği de maksimuma çıkarılabilmektedir.

3.4.2. Feedback Sistemleri

Sıcaklık sensörlerinden elde edilen veriler, feedback mekanizmaları aracılığıyla optimizasyonu sağlanmaktadır. Örneğin, su sıcaklığı önceden tanımlanmış bir eşik değerinin altına düştüğü anda, sistem otomatik olarak ısıtma periyodunu aktive eder. Böylelikle konforlu ve sürekliliği sağlanmış verimli bir sistemle sıcak su talebi karşılanmaktadır.

3.4.3. Çift Tank Mimarisi ve Verimlilik

Çift tanklı mimari, sıcak su kütesinin iki ayrı bölüme ayrılmasını sağlayarak, suyun daha verimli kullanılmasını mümkün kılar. Ön tank, gelen suyun hızlı bir şekilde ön ısıtmasını gerçekleştirirken, ikinci tank daha kritik ve yüksek sıcaklıktaki suyun depolanmasını sağlamaktadır. Bu modelleme, suyun termal profillerini optimize ederek sistemin genel enerji verimliliği seviyesini arttırmaktadır.

3.4.4. DUT Performansını Maksimize Eden Hacim ve Güç Optimizasyonu

Çalışma kapsamında, en iyi performans ikinci tank hacminin toplam hacmin %25'i ve gücünün toplam gücün %75'i olduğu konfigürasyonda elde edildiği belirlenmiştir. Bu oranlar hem simülasyon sonuçları hem de literatürdeki deneysel bulgular dikkate alınarak optimize edilmiştir:

- Hacim Optimizasyonu: İkinci tankın görece küçük hacmi, suyun kısmen daha düşük sıcaklıkta depolanmasını sağlayarak, uzun süreli ısı kayıplarını en aza indirmek üzere tasarlanmıştır.

- Güç Optimizasyonu: İkinci tankın yüksek güç değeri, ön tankın başlattığı ısıtma sürecini destekleyerek sistemin kullanıcı taleplerine daha hızlı yanıt vermesini hedefler.

Neticede, bu özel kontrol stratejisi ve yapısal optimizasyon süreçleri, ÇTESI modelinin enerji verimliliğini üst düzeye çıkarırken, aynı zamanda kullanıcı konforu gereksinimlerini de hesaba katmaktadır. Suyun bölümlere ayrılması sistem performansını artırırken, on-off kontrolü ile etkin enerji tasarrufu sağlanmış olur.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışma, mobil yaşam alanlarında enerji verimliliğini artırmak ve karbon emisyonlarını azaltmak amacıyla, elektrikli su ısıtıcısı (EWH) tank konfigürasyonlarını (tek tanklı (STE) ve çift tanklı (DUT)) kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Termodinamik modelleme ve simülasyonlara dayanan bu araştırma, DUT sistemlerinin, özellikle belirli tasarım parametreleri altında, STE'lere kıyasla hem enerji tüketimi hem de sera gazı (GHG) emisyonları açısından kayda değer üstünlükler sağladığını ortaya koymuştur.

Elde edilen bulgular, DUT modellerinin performansının tank hacmi ve güç seviyesiyle önemli ölçüde değişkenlik gösterdiğini doğrulamaktadır. Kar ve Yazıcıoğlu [34] ile Kar ve Al-Dossary [31] tarafından daha önce vurgulandığı üzere, çift tanklı sistemlerin avantajları, optimize edilmiş hacim ve güç dağılımıyla ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada, ikinci tank hacminin toplam hacmin %25'i ve gücünün toplam gücün %75'i olduğu konfigürasyonun optimum performansı sağladığı gözlemlenmiştir. Bu bulgu, literatürdeki önceki optimizasyon çalışmalarıyla uyumludur [52]. Simülasyon sonuçları, 100 litrelik küçük tanklar ve yüksek güç seviyeleri (3-4 kW) için enerji tüketimindeki iyileşmenin sınırlı (%0,4 artıştan %1,23 azalışa kadar) olduğunu göstermiştir. Ancak, 200 litrelik bir tank ve 1 kW gibi düşük bir güç seviyesinde, DUT sisteminin enerji tüketiminde STE'ye kıyasla %12,2'lik belirgin bir azalma sağladığı tespit edilmiştir. Bu da DUT sistemleri için daha büyük tank hacimleri ve düşük-orta seviye güç derecelerinin tavsiye edildiği anlamına gelmektedir.

Çalışmanın en önemli sonuçlarından biri, enerji tüketimindeki bu azalmanın karbon ayak izi üzerindeki somut etkisidir. Enerji tüketim verileri ve Türkiye'ye özgü emisyon faktörü [57,58,62] kullanılarak yapılan hesaplamalar, DUT modelinin, uygulanan tüm güç seviyelerinde (45W- 80W) STE'ye kıyasla ortalama %47,1 daha düşük GHG emisyonu gerçekleştirdiğini ortaya koymuştur. Bu bulgu, konutlarda enerji verimliliği ve talep tarafı yönetimi üzerine yapılan önceki çalışmaları [35,36,38] destekler nitelikte olup, elektrikli su ısıtmanın karbonsuzlaştırılması [3,6] hedefleri doğrultusunda DUT sistemlerinin etkin bir seçenek olduğunu kanıtlamaktadır.

Çalışmanın bir diğer özgün katkısı, mevsimsel tüketim dinamiklerini ve uzun vadeli eğilimleri LSTM modeli ve beş yıllık verilerle incelemesidir. Tahmin edilen yaz profili ve gözlemlenen yıllık azalma eğilimi, su ısıtma ihtiyacının mevsime ve davranışsal değişkenlere bağlı olduğunu net bir şekilde göstermiştir. Bu dinamik profil, DUT gibi akıllı sistemlerin, ısıtma stratejilerini gerçek ihtiyaca göre uyarlayarak "gereksiz ısıtma" ve termal bekleme kayıplarını daha da minimize etme potansiyelini ortaya çıkarmaktadır. Bu durum, Booyesen ve arkadaşları [38] ve Ritchie ve arkadaşları [39,40] tarafından vurgulanan, tahmine dayalı kontrol stratejilerinin önemini bir kez daha teyit etmektedir.

Ekonomik analiz, DUT sistemlerinin önündeki en büyük engel olan yüksek başlangıç yatırım maliyetine rağmen, sağlanan enerji tasarrufu sayesinde ortalama 3,5 yıllık makul bir geri ödeme süresi olduğunu göstermiştir. Elektrik fiyatlarının yüksek olduğu bölgelerde bu süre 2,65 yıla kadar düşebilmekte ve 10 yıllık kullanım ömrü boyunca önemli bir net tasarruf sağlanabilmektedir. Bu bulgular, DUT teknolojisinin sadece çevresel değil, aynı zamanda uzun vadede ekonomik açıdan da uygulanabilir olduğunu desteklemektedir.

DUT modelinin mekanizması, sadece mobil yaşam alanlarına özgü bir çözüm olmayıp, termal depolama sistemlerinin genel verimliliğini artıran evrensel bir mühendislik ilkesine dayanmaktadır. Özellikle yüksek elektrik fiyatlarının ve katı GHG düzenlemelerinin olduğu büyük ölçekli konut ve ticari sektörler, bu çalışmada ispatlanan enerji tasarrufu ve emisyon azalımı potansiyelinden önemli ölçüde faydalanabilir. Bu genelleme potansiyeli, çalışmamızın teorik ve pratik değerini önemli ölçüde artırmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, karavan ve mobil yaşam alanları için çift tanklı elektrikli su ısıtıcı sistemlerinin, optimize edilmiş tasarım ve kontrol stratejileriyle birlikte kullanılmasının, enerji verimliliğini artırmada, enerji maliyetlerini düşürmede ve sera gazı emisyonlarını azaltmada son derece etkili bir strateji olduğunu ortaya koymaktadır.

6. TEŞEKKÜR

Veri Kullanılabilirliği Beyanı: Bu çalışmada sıcak su ısıtıcı kullanım profili verileri Ahmet Feyzioğlu ve Abdülkerim Kar'ın "Development of Electrical Water Heaters for Energy Conservation" başlıklı kitabından elde edilmiştir.

7. KAYNAKLAR

1. Fetting, C. (2020). The european green deal. *ESDN Report*, ESDN Office, Vienna.
2. The Paris Agreement, (2016). *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC).
3. Raghavan, S.V., Wei, M., Kammen, D.M. (2017). Scenarios to decarbonize residential water heating in california. *Energy Policy*, 109, 441-451.
4. Sheikh, I. (2017). Decarbonizing residential space and water heating: The case for electrification. *In Proceedings of the eceee 2017 Summer Study on Energy Efficiency*, 1-329. European Council for an Energy Efficient Economy.
5. Shimoda, Y., Sugiyama, M., Nishimoto, R., Momonoki, T. (2021). Evaluating decarbonization scenarios and energy management requirement for the residential sector in Japan through bottom-up simulations of energy end-use demand in 2050. *Applied Energy*, 303, 117510.
6. Kartal, M.A. (2024). Data-driven decarbonization: optimizing p+r in istanbul with machine learning energy modeling and its. *Front. Energy Res.*, 12, 1395814.
7. Kartal, M.A. (2024). Contamination in heat exchangers: types, energy effects and prevention methods. *IgMin Res.*, 2(7), 503-507.
8. Aslan, E. (2024). Araçlarda CO2 emisyonlarının farklı yapay sinir ağı modelleri kullanılarak tahminlerinin karşılaştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(2), 309-324.
9. Butler, D. *Caravanning statistics*. <https://www.finder.com/uk/caravanning-statistics>, Access date: 10.11.2022.
10. Pitchup.com. *Facts and figures*. <https://www.pitchup.com/about/media/>, Access date: 10.11.2022.
11. Federation, E.C. Environment. <https://www.e-c-f.com/artikel/environment/>, Access date: 09.11.2022.
12. Bergk, F., Biemann K., Kämper, C., Kräck, J. & Knörr, W. (2020). Klimabilanz von reisen mit reisemobilen und caravans. *IFEU*, Heidelberg.
13. Five eco friendly caravans for a green living on the go. <https://ecofriend.com/eco-friendly-caravans-green-living.html>, Access date: 09.11.2022.
14. Tantekin, A. & Özdil, N.F. (2022). Energy analysis in a solar house with building-integrated photovoltaic (bipv) system. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(3), 685-698.
15. Things you should know about water heaters for caravans and motor homes. <https://www.truma.com/uk/en/camping-guides/guide-water-heater-caravan>, Access date: 10.11.2022.
16. Caravan Hot Water Heaters. <https://ringhotwater.com.au/product-category/caravan-rv/caravan-hot-water-heaters/>, Access date: 11.10.2022.
17. Dennis, K. (2015). Environmentally beneficial electrification: electricity as the end-use option. *The Electricity Journal*, 28(9), 100-112.
18. Munuera, L., Bradford, J., Kelly, N. & Hawkes, A. (2013). The role of energy efficiency in decarbonising heat via electrification. *Proc. ECEEE 2013 Summer Study on Energy Efficiency*, 1159-1164.
19. Wei, M., Nelson, J.H., Greenblatt, J.B., Mileva, A., Johnston, J., Ting, M., Yang, C., Jones, C., McMahon, J.E. & Kammen, D.M. (2013). Deep carbon reductions in california require electrification and integration across economic sectors. *Environmental Research Letters*, 8(1), 014038.
20. Kelly, J.A., Fu, M. & Clinch, J.P. (2016). Residential home heating: the potential for air source heat pump technologies as an alternative to solid and liquid fuels. *Energy Policy*, 98, 431-442.

21. Maclean, K., Sansom, R., Watson, T. & Gross, R. (2016). Managing heat system decarbonisation: comparing the impacts and costs of transitions in heat infrastructure. *Imperial College Centre for Energy Policy and Technology*, 1-62.
22. SNET, E. (2016). Final 10-year etip snet r&i roadmap covering 2017-26. *European Technology and Innovation Platform Smart Networks for the Energy Transition (ETIP SNET)*.
23. EPA, U. (2016). Inventory of us greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2014. EPA 430-R-16-002. *US Environmental Protection Agency Washington, DC, USA*.
24. U.S. Department of Energy. (2012). 2011 Buildings energy data book. *Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy*.
25. Nehrir, M.H., Jia, R., Pierre, D.A. & Hammerstrom, D.J. (2007). Power management of aggregate electric water heater loads by voltage control. *IEEE Power Engineering Society General Meeting, IEEE*, 1-6.
26. Diao, R., Lu, S., Elizondo, M., Mayhorn, E., Zhang, Y. & Samaan, N. (2012). Electric water heater modeling and control strategies for demand response. *IEEE power and energy society general meeting, IEEE*, 1-8.
27. Aalami, H.A. & Nojavan, S. (2016). Energy storage system and demand response program effects on stochastic energy procurement of large consumers considering renewable generation. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10(1), 107-114.
28. Ahmed, M.S., Mohamed, A., Homod, R.Z., Shareef, H., Sabry, A.H. & Khalid, K.B. (2015). Smart plug prototype for monitoring electrical appliances in home energy management system. *IEEE Student Conference on Research and Development (SCOREd), IEEE*, 32-36.
29. Balke, E.C., Healy, W.M. & Ullah, T. (2016). An assessment of efficient water heating options for an all-electric single family residence in a mixed-humid climate. *Energy and Buildings*, 133, 371-380.
30. Carrington, C., Warrington, D. & Yak, Y. (1985). Structure of domestic hot water consumption. *International Journal of Energy Research*, 9(1), 65-75.
31. Kar, A. & Al-Dossary, K. (1995). Thermal performances of water heaters in series. *Applied energy*, 52(1), 47-53.
32. Becker, B. & Stogsdill, K. (1990). A domestic hot water use database. *ASHRAE Journal*, 32(9), 21-25.
33. Kar, A.K. & Kar, Ü. (1996). Optimum design and selection of residential storage-type electric water heaters for energy conservation. *Energy Conversion and Management*, 37(9), 1445-1452.
34. Kar, A., Yazıcıoğlu, R. & Yazıcıoğlu, O. (2020). Thermal optimization of partitioned electric water heaters for energy conservation. *Journal of Energy Research and Reviews*, 6(1), 59-73.
35. Ahmed, M.S., Mohamed, A., Homod, R.Z., Shareef, H. & Khalid, K. (2016). Modeling of electric water heater and air conditioner for residential demand response strategy. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(16), 9037-9046.
36. Mabina, P.G. & Mukoma, P. (2019). Energy optimization and management of electric water heaters using direct load control. *The Southern African Energy Efficiency Confederation Conference (SAEEEC)*, Farm Inn, Silver Lakes, Pretoria.
37. Kepplinger, P., Huber, G. & Petrasch, J. (2015). Autonomous optimal control for demand side management with resistive domestic hot water heaters using linear optimization. *Energy and Buildings*, 100, 50-55.
38. Booysen, M., Engelbrecht, J., Ritchie, M., Apperley, M. & Cloete, A. (2019). How much energy can optimal control of domestic water heating save? *Energy for Sustainable Development*, 51, 73-85.
39. Ritchie, M., Engelbrecht, J. & Booysen, M. (2021). A probabilistic hot water usage model and simulator for use in residential energy management. *Energy and Buildings*, 235, 110727.
40. Ritchie, M.J., Engelbrecht, J.A. & Booysen, M.J. (2021). Practically-achievable energy savings with the optimal control of stratified water heaters with predicted usage. *Energies*, 14(7), 1963.
41. Feyzioglu, A. (2012). Development of control strategies and implementation to electrical water heaters for energy conservation. *Thesis for the degree of doctor of philosophy in mechanical engineering*, Marmara University, Turkey.
42. Kondoh, J., Lu, N. & Hammerstrom, D.J. (2011). An evaluation of the water heater load potential for providing regulation service. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 1-8.
43. Engelbrecht, J., Ritchie, M.J. & Booysen, M. (2021). Optimal schedule and temperature control of stratified water heaters. *Energy for Sustainable Development*, 62, 67-81.

44. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). (1993). ANSI/ASHRAE Standard 90.2-1993: Energy efficient design of low-rise residential buildings. Atlanta, 53-54 (Section 8.9.4, hourly domestic hot water fraction and table 8-4, daily domestic hot water load profile).
45. Bouchelle, M.P., Parker, D.S. & Anello, M.T. (2000). Factors influencing water heating energy use and peak demand in a large scale residential monitoring study (FSEC-CR-1671-00). *Florida Solar Energy Center*, University of Central Florida.
46. Perlman, M. & Mills, B. (1985). Development of residential hot water use patterns. *ASHRAE Transactions*, 91(2A), 657-679.
47. Ahmed, K., Pylsy, P. & Kurnitski, J. (2016). Hourly consumption profiles of domestic hot water for different occupant groups in dwellings. *Solar Energy*, 137, 516-530.
48. Fuentes, E., Arce, L. & Salom, J. (2018). A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1530-1547.
49. Fahey, P. & Parker, D. (2004). A review of hot water draw profiles used in performance analysis of residential domestic hot water systems. *Florida Solar Energy Center*, 2.
50. Abdi Hejazi, S. (1989). Sizing a storage type water heating system. *ASHRAE Journal*, 31(2), 35-40.
51. Mínguez, J. M. (1987). Water-heaters in series. *International Journal of Energy Research*, 11(1), 145-151.
52. Feyzioğlu, A. & Kar, A.K. (2016). Development of control strategies and implementation to electrical water heaters for energy conservation. *Cybernetics and Information Technologies*, 16(4), 98-112.
53. Kartal, M.A., Ersoy, S. & Atakök, G. (2024). Cooling and multiphase analysis of heated environmentally-friendly R152a (c2h4f2) fluid coming from the production process according to nist indicators. *Applied Sciences*, 14(10), 4143.
54. Kartal, M.A. & Feyzioğlu, A. (2024). Experimental comparison and numerical heat analysis of new designed shell and tube-heat exchanger with designed geometry at different baffle intervals: status of energy efficiency. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 19, 1845-1859.
55. Kartal, M.A. & Feyzioğlu, A. (2024). Numerical analysis of altered parallel flow heat exchanger with promoted geometry at multifarious baffle prolongs. *Energies*, 17, 1676.
56. Kartal, M.A. & Feyzioğlu, A. (2023). Numerical analysis of multipurpose shell-tube-heat exchanger withal stylized geometry at different baffle gaps and various flow rates. *Case Studies in Thermal Engineering*, 52, 103810.
57. Türkiye Elektrik Üretim-İletim İstatistikleri. <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>, Access date: 17.10.2022.
58. Ureden, A. & Ozden, S. (2018). Kurumsal karbon ayak izi nasıl hesaplanır: teorik bir çalışma. *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 98-108.
59. Holloway, S., Akai, M., Pipatti, R. & Rypdal, K. (2006). Carbon dioxide transport, injection and geological storage. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: *Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2(5), 1-32.
60. The Greenhouse Gas Protocol (2015). World Business Council for Sustainable Development, *World Resources Institute*.
61. Türkiye Ulusal Elektrik Şebekesi Emisyon Faktörü (2022). T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, *Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı*.
62. Saidur, R., Masjuki, H.H., Jamaluddin, M. & Ahmed, S. (2007). Energy and associated greenhouse gas emissions from household appliances in malaysia. *Energy Policy*, 35(3), 1648-1653.

A Comparative Experimental Analysis of Flexural Performance of Stainless Steel and CFRP Bone Plates under Four-Point Bending

Ahmet ÇETİN^{1,a}

¹Alanya Alaaddin Keykubat University, Rafet Kayış Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Alanya, Türkiye

^aORCID: 0000-0003-1393-3806

Article Info

Received : 25.08.2025

Accepted : 20.11.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1772159

Corresponding Author

Ahmet ÇETİN

ahmet.cetin@alanya.edu.tr

Keywords

CFRP bone plates

316L stainless steel bone plates

Four-point bending

Stiffness-to-weight ratio

How to cite: ÇETİN, A., (2025). *A Comparative Experimental Analysis of Flexural Performance of Stainless Steel and CFRP Bone Plates under Four-Point Bending*. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(4), 915-925.

ABSTRACT

Metal bone plates are one of the most common clinical applications for fracture fixation; however, optimization of the stiffness-to-weight ratio is often overlooked. This study compared 316L stainless steel plates and lightweight carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) plates of identical geometry. The plates were tested using the standard four-point bending test in both short and long configurations. Stiffness and bending moment parameters were obtained from load-displacement curves, and specific stiffness and specific moment were also determined. CFRP plates demonstrated higher specific bending stiffness, while steel exhibited higher absolute stiffness. The short CFRP plate exhibited reduced stiffness attributable to a net loss of cross-sectional area near the hole. The mechanical findings suggest that CFRP is a suitable material for designs that prioritize stiffness-to-mass performance, particularly in elongated plates when the connection-element region is considered a primary design feature.

Dört Noktadan Bükülme Altında Paslanmaz Çelik ve CFRP Kemik Plakalarının Eğilme Performansının Karşılaştırmalı DeneySEL Analizi

Makale Bilgileri

Geliş : 25.08.2025

Kabul : 20.11.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1772159

Sorumlu Yazar

Ahmet ÇETİN

ahmet.cetin@alanya.edu.tr

Anahtar Kelimeler

CFRP kemik plakaları

316L paslanmaz çelik kemik plakaları

Dört noktadan bükülme

Sertlik-ağırlık oranı

Atf şekli: ÇETİN, A., (2025). *Dört Noktadan Bükülme Altında Paslanmaz Çelik ve CFRP Kemik Plakalarının Eğilme Performansının Karşılaştırmalı DeneySEL Analizi*. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(4), 915-925.

ÖZ

Metallik kemik plakaları, kırık sabitlemesi için en yaygın klinik uygulamalardan biridir, ancak rijitlik-ağırlık oranının optimizasyonunu göz ardı edilmektedir. Bu çalışmada, aynı geometriye sahip 316L paslanmaz çelik ve hafif yapıli karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) plakaların karşılaştırılmasına odaklanılmıştır. Plakalar hem kısa hem de uzun konfigürasyonlarda dört noktali eğilme standardı altında test edilmiştir. Rijitlik ve eğilme momenti parametreleri yük-sehim eğrilerinden elde edilmiş, ayrıca özgül moment ve özgül rijitlik de belirlenmiştir. CFRP plakalar daha yüksek özgül eğilme rijitliği gösterirken, çelik daha yüksek mutlak rijitlik sergilemiştir. Kısa CFRP plaka ise, deliğin yakınındaki net kesit kaybına bağlı olarak daha düşük rijitlik göstermiştir. Mekanik bulgular, CFRP'nin, özellikle bağlantı elemanı bölgesi birincil tasarım özelliği olarak kabul edildiğinde, rijitlik-kütle performansını önceliklendiren tasarımlar için, özellikle uzun plakalarda uygun bir malzeme olduğunu göstermektedir.

1. INTRODUCTION

In contemporary medical practice, the use of internal and external orthopedic implants has become a prevalent approach to managing trauma-related fractures and surgical interventions, such as bone lengthening [1]. Ring fixators, rods, and V-frames are external fixators, while bone plates, pins, and screws are internal fixators [2]. Despite their seemingly simple design, bone plates are among the most frequently used internal fixation devices in orthopedics, reflecting their broad range of clinical applications [3]. These devices are commonly used in the treatment of fractures of long bones, including the femur, tibia, and ulna, as well as fractures of the small bones of the fingers. [4]. The diversity of their applications is illustrated in Figure 1.

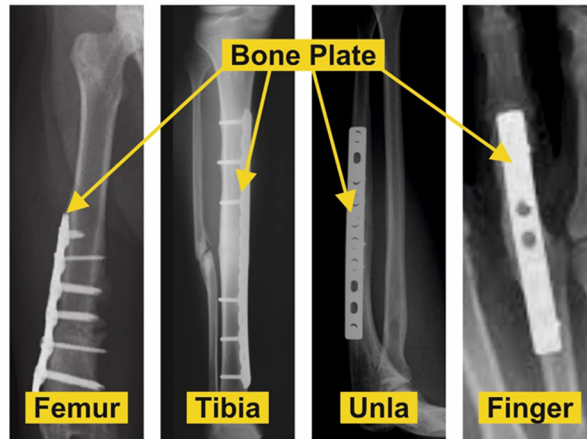


Figure 1. Example X-ray images of broken bones fixed with bone plates

The dimensions of bone plates (i.e., thickness, width, and length) are determined by the intended application [5]. A standard design configuration consists of a rectangular cross-section, with bone screw holes, and short and long variants. This configuration is intended to enhance bending stiffness during load transfer, while concurrently constraining stress concentrations around the screw holes [6]. In comparative evaluations, four-point bending is widely used to characterize plate behavior because the constant-moment region minimizes shear effects, enabling reliable assessment under bending loads [7-11]. Preliminary research has demonstrated that plate thickness, plate width, and plate type have a substantial impact on bending stiffness and strength. This establishes stiffness as a primary design parameter [12-17]. Material selection also constitutes a pivotal implant design parameter, as does dimensional design [18,19]. The selection of materials is typically predicated on a multifaceted set of criteria, including biocompatibility (ISO 10993), corrosion and fatigue resistance, mechanical compatibility, and imaging compatibility [19-21]. In contemporary applications, stainless steel (AISI 316L), titanium, and titanium-aluminum alloys are frequently utilized [18,19]. However, these materials have both advantages and disadvantages. Titanium and Ti-6Al-4V have been demonstrated to exhibit superior corrosion resistance and high imaging compatibility [19,22,23]. However, stainless steel is advantageous when the priorities are cost, formability, and high yield strength [19,21,22].

However, studies directly examining the performance of bone plates produced from these materials have been limited to investigations of bending stiffness or bending moment. Evaluations establishing the mass-stiffness relationship and density-normalized comparisons between materials are particularly inadequate. A frequently overlooked aspect in bone plate design is the stiffness-to-weight ratio. Historically, the primary design criteria have centered on dimensional and material compatibility. In contrast, the need to achieve the desired stability without unnecessary increases in mass has been of secondary importance. In this relationship, composite materials, which have become increasingly prevalent over the past half-century due to their low densities, mechanically tunable properties resulting from fiber orientation, and high specific performance, are beginning to replace traditional materials [24,25]. These materials have become popular choices for a wide range of engineering applications, including aerospace, automotive, military, and marine industries [2,26-31]. Despite their limited use relative to other applications, interest in their use in biomedical use has emerged [2,32,33]. Specifically, the capacity to modify the elastic modulus of these

materials to a range approaching that of bone can mitigate the risk of stress shielding during stabilization [32,34]. Regarding patient comfort, a reduction in implant mass has been shown to decrease the weight-bearing load and fatigue experienced during activities of daily living [35,36]. Furthermore, their radiolucent properties prevent overlap between bone and implant boundaries in X-ray images, and reduced MR/CT artifacts improve image quality during surgical planning and postoperative follow-up [37,38]. Consequently, there has been growing interest in studying carbon-fiber composite bone plates [33,37]. However, studies directly examining the performance of bone plates made from these materials are limited, and comparisons conducted under mass-normalized evaluations and geometric controls are particularly lacking.

Accordingly, the objective of this study is to compare the mechanical performance of bone plates made from 316L stainless steel and carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP) under standardized four-point bending tests. To ensure a material-focused comparison, the hole pattern and hole-size geometry were held constant across all configurations, thereby controlling design variables that would complicate the comparisons between materials. In order to enhance the generalizability of the findings, only two distinct plate lengths were added as a secondary design factor. To overcome the limitations of traditional evaluations, a set of metrics was collected. This array included not only absolute bending results but also mass-normalized indicators, such as specific stiffness and specific bending capacity. Consequently, stability was also assessed with respect to specific performance. The evidence obtained will support designers' decisions when selecting materials that balance absolute stability and stiffness efficiency, especially in applications where implant mass is critical. The study will provide a substantial reference framework for weight-sensitive bone-plate designs.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Stainless Steel Bone Plate

A simple dynamic compression plate (DCP) style, which has a rectangular cross-section and standard hole spacing, was selected to investigate solely the material effect within the same geometry. This choice ensured a fair, reproducible, and comparable benchmark by eliminating the confounding effects of design elements such as specific locking interfaces and reduced bottom contact surfaces, as well as process deviations in composite manufacturing. Long and short stainless-steel DCP bone plates were purchased from Hipokrat Medical Materials Manufacturing and Marketing, Inc. All geometric and dimensional data reported in this study (overall lengths, widths, thicknesses, hole diameters, and hole pitches) were determined exclusively by direct measurements of the test specimens using a digital caliper (0.01 mm resolution) and a micrometer. The dimensions of the long plates are 200 mm in length, 16 mm in width, and 4 mm in thickness. The holes are arranged in a cross-shaped configuration on the plate, totaling 12 slotted holes. The holes were measured and found to have diameters of 6 mm and center-to-center distances of 3 mm. The dimensions of the short plates are 150 mm in length, 16 mm in width, and 4 mm in thickness. The plate exhibits a total of 12 holes, including four outer holes, each with a diameter of 7 mm and five inner holes, each with a diameter of 5 mm. These holes are arranged in a cross pattern. The plates used in the study are shown in Figure 2.

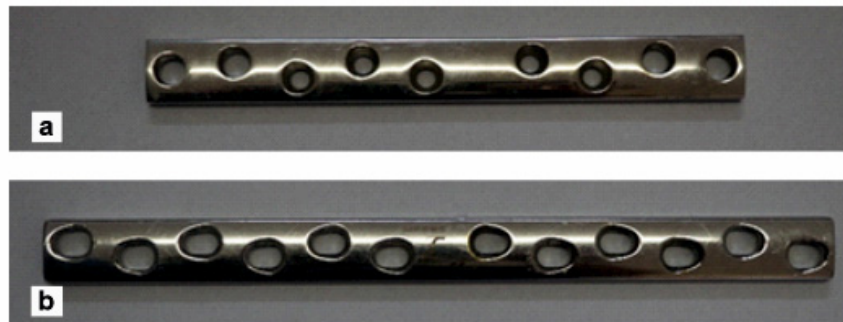


Figure 2. DCP stainless steel bone plates obtained from Hipokrat Medical Materials Manufacturing and Marketing Inc.; a) short plate, b) long plate

2.2. Manufacturing of Composite Bone Plate

The production of composite plates was carried out in detail, encompassing the initial material preparation through the final inspection steps, in accordance with the process shown in Figure 3. First, plain-woven carbon fabrics (300 g/m², 3K) were cut into 250 × 200 mm and 200 × 200 mm pieces without disrupting the fiber orientation of the main sheets, from which short and long plates were obtained. A total of 20 layers were planned to achieve a 4 mm thickness on the steel plates. The matrix was prepared by mixing the MGS Laminating Epoxy Set L160/H160 at the specified ratio of 100:25, using low speed to minimize air bubble formation. The fabrics were impregnated with resin and stacked on a waxed glass surface, covered with a perforated release film and a breather, and sealed in a vacuum bag. The stack was cured under a vacuum of 1 atm at 25 °C for 24 hours, after which the panel was removed from the mold (see Figure 3a). The final dimensions of 200 × 16 mm and 150 × 16 mm were achieved on a vertical cutting bench. A backing material was used during cutting to prevent edge delamination (Figure 3b). Then, on a vertical drilling bench, screw holes were drilled at specified diameters with appropriate countersink widths and aligned with the plate geometry. The hole diameter, position, and surface quality were inspected (Figure 3c). After completing these steps, composite plates with the same dimensions and hole layout as the flat stainless-steel plates were obtained (Figure 3d).

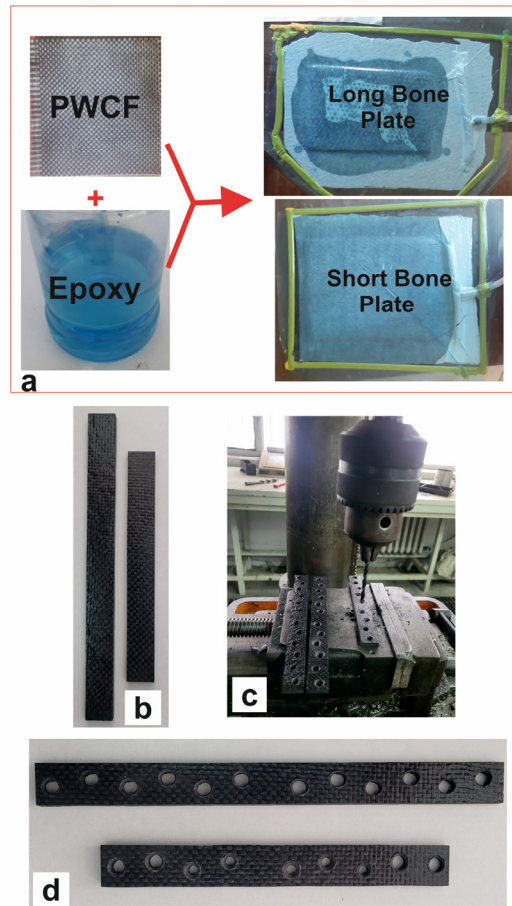


Figure 3. Production process of composite bone plates: a) vacuum production, b) plates cut to length and width, c) drilling of screw holes, d) finished bone plates

2.3. Four-point Bending Tests of Bone Plates

Four-point bending tests were conducted in accordance with ASTM F382 [39] and under displacement control. Figure 4a shows the standard schematic layout, and Figures 4b and 4c show representative layouts of metallic and composite short- and long-plate specimens. For ease of reading, the short stainless-steel bone plate (SSBP), long stainless-steel bone plate (LSBP), short composite bone plate (SCBP), and long composite bone plate (LCBP) were coded. Since ASTM F382 does not specify a fixed crosshead speed, a

loading speed of 1.0 mm/min was selected according to the composite bending standard ASTM D7264/D7264M to account for the polymer-matrix composite nature of some samples and to control speed-sensitivity effects (viscoelasticity). Three replicates were performed for each sample type (short metal, long metal, short composite, and long composite), resulting in a total of 12 tests. The tests were conducted at room temperature. In the four-point bending fixture, the lower opening, L , was set to 100 mm for the short group and 140 mm for the long group. The load-support distance (h) was determined based on the $L/3$ principle for each group. Accordingly, $h \approx 33.3$ mm for the short group and $h \approx 46.7$ mm for the long group. The center spacing a between the upper loading cylinders was kept the same for both groups and set at approximately 34 mm to account for production tolerances. During loading, displacement data at the loading point were recorded continuously. Loading continued until the linear region was sufficiently sampled to reliably calculate the proof load. Then the samples were loaded until the intersection of the $F-u$ curve and the offset line was reached or damage or failure occurred. Proof load (P_{proof}) is defined as the load at the intersection of the experimental curve and the linear fit, determined using the 0.2% offset specified in the standard. If the sample is damaged before the intersection occurs, F_{max} is reported.

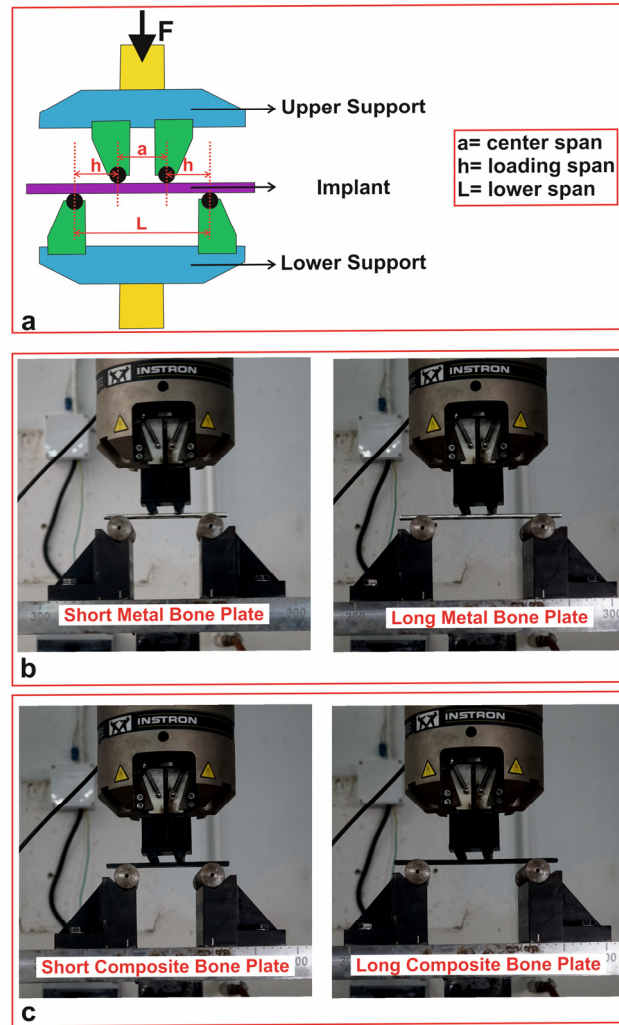


Figure 4. Four-point bending test setup and test specimens according to ASTM F382. a) Test schematic; b) SSBP and LSBP; c) SCBP and LCBP test configuration

Calculations were performed in accordance with ASTM F382 [39]. Bending stiffness (K) is obtained as the slope of the linear-elastic portion of the load-displacement curve ($F-u$): $K = dF/du$ (N/mm). The bending moment in the constant-moment region was included in the calculation using the equation $M = (P \cdot h)/2$; normally $P = P_{\text{proof}}$, while in the case of failure $P = F_{\text{max}}$. Equivalent structural bending stiffness (EI) was calculated using Equation 1 for four-point bending geometry. In this study, density normalization was performed based on the values obtained according to the standard F382. Using the concept of density

normalization, the "specific bending stiffness," and "specific moment capacity" were calculated as EI/ρ and M/ρ , respectively.

$$EI = \frac{(2h+3a)Kh^2}{12} \quad (1)$$

Symbols and units used in Equation (1) are: h (mm), load-support distance; a (mm), center-to-center spacing of the upper loading cylinders; K (N/mm), elastic stiffness. Analyses were performed on K , M , and EI obtained from four-point bending and, on their density, normalized counterparts (K/ρ , M/ρ and EI/ρ). Given that the design was balanced ($n = 3$ per cell), a two-way fixed-effects ANOVA was employed, with factors material (316L vs. CFRP) and length (short vs. long). The validity of the model assumptions was assessed by examining the residuals (Shapiro–Wilk for normality; Brown–Forsythe/Levene for homogeneity of variance). In instances where the assumptions were deemed invalid, a monotonic variance-stabilizing transformation (e.g., Box–Cox) was considered. When the omnibus test indicated significance, post hoc pairwise comparisons were conducted on estimated marginal means, with Tukey's HSD adjustment to control the family-wise error rate (Tukey–Kramer when group sizes/variances differed). The effect sizes were reported as partial η^2 for analysis of variance (ANOVA) and Hedges' g for paired comparisons, both with 95% confidence intervals (bootstrapped where appropriate). Unless stated otherwise, data are presented as mean $\pm$ SD. The significance level was set at $\alpha = 0.05$.

3. RESULT AND DISCUSSION

The F - u curves displayed in Figure 5 demonstrate a discernible initial elastic, linear phase and variations in the material, or clearance-induced slope across all four-point bending test configurations. The slope is steeper in steel specimens than those in CFRP, and shorter plates exhibit higher slope values than longer ones. Regarding the load criterion (see Figure 5), the P_{proof} value, defined as the 0.2% offset, was attained for the SSBP and LSBP specimens. However, due to the brittle nature of CFRP, the SCBP and LCBP specimens fractured in the linear region without reaching the elastic limit. Consequently, F_{max} was used in the results instead of P_{proof} for these plates.

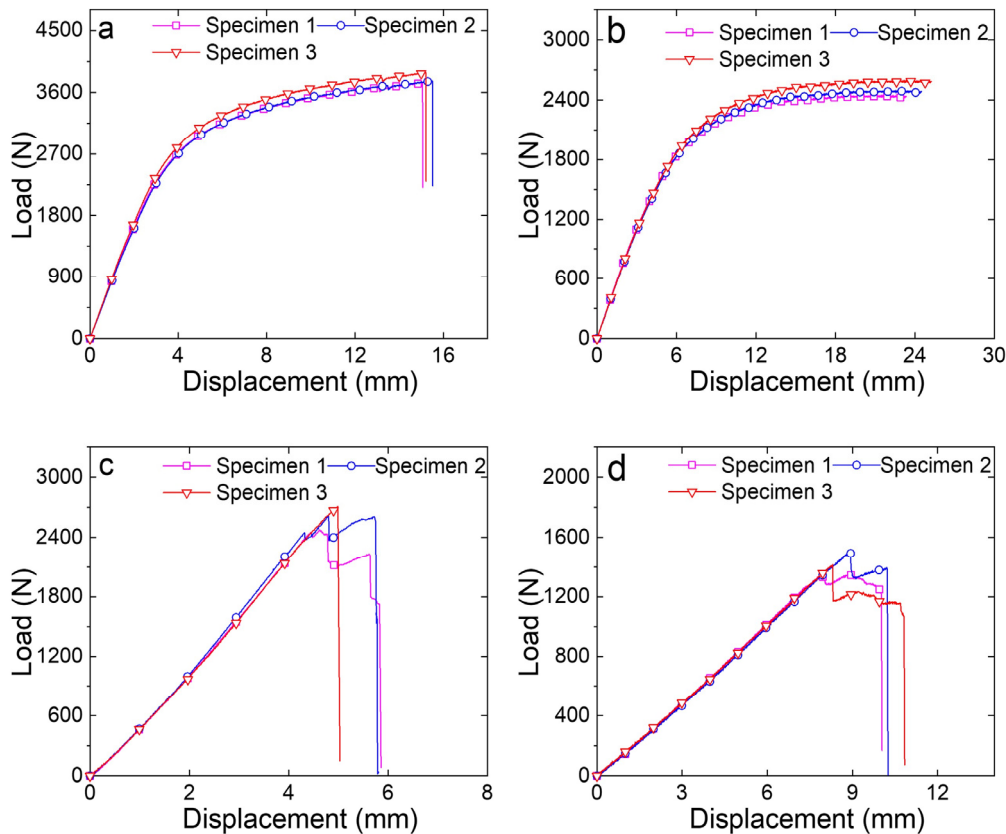


Figure 5. Force-displacement curves a) SSBP, b) LSBP, c) SCBP, d) LCBP

Table 1. Results calculated from the tests conducted and the data obtained in the study

Configuration		SSBP	SCBP	LSBP	LCBP
Force type	-	P_{proof}	F_{max}	P_{proof}	F_{max}
Force	P/F (N)	1511 ± 20	2599 ± 95	1019 ± 17	1423 ± 64
Bending rigidity	K (N/mm)	866 ± 18	600 ± 9	377 ± 4	179 ± 2
Bending moment	M (N.mm)	25180 ± 336	43323 ± 1591	23793 ± 409	33205 ± 1510
Equivalent bending rigidity	EI (N.mm ²)	13530176 ± 286332	9373851 ± 153555	13385692 ± 149484	6347744 ± 101129
Density	ρ (g/mm ³)	0.008	0.001486	0.008	0.001486
Specific K	K/ ρ (N.mm ² /g)	108320 ± 2292	404015 ± 6618	47191 ± 527	120480 ± 1919
Specific M	M/ ρ (N.mm ⁴ /g)	3147601 ± 42111	29154404 ± 1071234	2974240 ± 51209	22345696 ± 1016796
Specific EI	EI/ ρ (N.mm ⁵ /g)	1691272042 ± 35791562	6308109731 ± 103334609	1673211553 ± 18685604	4271698845 ± 68055046

It is imperative to evaluate the rigidity and moment findings in conjunction with Figures 6b and 6c and Table 1. Two-way ANOVA with Tukey-adjusted pairwise comparisons showed significant main effects of material and length on K and M (steel exhibited greater absolute stiffness than CFRP; increasing length reduced K but increased M in both materials). For density-normalized metrics, a significant material-by-length interaction was observed: both CFRP configurations exceeded steel in K/ ρ , M/ ρ , and EI/ ρ , and SCBP exceeded LCBP for all three metrics (all $p < 0.05$; see Figure 7 and Table 1). The increase in span length, despite the increase in the constant moment arm, has led to a reduction in K by approximately 31% (from 866 to 600 N/mm) in steel and by approximately 53% (from 377 to 179 N/mm) in CFRP, owing to the increased beam deflection. Concurrently, M has increased by approximately 72% (from 25,180 to 43,323 N.mm) in steel and by approximately 40% (from 23,793 to 33,205 N.mm) in CFRP, due to the augmented moment arm. The steel-to-CFRP hierarchy is maintained within the same span class, exhibiting a stiffness ratio of approximately 2.30 for short plates and approximately 3.35 for long plates. These results align with the rankings exhibited in Figures 6b and 6c and with the slope- and moment-based interpretations of the F–u curves.

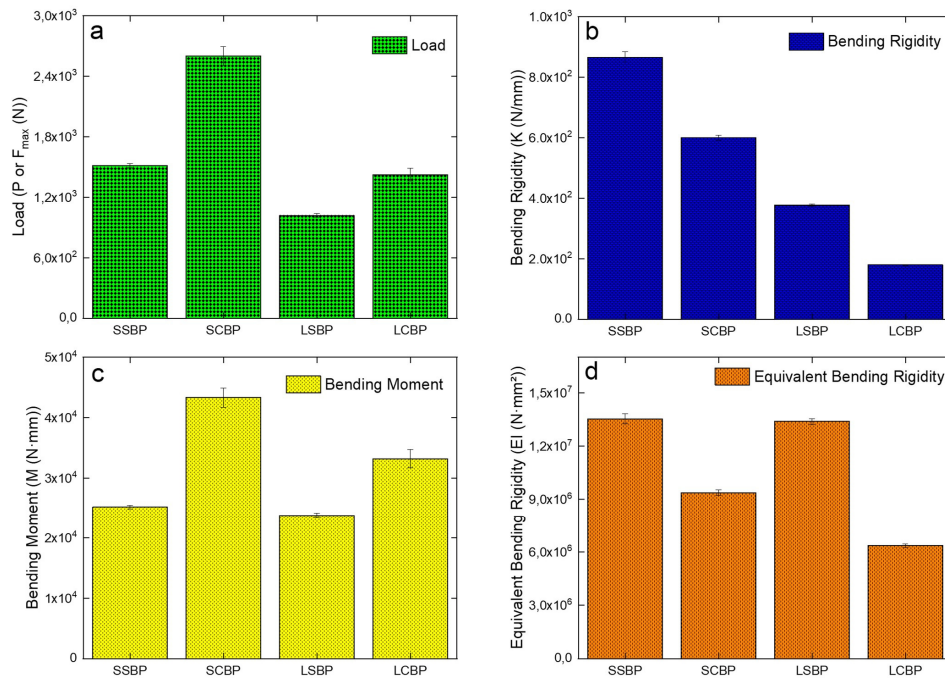


Figure 6. Raw metrics for four-point bending, a) load criterion, b) bending stiffness, c) bending moment, and d) equivalent bending stiffness. Bars show mean $\pm$ SD ($n = 3$). Distinct letters denote significant differences at $p 0.05$

As illustrated in Figure 6d, a critical distinction in equivalent bending stiffness (EI) is emphasized. While SSBP and LSBP align with anticipated trends, LCBP demonstrates a reduced absolute elastic inertia (EI) compared to steel plates. However, subsequent analysis will illustrate that LCBP exhibits a substantial advantage when mass-normalized. The low EI of LCBP is primarily span-driven (greater compliance at longer working length), whereas in the short CFRP configuration, local hole proximity and ply architecture can reduce EI relative to steel without indicating a material weakness. In plain-weave ($0^\circ/90^\circ$) architecture, interruption of fiber continuity around the hole, limited delamination in the same region, fiber crimp or directional deviation, bearing-induced local compliance losses, and resin microcracks reduce the measured stiffness. This, in turn, results in reduced reflection in the EI back-calculation. The trends in K and M within the same SCBP samples confirm that the material exhibits sufficient elastic response and load-carrying capacity. The problem stems from the effect of the geometry-hole-stacking triad in short clearances.

The results of the density normalization performed to isolate the mass effect are presented in Figure 7. As illustrated in Figures 7a–7c, the K/ρ , M/ρ , and EI/ρ ratios are shown, respectively. The densities of steel (ρ_{steel}) and carbon-fiber-reinforced plastic (CFRP) are 0.008 g/mm^3 [40] and 0.001486 g/mm^3 , respectively. The density of CFRP was calculated from samples prepared with dimensions $50 \times 50 \times 4 \text{ mm}$ and a mass of 14.86 g . For EI/ρ , SCBP $\approx 6.31 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{mm}^5/\text{g}$ and LCBP $\approx 4.27 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{mm}^5/\text{g}$, versus steel groups $\approx 1.69 \times 10^9$ and $\approx 1.67 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{mm}^5/\text{g}$, respectively. For K/ρ , SCBP $\approx 4.04 \times 10^5$, LCBP $\approx 1.20 \times 10^5$, and steel-long $\approx 4.72 \times 10^4 \text{ N}\cdot\text{mm}^2/\text{g}$. For M/ρ , SCBP $\approx 2.92 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{mm}^4/\text{g}$ and LCBP $\approx 2.23 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{mm}^4/\text{g}$, compared with steel-long $\approx 2.97 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{mm}^4/\text{g}$. Thus, SCBP > LCBP $\gg$ steel with respect to K/ρ , M/ρ , and EI/ρ , thereby quantitatively confirming the stiffness-to-mass advantage of CFRP.

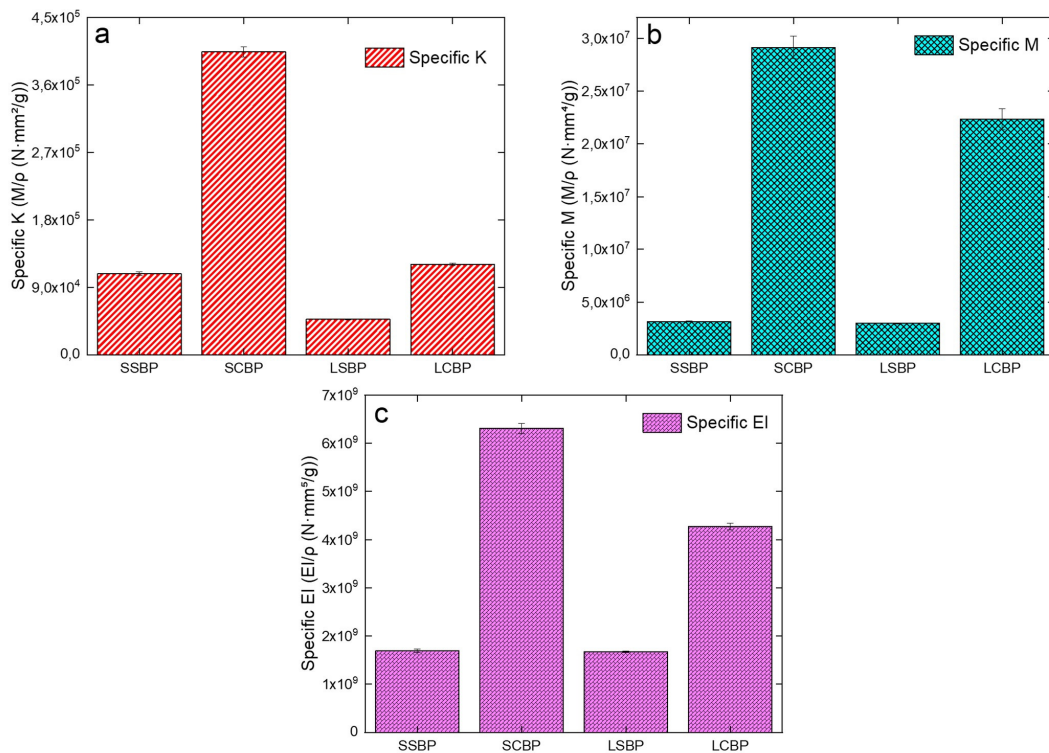


Figure 7. Four-point bending mass-normalized (specific) metrics, a) specific bending stiffness, b) specific moment, c) specific equivalent bending stiffness. Bars show mean $\pm$ SD ($n = 3$). Distinct letters denote significant differences at $p < 0.05$

These visual findings were corroborated statistically: significant main effects of material (on K, M, and EI/ρ) and length (on K and M), and a significant material $\times$ length interaction for EI/ρ . Tukey HSD showed that both CFRP groups had higher values than both steel groups, and that SCBP had higher values than LCBP within CFRP (all $p < 0.05$). The intergroup differences (error bars) in Figures 6–7 provide a visual representation of these statistical outcomes. The reproducibility of the experiments in this study is high. For

instance, the deviation for K is 2.08%; for short and long steel it is 1.50%; and for short and long CFRP it is 1.06% and 1.12%, respectively. For M, the respective values are 1.33%, 3.67%, 1.72%, and 4.55%. For EI, the values are 2.12%, 1.64%, 1.12%, and 1.59%, respectively. The low dispersion indicates that the differences forming the basis for interpretation are independent of sample noise.

From a design perspective, the findings of this study point to two clear conclusions. First, LCBP demonstrates superior performance relative to the reference LSBP, as evidenced by mass-normalized metrics (particularly EI/ρ). This outcome unequivocally substantiates the applicability of CFRP in contexts that prioritize lightness and stability. Secondly, SCBP exhibited the highest specific metrics (K/ρ , M/ρ , and EI/ρ) indicating that the mass-normalized advantage of CFRP is already pronounced in the short configuration. Nevertheless, fastener-region architecture (edge distance/spacing, hole-edge reinforcement, local fiber continuity, and edge finishing) remains a first-order design variable in safeguarding the absolute EI around holes. It is imperative to increase the hole spacing and edge distance to ensure that at least two screw pitches lie within the fixed-moment region. Furthermore, the implementation of local reinforcement around the hole is crucial. Maintaining 0° yarn continuity on the outer surface of plain-woven ($0^\circ/90^\circ$) fabrics is essential. Additionally, enhancing hole-edge finish and radius quality is vital to optimizing system performance. These interventions will allow an approach to the upper-limit behavior observed in LCBP in Figures 6d and 7c.

In summary, Figures 6–7 indicate that steel plates attain higher absolute stiffness, whereas CFRP plates are superior in specific (density-normalized) metrics. For CFRP, the short plate attains the highest specific values, while the long plate also surpasses both steel groups in specific values, despite exhibiting lower absolute bending stiffness, a result consistent with the long plate's extended span. These trends are corroborated by the reported group means ($\pm SD$) and the significance patterns depicted in Figures 6–7. Specifically, the short CFRP plate exhibited a reduction in absolute stiffness, which corresponded to the hole-region effects in laminated composites, such as net-section loss and local ply architecture. However, its efficiency advantage remained evident when normalized by mass. Collectively, these observations indicate that material selection significantly influences the equilibrium between absolute stiffness and stiffness efficiency when geometry is matched.

4. CONCLUSIONS

The present study compared 316L stainless steel and CFRP bone plates with identical geometry in four-point bending tests to determine whether CFRP can serve as a lower-mass alternative. The experimental findings indicate that steel plates exhibit higher absolute stiffness, whereas CFRP plates achieve superior specific stiffness. In the long plate, CFRP exhibited approximately 155% greater specific stiffness and approximately 651% greater specific bending moment than steel; in the short plate, the advantages were approximately 273% for specific stiffness and approximately 827% for specific bending moment. Conversely, steel exhibited higher absolute metrics: approximately 130% greater short absolute stiffness and 44% greater short bending stiffness, and approximately 235% greater long absolute stiffness and 111% greater long bending stiffness. In both short and long configurations, the lower absolute bending stiffness of CFRP relative to steel is explained by fiber interruptions at screw holes, local ply architecture, and hole-region fracture phenomena typical of laminated composites, rather than by an intrinsic weakness of the carbon-fiber material itself. Therefore, CFRP maintains a clear advantage in specific stiffness. Taken together, when the fastener region and working length are treated as primary design variables, CFRP can meet stability requirements with reduced mass. With geometry held constant and material densities normalized, the absolute and specific mechanical properties obtained for 316L steel and CFRP provide a design-oriented basis for material selection in weight-sensitive orthopedic applications.

5. REFERENCES

1. Mulinari-Santos, G., Paino Santana, A., Botacin, P.R. & Okamoto, R. (2024). Addressing the challenges in pediatric facial fractures: A narrative review of innovations in diagnosis and treatment. *Surgeries*, 5(4), 1130-1146.
2. Çetin, A. (2025). Use of sandwich structures in biomedical applications: an innovative design for external ring fixators. *Biomedical Materials*, 20(2), 025040.

3. Sen, D. (2022). Principles and overview of external fixators. In: Banerjee, A., Biberthaler, P., Shanmugasundaram, S. (eds) *Handbook of Orthopaedic Trauma Implantology*. Springer, Singapore.
4. Brouwer de Koning, S.G., de Winter, N., Moosabeiki, V., Mirzaali, M.J., Berenschot, A., Witbreuk, M.M.E.H. & Lagerburg, V. (2023). Design considerations for patient-specific bone fixation plates. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 61(12), 3233-3252.
5. Augat, P. & von Rüden, C. (2018). Evolution of fracture treatment with bone plates. *Injury*, 49(1), 2-7.
6. Haase, K. (2009). *Finite element analysis of orthopaedic plates and screws and the effects of stress shielding*. University of Ottawa, Canada.
7. Zhang, S., Patel, D., Brady, M., Gambill, S., Theivendran, K., Deshmukh, S., Swadener, G., Junaid, S. & Leslie, L. (2022). Experimental testing of fracture fixation plates – a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 236(9), 1253-1272.
8. Galea, G.L. & Price, J.S. (2014). Four-point bending protocols to study the effects of dynamic strain. In: *Osteoporosis and Osteoarthritis*, Springer, 117-130.
9. Grassi, L. & Isaksson, H. (2015). Extracting accurate strain measurements in bone mechanics: A critical review of current methods. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 50, 43-54.
10. Adanty, K. & Bhagavathula, K.B., Tronchin, O., Li, D.X., Nelson, K.N. (2023). The mechanical characterization and comparison of male and female calvaria under four-point bending impacts. *Journal of Biomechanical Engineering*, 145(5), 051009.
11. ASTM International, (2024). *Standard specification and test method for metallic bone plates (ASTM F382-24)*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
12. Strom, A.M., Garcia, T.C., Jandrey, K., Huber, M.L. & Stover, S.M. (2010). In vitro mechanical comparison of 2.0 and 2.4 limited-contact dynamic compression plates and 2.0 dynamic compression plates of different thicknesses. *Veterinary Surgery*, 39(7), 824-828.
13. Mariolani, J.R. & Belangero, W.D. (2013). Comparing the in vitro stiffness of straight-DCP, wave-DCP, and LCP bone plates for femoral osteosynthesis. *ISRN Orthopedics*, 308753.
14. Benli, S., Aksoy, S., Havıtcıoğlu, H. & Kucuk, M. (2008). Evaluation of bone plate with low-stiffness material in terms of stress distribution. *Journal of Biomechanics*, 41(15), 3229-3235.
15. Evans, A., Glyde, M., Day, R.E. & Hosgood, G. (2024). Effect of plate-bone distance and working length on 2.0-mm locking construct stiffness and plate strain in a diaphyseal fracture gap model: A biomechanical study. *Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology*, 37(1), 1-7.
16. Mori, Y., Kamimura, M., Ito, K., Koguchi, M., Tanaka, H., Kurishima, H., Koyama, T., Mori, N., Masahashi, N. & Aizawa, T. (2024). A review of the impacts of implant stiffness on fracture healing. *Applied Sciences*, 14, 2259.
17. Ganesh, V.K., Ramakrishna, K. & Ghista, D.N. (2005). Biomechanics of bone-fracture fixation by stiffness-graded plates in comparison with stainless-steel plates. *BioMedical Engineering OnLine*, 4, 46.
18. Abdudeen, A., Abu Qudeiri, J.E., Kareem, A. & Valappil, A.K. (2022). Latest developments and insights of orthopedic implants in biomaterials using additive manufacturing technologies. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 6(6), 162.
19. Eliaz, N. (2019). Corrosion of metallic biomaterials: A review. *Materials*, 12(3), 407.
20. Antunes, R.A. & de Oliveira, M.C.L. (2012). Corrosion fatigue of biomedical metallic alloys: Mechanisms and mitigation. *Acta Biomaterialia*, 8(3), 937-962.
21. Høl, P.J., Mølster, A. & Gjerdet, N.R. (2008). Should the galvanic combination of titanium and stainless steel surgical implants be avoided? *Injury*, 39(2), 161-169.
22. Geetha, M., Singh, A.K., Asokamani, R. & Gogia, A.K. (2009). Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants – A review. *Progress in Materials Science*, 54(3), 397-425.
23. Radzi, S., Cowin, G., Robinson, M., Pratap, J., Volp, A., Schuetz, M.A. & Schmutz, B. (2014). Metal artifacts from titanium and steel screws in CT, 1.5T and 3T MR images of the tibial Pilon: a quantitative assessment in 3D. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, 4(3), 163-172.
24. Oğuz, Z.A. (2025). Assessment of the change in hardness of particulated intraply carbon/aramid reinforced composites after UV aging. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 40(1), 219-226.
25. Yıldırım, S., Beylergil, B., Ergin, C.K. (2024). Investigation of the flexural performance of hybrid epoxy composites reinforced with nanosilica/sansevieria trifasciata (snake plant) natural fiber. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(4), 1103-1112.
26. Bukvić, M., Milojević, S., Gajević, S., Đorđević, M. & Stojanović, B. (2025). Production technologies and application of polymer composites in engineering: A review. *Polymers*, 17(16), 2187.

27. Georgantzinos, S.K., Giannopoulos, G.I., Stamoulis, K. & Markolefas, S. (2023). Composites in aerospace and mechanical engineering. *Materials*, 16(22), 7230.
28. Uzay, Ç. (2022). Mechanical and thermal characterization of laminar carbon/epoxy composites modified with magnesium oxide microparticles. *Polymer Composites*, 43(1), 299-310.
29. Acer, D.C. & Geren, N. (2025). Stainless steel wire mesh hybridization for improved bending fatigue performance in fiber reinforced polymer sandwich structures. *Polymer Composites*, 46(3), 923-942.
30. Geren, N., Acer, D.C., Uzay, C. & Bayramoğlu, M. (2021). The effect of boron carbide additive on the low-velocity impact properties of low-density foam core composite sandwich structures. *Polymer Composites*, 42(4), 2037-2049.
31. Karaçor, B. & Özcanlı, M. (2021). Effect of various matrix materials on mechanical properties of basalt/jute/glass fiber reinforced hybrid composites. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(4), 941-954.
32. Kurtz, S.M. & Devine, J.N. (2007). PEEK biomaterials in trauma, orthopedic, and spinal implants. *Biomaterials*, 28(32), 4845-4869.
33. Chua, C.Y.X., Liu, H.C., Di Trani, N., Susnjari, A., Ho, J., Scorrano, G., Rhudy, J., Sizovs, A., Lolli, G., Hernandez, N., Nucci, M.C., Cicalo, R., Ferrari, M. & Grattoni, A. (2021). Carbon fiber reinforced polymers for implantable medical devices. *Biomaterials*, 271, 120719.
34. Arevalo, S., Arthurs, C., Echeverria Molina, M.I., Pruitt, L. & Roy, A. (2023). An overview of the tribological and mechanical properties of PEEK and CFR-PEEK for use in total joint replacements. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 145, 105974.
35. Shiers-Gelalis, F., Giannoudis, V., Rodham, P. & Giannoudis, P.V. (2024). Surgeons' perspective on the use of carbon fibre plates for extremity fracture fixation. *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology*, 35(1), 26.
36. Giannoudis, V.P., Rodham, P., Antypas, A., Mofori, N., Chloros, G. & Giannoudis, P.V. (2023). Patient perspective on the use of carbon fibre plates for extremity fracture fixation. *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology*, 33(6), 2573-2577.
37. Rijs, Z., Weekhout, A., Daniel, S., Schoones, J. W., Groot, O.Q., Lozano-Calderon, S.A. & van de Sande, M.A.J. (2023). Carbon-fibre plates for traumatic and (impending) pathological fracture fixation: Where do we stand? A systematic review. *Journal of Orthopaedics and Traumatology*, 24(1), 42.
38. de Jong, J.J.A., Lataster, A., van Rietbergen, B., Arts, J.J., Geusens, P.P., van den Bergh, J.P.W. & Willems, P.C. (2017). Distal radius plate of CFR-PEEK has minimal effect compared to titanium plates on bone parameters in high-resolution peripheral quantitative computed tomography: A pilot study. *BMC Medical Imaging*, 17(1), 18.
39. ASTM International, (2024). *ASTM F382-24: Standard specification and test method for metallic bone plates*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
40. Shin, D.H., Seong, K.W., Nakajima, H.H., Puria, S. & Cho, J.H. (2020). A piezoelectric bellows round-window driver (PBRD) for middle-ear implants. *IEEE Access*, 8, 137947-137954.



Secret Image Hiding Method Based on Multi-Cover Image with Stego Image Sequence Detection Using Perceptive Hash

Ertuğrul GÜL^{1,a}, Saniye BİLGİÇ^{2,b}

¹Kayseri University, Software Engineering Department, Kayseri, Türkiye

²Kayseri University, Cyber Security Department, Kayseri, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-5591-3435; ^bORCID: 0009-0002-0375-0440

Article Info

Received : 09.07.2025

Accepted : 21.11.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1736687

Corresponding Author

Ertuğrul GÜL

ertugrulgul@kayseri.edu.tr

Keywords

Image hiding

Multi-cover

Perceptual hash

Stego image order

How to cite: GÜL, E., BİLGİÇ, S., (2025).

Secret Image Hiding Method Based on Multi-Cover Image with Stego Image Sequence Detection Using Perceptive Hash. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(4), 927-936.

ABSTRACT

As digital communication continues to expand, protecting the privacy and security of transmitted images has become increasingly crucial. Image hiding addresses this issue by concealing secret images within cover images. Most methods typically embed a secret image into a single cover image, which poses a risk if that cover image falls into the wrong hands. To address this issue, we propose a secret image hiding method that employs multiple cover images. The secret image is distributed across four cover images, while the fifth cover image is used to embed the perceptual hash values of the stego images in the proposed method. These hashes serve to accurately determine the correct sequence order of stego images during the extraction phase, especially in cases where file names or transmission order have been altered, ensuring proper extraction. Experimental results indicate that the proposed method achieves high visual quality of stego images, with an average PSNR of 44.9626 dB, and enables lossless recovery of the secret image.

Algısal Özet Kullanarak Taşıyıcı Görüntü Sırasını Tespit Eden Çoklu Kapak Görüntü Tabanlı Görüntü Gizleme Yöntemi

Makale Bilgileri

Geliş : 09.07.2025

Kabul : 21.11.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1736687

Sorumlu Yazar

Ertuğrul GÜL

ertugrulgul@kayseri.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Görüntü gizleme

Çoklu kapak

Algısal özet

Taşıyıcı görüntü sırası

Atıf şekli: GÜL, E., BİLGİÇ, S., (2025).

Algısal Özet Kullanarak Taşıyıcı Görüntü Sırasını Tespit Eden Çoklu Kapak Görüntü Tabanlı Görüntü Gizleme Yöntemi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(4), 927-936.

ÖZ

Dijital iletişim genişlemeye devam ettikçe, iletilen görüntülerin gizliliğini ve güvenliğini korumak giderek daha önemli hale gelmektedir. Görüntü gizleme teknikleri, gizli görüntüleri kapak görüntüler içerisine gömerek bu problemi ele alır. Çoğu yöntem gizli görüntüyü genellikle tek bir kapak görüntüsüne gizlemekte ve bu kapak görüntüsünün yanlış ellere geçmesi durumunda güvenlik riski ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada, bu sorunu ele almak için, birden fazla kapak görüntüsü kullanan bir gizli görüntü gizleme yöntemi önerilmektedir. Önerilen yöntemde, gizli görüntü dört farklı kapak görüntüsüne dağıtılırken, beşinci kapak görüntü ise taşıyıcı görüntülerin algısal özet değerlerini saklamak için kullanılmaktadır. Bu özet değerleri, özellikle dosya adlarının veya iletim sırasının değiştirildiği durumlarda, gizli görüntü çıkarma sürecinde taşıyıcı görüntülerin sırasını doğru bir şekilde belirlemeye yarar ve gizli görüntünün doğru çıkartılmasını sağlar. Deneysel sonuçlar, önerilen yöntemin ortalama 44,96 dB PSNR değerinde yüksek görsel kaliteye sahip taşıyıcı görüntüler ürettiğini ve gizli görüntünün kayıpsız olarak kurtarılabildiğini göstermektedir.

1. INTRODUCTION

Images have become one of the most essential forms of information in modern digital systems, playing a crucial role in areas such as medical diagnosis, surveillance, and military intelligence [1,2]. With the rapid growth of digital communication, ensuring the privacy and security of transmitted images has become increasingly critical [3-5]. While encryption protects the content of images, it does not conceal their existence, often leaving communications vulnerable to interception and analysis [6]. To address this limitation, image hiding—a technique that hides secret image/images within another digital image/images—has gained significant attention [7]. Among various carrier formats, digital images are widely preferred for secret image hiding due to their ubiquitous presence on the Internet and their ability to mask data imperceptibly [8]. Image hiding not only safeguards the content of the secret image but also conceals the very fact that communication is taking place, offering an additional layer of security in an era where data privacy is paramount.

Most image-hiding methods embed a secret image into a single cover image [9-12]. However, this approach increases the risk of unauthorized parties accessing the hidden information. Distributing the secret image across several cover images significantly reduces the chances that an intruder can retrieve the entire hidden content without access to all or most of the carriers [13]. Additionally, sending these carrier images via different channels provides added security, ensuring the safe transmission of the concealed secret image [14]. Ker and Pevný [15] introduced several batch hiding methods, including max-greedy, max-random, linear, even, and sqroot, which specify different ways of spreading a message across multiple cover images. These strategies differ in how they allocate payloads based on image capacity, ranging from focusing data in a few high-capacity covers to distributing it evenly or proportionally among all available covers. Al-Bayati and Al-Jarrah [16] introduced a dual-cover framework for hiding secret multimedia files within two cover images, improving security through distributed payloads. Although the method focuses on general data rather than secret images, it effectively enhances security by spreading the hidden content across multiple covers. Zhao et al. [17] proposed a universal embedding strategy for batch adaptive steganography in both spatial and JPEG domains. The method allows for simultaneous data hiding into multiple cover images. Because the hiding process alters the pixel histogram, the hiding order cannot be directly recovered from the stego images. Therefore, the authors transmit the hiding order and message length of each image through an external channel.

However, the use of multiple cover images introduces the challenge of correctly determining their order. Extracting the secret image from cover images processed in the wrong sequence will result in the incorrect extraction of the secret image. Simply transmitting or securely storing the filenames of the carrier images does not solve this problem, as their names can be intentionally or unintentionally changed during communication. Therefore, methods employing multiple carriers must address and overcome this issue to ensure accurate recovery of the hidden image.

In light of the previously mentioned challenges, we propose a new image hiding method that utilizes multiple cover images. This approach determines the sequence of cover images using the perceptual hash function. Experimental results indicate that our method can effectively extract the secret image, regardless of the cover image filenames or the order of the cover images. The key contributions of our method are summarized below:

- We propose an image hiding method that utilizes multiple cover images.
- We use a hash-based approach to determine the order of the cover images in the hiding process.
- Experimental results show that even when the order of the cover images is altered, the proposed method can extract the secret image losslessly.

The remainder of this paper is organized as follows: The next section describes the two main processes of the proposed method, namely the hiding algorithm with multi-cover image and the secret image extraction using hash-based cover image order detection. Section 3 presents experimental results to evaluate the performance of the proposed approach. Finally, the last section concludes the study and discusses potential directions for future work.

2. PROPOSED IMAGE HIDING METHOD

The proposed method consists of two primary processes, and this section outlines these two main processes: the hiding algorithm with multi-cover image and the secret image extraction using hash-based cover image order detection.

2.1. Hiding Algorithm with Multi-Cover

This method hides the secret image in multiple cover images and hides the hash information of the stego images in one cover image for determining the stego image order in the secret image extraction process. The block diagram of the hiding algorithm with multi-cover image is given in Figure 1. To start, the secret image is shuffled using a key. Next, this shuffled image is hidden within the first four cover images. During the hiding phase, each 8-bit pixel from the shuffled secret image is concealed by distributing its bits into the two least significant bits (LSBs) of the pixels at the same spatial coordinates (x, y) in each corresponding cover image. The use of two LSBs was selected to achieve a balance between hiding capacity and imperceptibility. Using only 1 LSB would not provide sufficient capacity to hide the complete secret image, while using more than 2 LSBs (e.g., 3 or 4) could lead to noticeable degradation in the visual quality of the cover images. Furthermore, embedding the secret image evenly across multiple cover images ensures that no single cover image suffers from significant visual distortion, maintaining an acceptable level of quality for all covers. Following, a 64-bit hash value is created for each stego image that contains the secret image data using the Perceptive Hash (P-Hash) [18]. The four 64-bit hash values are then merged to form a 256-bit hash sequence, which is hidden into the least significant bits (LSBs) of the first 256 pixels of the fifth cover image, producing a hash-embedded stego image. Finally, a 64-bit hash of this hash-embedded stego image is generated and stored in the database alongside the key, allowing for determination during the secret image extraction process. The pseudocode of the hiding algorithm with multi-cover image process is given in Algorithm 1.

Algorithm 1. Image hiding using multiple cover images

Input: Secret image SI_m , Cover images

$CI_{m_1}, CI_{m_2}, CI_{m_3}, CI_{m_4}, CI_{m_5}$, Key k

Output: Stego images $StIm_1, StIm_2, StIm_3, StIm_4, StIm_5$, Encrypted key/hash pair and session key

Step 1: Shuffle Secret Image

Shuffle the secret image SI_m using key k to obtain shuffled secret image SSI_m

Step 2: Hide Shuffled Secret Image into Cover Images

foreach pixel p located at position (x, y) in SSI_m **do**

Split p into four 2-bit segments: p_1, p_2, p_3, p_4

Hide p_1 into 2 LSBs of the pixel at position (x, y) in CI_{m_1}

Hide p_2 into 2 LSBs of the pixel at position (x, y) in CI_{m_2}

Hide p_3 into 2 LSBs of the pixel at position (x, y) in CI_{m_3}

Hide p_4 into 2 LSBs of the pixel at position (x, y) in CI_{m_4}

Obtain stego images $StIm_1, StIm_2, StIm_3, StIm_4$

Step 3: Generate Hashes of Stego Images

Generate hashes: $H_1 = P\text{-Hash}(StIm_1), \dots, H_4 = P\text{-Hash}(StIm_4)$

Merge the hashes: $H_m = H_1|H_2|H_3|H_4$ (256 bits)

Step 4: Embed Merged Hash into Fifth Cover Image

Embed H_m into the 1 LSBs of the first 256 pixels of CI_{m_5}

Obtain hash-embedded stego image $StIm_5$

Step 5: Final Hash and Storage

Generate $H_5 = P\text{-Hash}(StIm_5)$

Encrypt (k, H_5) using symmetric encryption algorithm using session key

Encrypt the symmetric session key with the recipient's public key

Store the encrypted key/hash pair and session key

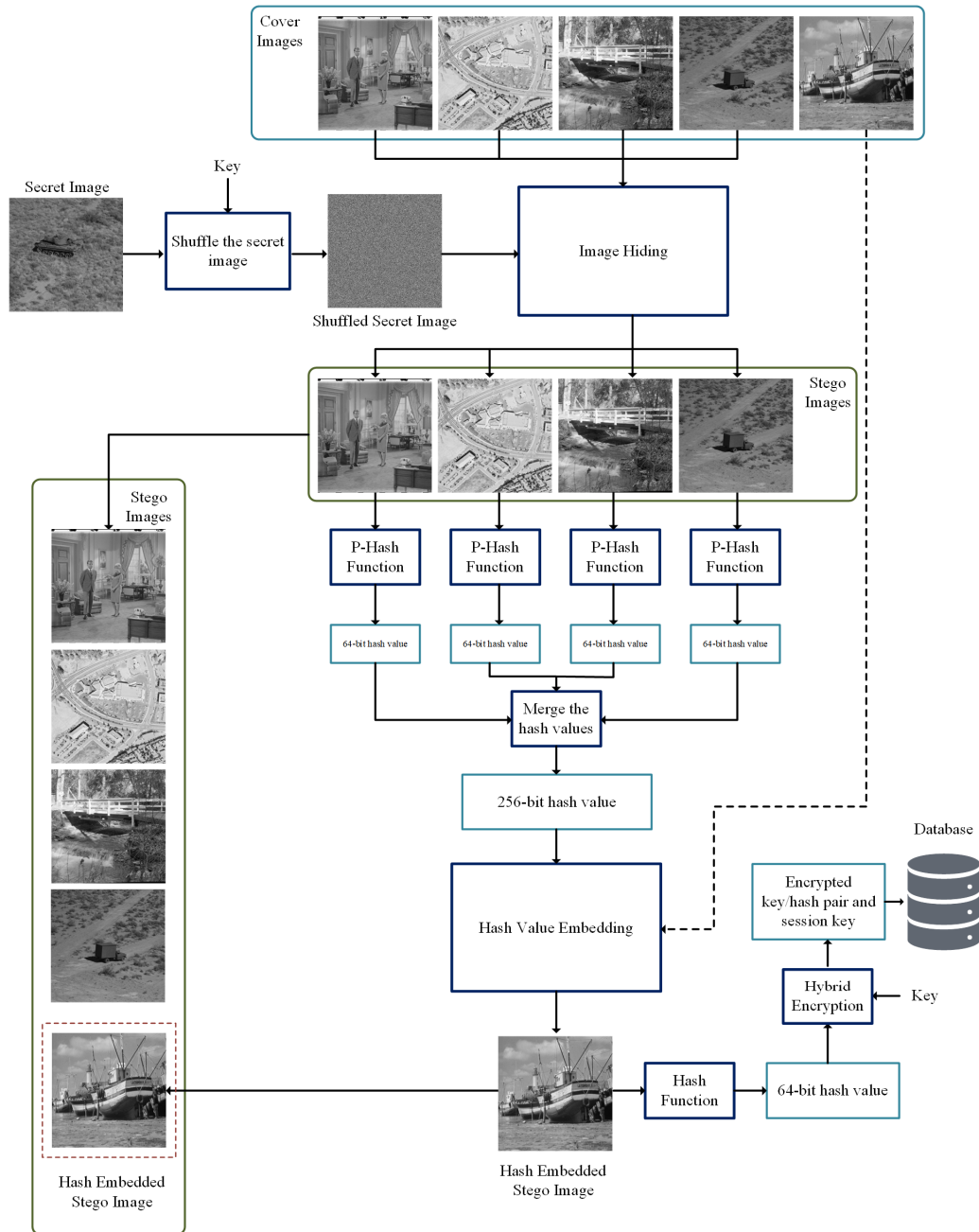


Figure 1. Diagram of the hiding algorithm with multi-cover image process

The P-Hash algorithm [18] is used to ensure the correct order of stego images, enabling accurate reconstruction of the secret image. P-Hash creates hashes that represent the visual content of each image, remaining robust against minor variations like noise or compression while still generating unique values for different images. In contrast, traditional cryptographic hash functions such as MD5 or SHA are highly sensitive to small changes, with even slight modifications completely changing the hash value, which makes them unsuitable for ordering based on visual similarity. Using P-Hash, only a part of the hash changes when small distortions occur, allowing the correct sequence of stego images to be reliably identified by comparing hash similarity.

To protect the shuffling key k and the 64-bit P-Hash value H_S , we adopt a hybrid encryption scheme. The pair (k, H_S) is first encrypted using a symmetric encryption algorithm (e.g., AES) with a randomly generated session key. This session key is then encrypted using an asymmetric encryption algorithm (e.g., RSA) with the recipient's public key. The encrypted key/hash pair and the encrypted session key are

securely stored in the database. During extraction, the recipient retrieves the encrypted components from the database, uses their private key to recover the session key, and decrypts (k, H_S) using the symmetric algorithm to proceed with secret image extraction.

2.2. Secret Image Extraction Using P-Hash-based Stego Image Order Detection

This technique determines the sequence order of stego images and extracts the hidden secret image from them. The block diagram of secret image extraction using hash based stego image order detection is given in Figure 2. Initially, the hash-embedded stego image is determined among all stego images by comparing the hash value obtained from the database using the Hamming distance. Next, the first 256 pixels of this image are utilized to extract a 256-bit hash value from their least significant bits (LSBs). This hash value is then segmented into four 64-bit hash values. These are compared with the newly generated P-Hash values of the remaining stego images using Hamming distance to determine the correct order of the four stego images containing the secret image. Subsequently, the two LSBs of the respective pixels in the ordered stego images are employed to reconstruct the 8-bit value of each pixel in the shuffled secret image. Finally, the shuffled secret image is reshuffled using the key to recover the hidden secret image. The pseudocode of the secret image extraction using the hash-based stego image order detection process is given in Algorithm 2.

Algorithm 2: Hash-based Stego Image Order Detection and Secret Image Extraction

Input: Stego images $StIm_1, StIm_2, StIm_3, StIm_4, StIm_5$, Encrypted key/hash pair and session key

Output: Extracted secret image S_e

Step 1: Retrieve and Decrypt Key and Stored Hash

Retrieve the encrypted key/hash pair and session key from the database

Decrypt the session key with the recipient's private key

Decrypt the key/hash (k, H_S) pair with the session key

Step 2: Determine Hash-Embedded Stego Image

Initialize $minDist \leftarrow \infty$

foreach stego image S_i in $\{StIm_1, StIm_2, StIm_3, StIm_4, StIm_5\}$ **do**

Compute hash $H_i = P\text{-Hash}(S_i)$

Compute Hamming distance $d = Hamming(H_i, H_S)$

If $d < minDist$ **then**

$minDist \leftarrow d$

$S_H \leftarrow S_i$ // Closest hash match found

Step 3: Extract Hash Sequence from S_H

Extract 1 LSBs from the first 256 pixels of S_H to obtain 256-bit hash sequence

H_m

Split H_m into four 64-bit hash values: H'_1, H'_2, H'_3, H'_4

Step 4: Determine Correct Stego Image Order

Compute hashes of the remaining four stego images

Compare each computed P-Hash of the stego images with the H'_i using Hamming distance.

Match each H'_i with the corresponding recomputed hash based on the closest P-Hash match to determine the correct image order $[StIm'_1, StIm'_2, StIm'_3, StIm'_4]$

Step 5: Reconstruct Shuffled Secret Image

foreach pixel index i **do**

Extract 2 LSBs from pixel i of $StIm'_1, StIm'_2, StIm'_3, StIm'_4$

Merge the four parts to form an 8-bit pixel p_i of the extracted shuffled secret image $SSIm_e$

Step 6: Recover Secret Image

Reshuffle $SSIm_e$ using key k to obtain extracted secret image S_e

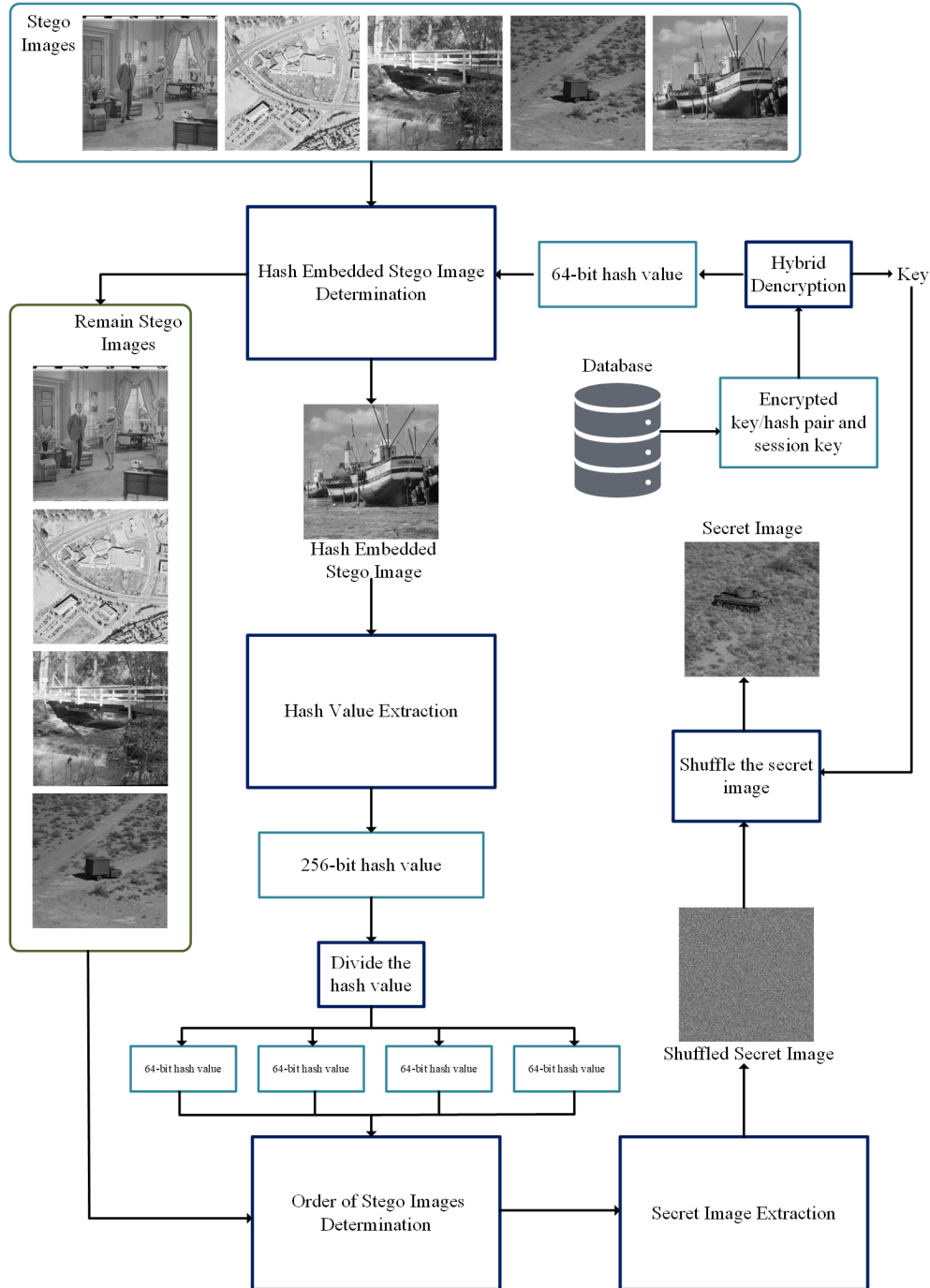


Figure 2. Diagram of the secret image extraction using the hash-based stego image order detection process

3. EXPERIMENTAL RESULTS

Experiments were conducted using MATLAB R2019a, employing images of Tank, Couple, Aerial, Stream and bridge, Truck, and Fishing Boat obtained from the USC-SIPI Image Database [19]. The original images used in the experiments are shown in Figure 3. Specifically, Figures 3 (b)-(f) depict the cover images, while Figure 3 (a) illustrates the secret image.

The secret image shown in Figure 3 (a) was hidden using the proposed method with five cover images. Figure 4 (a)–5(d) display the four images containing the hidden secret image, while Figure 4(e) shows the hash-embedded stego image. Upon examining Figures 3 and 4, it is evident that there is no perceptible

difference between the cover and stego images. Figure 4 (See (f)) also illustrates the secret image extracted from the stego images using the proposed method. The extracted secret image shows no noticeable difference compared to the original secret image.

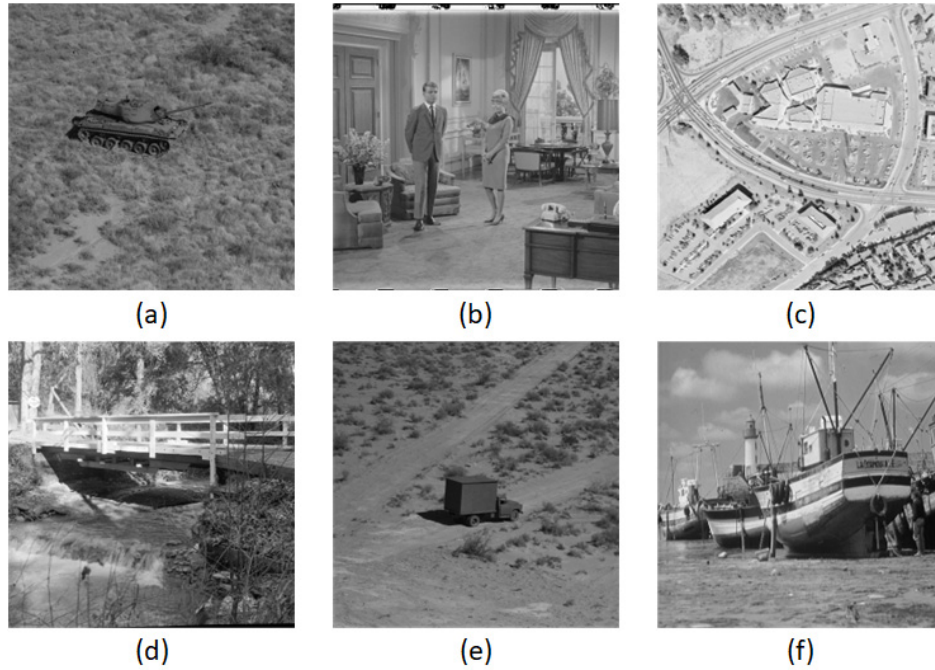


Figure 3. Secret image and cover images

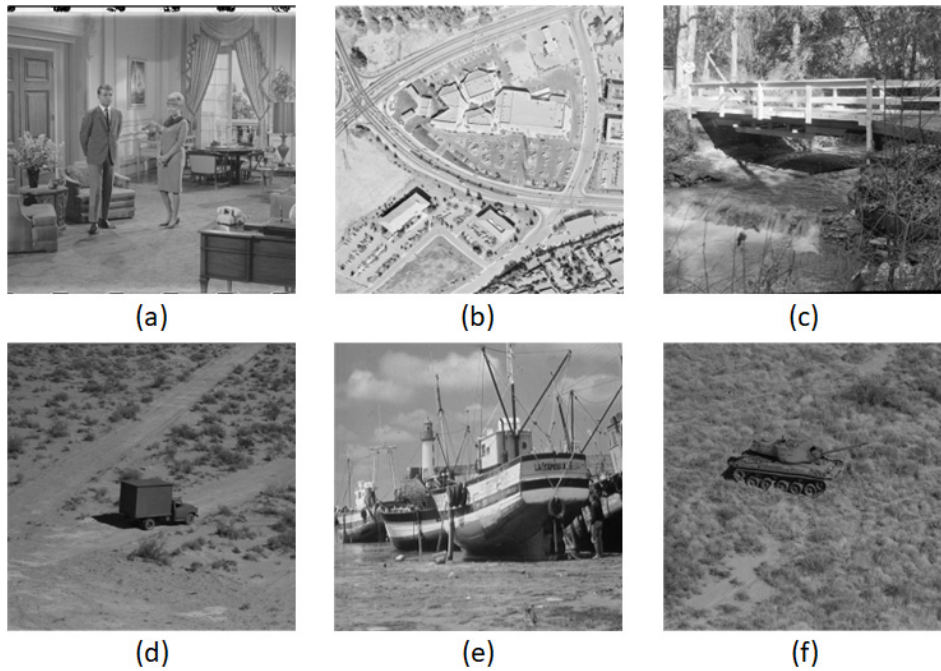


Figure 4. Stego images and extracted secret image

Table 1 presents the Peak signal-to-noise ratio (PSNR) values of both the stego images and the extracted secret image. The PSNR metric measures the similarity between the original and processed images, where a higher PSNR value indicates better image quality and effectiveness of the method. Among the stego images, the highest PSNR value was obtained from the Fishing Boat image, while the lowest was obtained from the Truck image. The reason for the highest PSNR value in the Fishing Boat image is that only the

hash values of the other stego images were embedded into it. Additionally, since only the least significant bit (LSB) of 256 pixels was used to embed the hash value, the PSNR value remained high.

Table 1. PSNR result of stego images and extracted secret image

	PSNR
Stego 1	46.1411
Stego 2	44.1045
Stego 3	45.5604
Stego 4	44.0444
Stego 5	81.0128
Average	52.1727
Secret image	Inf

The average PSNR value of the stego images was 52.1727 dB, boosted by the hash-embedded stego image. The average PSNR value of the stego images containing the hidden secret image was 44.9626 dB. Moreover, the PSNR value of the extracted secret image is effectively infinite, indicating that there is no difference between the original secret image and the extracted image, and that it was recovered without any loss.

In another experiment, the order of the stego images was rearranged to evaluate the performance of the proposed method. Table 2 presents the sequence order of the stego images along with the PSNR values of the extracted secret image. As observed from the table; despite changing the order of the stego images, the proposed method successfully recovered the secret image without any loss. This demonstrates the effectiveness of the proposed hash-based stego image ordering approach.

Table 2. Evaluation of the proposed method against stego images reordering

Stego image order					PSNR
1	2	3	4	5	Inf
4	2	5	3	1	Inf
2	5	1	4	3	Inf
3	4	5	2	1	Inf
3	1	4	5	2	Inf
5	3	2	1	4	Inf

Although classical steganalysis methods [20-22] may be able to detect LSB modifications in individual stego images, the overall security of the proposed approach is enhanced by using multiple independent covers, key-based shuffling of the secret image, and P-hash-based ordering of stego images. As a result, even if some stego images are detected and intercepted by unauthorized parties, it remains highly difficult to recover the entire secret image without access to all embedded components and the key.

To evaluate the computational efficiency of the proposed method, the execution times of both the embedding and extraction processes were measured on an Intel Core i7-9700 CPU @ 3.00 Ghz. The results are presented in Table 3. Table indicates that both hiding and extraction processes are completed within fractions of a second, demonstrating the computational efficiency of the proposed method.

Table 3. Computational cost of the hiding and extraction processes of the proposed method

Process	Execution Time (s)
Hiding	0.2154
Extraction	0.1645

4. CONCLUSIONS

This paper presents a secret image hiding method using multiple cover images based on stego image sequence order detection with hash values. In the proposed approach, the secret image is hidden by utilizing the 2 LSBs of four different cover images. Additionally, the hash values of the stego images containing the secret image are embedded in a fifth stego image. These hash values are later used to ensure the correct processing order of the stego images during the secret image extraction phase.

The experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed method, achieving an average PSNR of 44.9626 dB for the stego images, indicating high image quality. Moreover, the secret image was successfully extracted without any loss. In further experiments, where the order of stego images was intentionally altered, the proposed method still managed to correctly recover the secret image.

As future work, we plan to develop a robust image hiding approach to resistance against common attacks. Moreover, a CNN-based feature extraction framework will be explored to construct a more reliable and adaptive stego image ordering mechanism.

5. REFERENCES

1. Uzdu, B., Tekeli, E., İbrikçi, T., Rashid, H.U. & Ramachandran, G. (2025). Diagnosis of hepatocellular carcinoma-HCC liver cancer using federated learning on MR images. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 40(3), 531-544.
2. Kartal, S. (2022). Otokodlayıcılar kullanarak uzaktan algılama görüntülerindeki eksik verilerin yeniden yapılandırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(4), 853-862.
3. Elmaci, M., Toprak, A.N. & Aslantas, V. (2024). Detection of background forgery using a two-stream convolutional neural network architecture. *Multimedia Tools and Applications*, 83(12), 36739-36766.
4. Melman, A. & Evsutin, O. (2023). Image data hiding schemes based on metaheuristic optimization: a review. *Artificial Intelligence Review*, 56(12), 15375-15447.
5. Gul, E. (2022). A blind robust color image watermarking method based on discrete wavelet transform and discrete cosine transform using grayscale watermark image. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 34(22), e6884.
6. Gutub, A. & Al-Shaarani, F. (2020). Efficient implementation of multi-image secret hiding based on LSB and DWT steganography comparisons. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(4), 2631-2644.
7. Ye, G. & Chen, Z. (2025). Authenticated reversible image hiding algorithm based on blockchain technology. *Cluster Computing*, 28(1), 10.
8. Song, B., Wei, P., Wu, S., Lin, Y. & Zhou, W. (2024). A survey on deep-learning-based image steganography. *Expert Systems with Applications*, 124390.
9. Shang, J. & Xu, X. (2024). Research on a double image security transmission algorithm of image encryption and hiding. *Measurement: Sensors*, 31, 100942.
10. Kaur, S., Bansal, S. & Bansal, R.K. (2021). Image steganography for securing secret data using hybrid hiding model. *Multimedia Tools and Applications*, 80, 7749-7769.
11. Arora, H., Soni, G.K., Kushwaha, R.K. & Prasoon, P. (2021). Digital image security based on the hybrid model of image hiding and encryption. In *2021 6th International conference on communication and electronics systems (ICCES)*, 1153-1157, IEEE.
12. Heednacram, A. & Keaomane, Y. (2024). Four enhanced algorithms for full size image hiding in chest x-ray images. *Multimedia Tools and Applications*, 83(30), 74855-74881.
13. Al-Bayati, M.T. & Al-Jarrah, M.M. (2016). DuoHide: a secure system for hiding multimedia files in dual cover images. In *2016 9th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)*, 138-142, IEEE.
14. Gul, E. & Ozturk, S. (2023). A secret image sharing method based on block-wise cheating detection and recovery on shadow images. *Computers and Electrical Engineering*, 110, 108882.
15. Ker, A.D. & Pevny, T. (2012). Batch steganography in the real world. In *Proceedings of the on Multimedia and security*, 1-10.
16. Al-Bayati, M.T. & Al-Jarrah, M.M. (2016). DuoHide: a secure system for hiding multimedia files in dual cover images. In *2016 9th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)*, 138-142, IEEE.
17. Zhao, Z., Guan, Q., Zhao, X., Yu, H. & Liu, C. (2018). Universal embedding strategy for batch adaptive steganography in both spatial and JPEG domain. *Multimedia Tools and Applications*, 77(11), 14093-14113.
18. Aissi, M.B., El Hazzat, S. & Yakhlef, M.B. (2024). Evaluation of perceptual hashing algorithms for digital image authenticity. In *2024 3rd International Conference on Embedded Systems and Artificial Intelligence (ESAI)*, 1-7, IEEE.
19. University of Southern California, Signal and Image Processing Institute (USC-SIPI), USC-SIPI Image Database, <http://sipi.usc.edu/database/>. Erişim tarihi: 11.06. 2025.

20. Khalind, O. & Aziz, B. (2014). Detecting 2LSB steganography using extended pairs of values analysis. In *Mobile Multimedia/Image Processing, Security, and Applications 2014*, 9120, 7-18. SPIE.
21. Fridrich, J., Goljan, M. & Du, R. (2001). Detecting LSB steganography in color, and gray-scale images. *IEEE Multimedia*, 8(4), 22-28.
22. Westfeld, A. & Pfitzmann, A. (1999). Attacks on steganographic systems: Breaking the steganographic utilities EzStego, Jsteg, Steganos, and S-Tools-and some lessons learned. In *International workshop on information hiding*, 61-76. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Investigation of Tensile Strength in 3D Printed PLA+ Samples: Influence of Raster Angle and Infill Density

Mete Han BOZTEPE^{1,a}

¹Sirnak University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Sirnak, Türkiye

^aORCID: 0000-0001-8418-1352

Article Info

Received : 06.03.2025

Accepted : 04.12.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1652812

Corresponding Author

Mete Han BOZTEPE

metehanboztepe@sirnak.edu.tr

Keywords

3D

FDM

Raster angle

Infill density

How to cite: BOZTEPE, M.H., (2025). Investigation of Tensile Strength in 3D Printed PLA+ Samples: Influence of Raster Angle and Infill Density. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(4), 937-948.

ABSTRACT

In this study, the mechanical properties of PLA+ samples produced through Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printing are investigated. The research focuses on the effects of two critical parameters on tensile strength in 3D printers. These are raster angle and infill density. Raster angles of 0°, 90° and ±45° were chosen. The infill density, which determines the internal material distribution, was set to 20%, 50% and 100%. As a result of the tensile test, the highest ultimate strength value of 44.52 MPa was obtained in the ±45°-100% combination. The highest modulus of elasticity value was obtained from 90°-100% combination with 1.55 GPa. These findings highlight the critical role of printing parameters in determining the mechanical performance of FDM printed PLA+ parts. The study provides information for optimizing print settings to achieve desired strength and stiffness properties in 3D printed components for engineering applications.

3D Baskılı PLA+ Numunelerinin Çekme Dayanımının İncelenmesi: Yazdırma Açısı ve Dolgu Yoğunluğunun Etkisi

Makale Bilgileri

Geliş : 06.03.2025

Kabul : 04.12.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1652812

Sorumlu Yazar

Mete Han BOZTEPE

metehanboztepe@sirnak.edu.tr

Anahtar Kelimeler

3B

FDM

Yazdırma açısı

Dolgu yoğunluğu

Atıf şekli: BOZTEPE, M.H., (2025). 3D Baskılı PLA+ Numunelerinin Çekme Dayanımının İncelenmesi: Yazdırma Açısı ve Dolgu Yoğunluğunun Etkisi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(4), 937-948.

ÖZ

Bu çalışmada, Erimiş Biriktirme Modelleme (FDM) 3D baskı yoluyla üretilen PLA+ numunelerinin mekanik özellikleri incelenmiştir. Araştırma, 3D yazıcılarda iki kritik parametrenin gerilme mukavemeti üzerindeki etkilerine odaklanmaktadır. Bunlar tarama açısı ve dolgu yoğunluğudur. Raster açıları 0°, 90° ve ±45° olarak seçilmiştir. İç malzeme dağılımını belirleyen dolgu yoğunluğu %20, %50 ve %100 olarak ayarlanmıştır. Çekme testi sonucunda en yüksek nihai mukavemet değeri 44,52 MPa ile ±45°-%100 kombinasyonunda elde edilmiştir. En yüksek elastisite modülü değeri ise 1,55 GPa ile %90°-100 kombinasyonundan elde edilmiştir. Bu bulgular, FDM baskılı PLA+ parçaların mekanik performansının belirlenmesinde baskı parametrelerinin kritik rolünü vurgulamaktadır. Çalışma, mühendislik uygulamaları için 3D baskılı bileşenlerde istenen mukavemet ve rijitlik özelliklerini elde etmek için baskı ayarlarını optimize etmek için bilgi sağlar.

1. INTRODUCTION

One of the 21st-century manufacturing industries is the 3D printing revolution. The next goal is to make this technology affordable for all home purposes [1]. Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printing is an additive manufacturing technique used to produce solid thermoplastic polymer objects directly from a computer-aided design [2-4]. Some of the techniques available in 3D printing technology are Fusion Deposition Method (FDM), Selective Laser Sintering (SLS), Multi-Jet Fusion (MJF), Stereolithography Laser Printers (SL), and Digital Light Processing (DLP) [3]. The areas where FDM 3D printing technology is used are wide. For example, it is widely used in different fields such as medicine, automotive, and aviation [5].

Thermoplastic polymers such as acrylonitrile butadiene styrene (ABS) and polylactic acid (PLA) are the most commonly used materials for 3D printing technology. PLA material is often used in 3D printing due to its availability, lightness, and biocompatibility [6]. PLA has many advantages, including being biodegradable, recyclable, and easily thermally processed. The use of PLA polymers in blow molding, thermoforming, injection molding, fiber spinning, film forming, and biomedical industries has expanded over the past decade. However, due to some disadvantages such as mechanical weakness, water solubility rate, etc., its use is limited [7]. To overcome these disadvantages, PLA composites can be prepared with appropriate additives, such as nanographite as a reinforcement material, to produce a nanocomposite filament [7, 8]. Newly developed PLA composites are widely used in both academic and industrial environments. New PLA composites are used in areas such as electrical conductivity, electromagnetics, sensors, biomedical, tissue engineering, human bone repair, antibacterial, bioprinting, battery, aviation, automotive, four-dimensional (4D) printing, smart textiles and the environment [7].

Determining the mechanical properties of materials after 3D printing at various raster angles is crucial to assess their usability in different applications. Albadrani [9] simulated stress-strain with ANSYS results to investigate the mechanical properties of PLA and PETG samples with raster angles of 15° and 30°. The results showed that the raster angle significantly affected the mechanical properties of both material types. Horasan and Sarac [10] investigated the fatigue behavior of FDM-3D printed polylactic acid (PLA) materials by rotating bending fatigue tests and finite element studies with varying printing speed and raster angle parameters. PLA samples were produced at five different raster angles (0°, 30°, 45°, 60° and 90°) and two different printing speeds (20 and 80 mm/s). It was reported that the raster angle affected the fatigue life significantly. The highest fatigue life was obtained at the 30° raster angle, while the lowest was found at the 90° raster angle. Increasing the printing speed from 20 to 80 mm/s reduced the fatigue life of all PLA samples. The results obtained from the finite element analysis are consistent with the experimental results. Afrose et al. [11] investigated the tensile and fatigue tests of PLA parts depending on the raster angle. As a result of tensile tests, the best strength value was obtained at 0° raster angle, while the best fatigue strength was found at 45° raster angle. Letcher and Waytashek [12] investigated the mechanical properties of PLA specimens with 0°, 45° and 90° raster angles by tensile, flexure and fatigue tests. The best strength values in tensile tests were found at 45° raster angle and the maximum strength value in three-point bending tests was found at 0 raster angle. As a result of fatigue tests, it was reported that the fatigue life decreased significantly at 90° raster angle. The material used is one of the main factors affecting the tensile strength of 3D printed samples. For example, average tensile strength values of 28.5 MPa and 56.5 MPa were obtained for ABS and PLA, respectively [13]. The raster angle also significantly affects the mechanical properties; samples printed parallel to the tensile direction show superior tensile strength compared to those printed in other directions [14]. This is confirmed by findings showing that a raster angle of 0° provides higher tensile strength than a 90° [15]. The evaluation of tensile strength is typically conducted following standardized methods, such as ASTM D638, which provides a framework for testing the tensile properties of plastics [16]. Çakan [17] investigated the effects of raster angle on tensile and surface roughness. It was determined that the ultimate tensile strength (UTS) decreased with increasing raster angle, therefore the 0° raster angle parallel to the tensile direction provided the highest strength. In addition, the $\pm 45^\circ$ raster angle provided the most ductile behavior. It was reported that the surface roughness values increased up to 7 μm when perpendicular to the tensile direction, while decreasing below 1 μm when parallel. Similar results were reported by Rajpurohit and Dave [18]. In addition to material selection and raster angle, printing

parameters such as layer height, printing speed, and bed temperature affect tensile strength. For example, changing the layer height between 0.2 mm and 0.4 mm has been shown to affect the dimensional accuracy and mechanical properties of printed samples [19]. Printing speed affects tensile strength because it affects the bond between layers [20]. Günay et al. [21] studied the effects of infill ratio, raster angle and printing speed on the mechanical properties of PLA+ samples produced using a 3D printer. For this purpose, tensile tests of the samples were performed. Additionally, the effects of the process parameters on tensile strength were determined through variance analysis (ANOVA), and their optimization was conducted using the Taguchi methodology. As a result, the most effective parameter on the tensile strength was the infill ratio, while the raster angle and printing speed were reported as other important parameters, respectively. Recent studies have shown that the mechanical performance of PLA parts manufactured via FDM can be significantly improved through post-processing. Kamer and Uzay [22] investigated the effect of CNC milling on tensile samples produced with 1.75 mm and 2.85 mm PLA filaments. The results revealed that the CNC-milled samples increased their elongation at break by 13.45% and 33.55%, respectively. This improvement was attributed to the removal of surface irregularities resulting from the printing process. Ramírez-Prieto et al. [23] investigated the tensile behavior of PLA+ samples produced using Fusion Deposition Modeling (FDM) and the effect of raster orientation on mechanical performance. Three raster configurations were examined: (0°/0°), (0°/90°), and (45°/-45°). Their results revealed that the raster angle had a significant effect on the tensile strength of the printed samples. Samples with a parallel raster orientation (0°/0°) exhibited the highest tensile strength due to the alignment of the filaments along the loading direction, facilitating efficient stress transfer and improving load-carrying capacity. In contrast, grid (0°/90°) and cross (45°/-45°) patterns exhibited progressively lower tensile strengths.

This study examines the mechanical performance of PLA+ samples produced through Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printing. Two critical parameters were chosen for this; raster angle and infill density. Raster angles were set at 0°, 90°, and ±45°. At the same time, the infill density, which determines the internal material distribution, was set at 20%, 50% and 100%. In this way, the effects of raster angle and infill density on the tensile strength were analyzed. For this purpose, dog bone shaped specimens were produced and tensile tests were performed according to ASTM D638 standard.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Material and Filament Properties

In this study, PLA+ was used due to its environmentally friendly and biodegradable properties. These filaments are frequently used in FDM applications. In addition, since they are produced from renewable resources, the energy consumed in processing is low. It is used in many applications for rapid prototyping and economic reasons. However, it has a disadvantage such as mechanical weakness, and this problem is overcome with innovative approaches such as surface modifications. These developments allow PLA to be used in a wider range of applications. There are some fundamental differences between PLA (Polylactic Acid) and PLA+ (PLA Plus) filaments. PLA+ is an improved version of PLA and usually offers better performance properties with the addition of various additives. The properties of the PLA+ filament used in this research are given in Table 1. This filament is a product of the eSUN brand. PLA+ is preferred for more durable mechanical parts or applications requiring flexibility and durability. The filament and nozzle diameters are 1.75 mm and 0.4 mm, respectively.

Table 1. Properties of PLA+ material

Density (g/cm ³)	1.23
Tensile strength (MPa)	60
Flexural strength (MPa)	74
Flexural modulus (MPa)	1973
Elongation at break (%)	20
Extruder temperature (°C)	210-230
Bed temperature (°C)	45-60
Printing speed (mm/s)	40-100

2.2. Differential Evolution Algorithm

The specimens' technical drawings were created using Catia software according to ASTM D638 standards. The 3D model was converted to STL format for physical printing on the 3D printer. The STL file was then transferred to the Ultimaker software. The Ultimaker Cura 5.9.0 software was used as the slicer before sending to the 3D printer (Figure 1). Many parameters can be changed with this software. The most important of these parameters are raster angle, printing speed, infill density, and temperature. In this study, the table temperature was set to 60 °C, and the nozzle temperature was set to 210 °C. Also, 0°, 90°, and $\pm 45^\circ$ angles were selected as raster angles. A schematic illustration of raster angles is provided in Figure 2. Infill density was set as 20, 50, and 100%. Other parameters are given in Table 2.

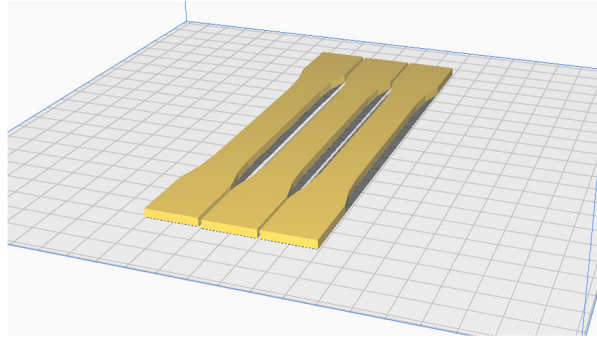


Figure 1. Ultimaker cura software interface

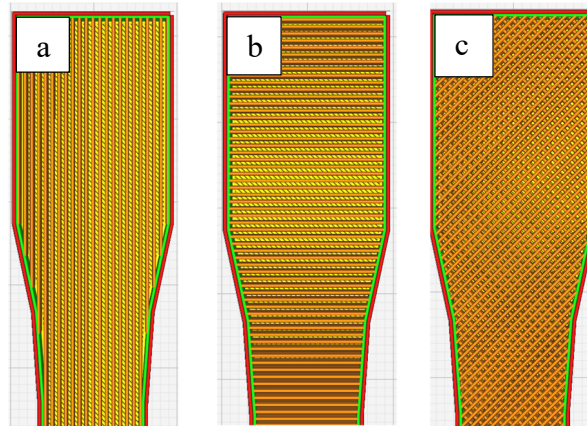


Figure 2. Raster angles of specimens (a) 0°, (b) 90°, (c) $\pm 45^\circ$

Table 2. 3D printing process parameter

Parameters	Value	Unit
Raster angle	0°, 90°, and $\pm 45^\circ$	°
Infill density	20, 50, and 100	%
Print speed	80	mm/s
Travel speed	200	mm/s
Nozzle temperature	210	°C
Bed temperature	60	°C
Fill pattern	Lines	-
Software	Ultimaker Cura 5.9.0	-

2.3. Tensile Strength Test

Tensile tests of PLA+ samples were performed using a Shimadzu tensile testing machine with a capacity of 250 kN; however, all tests were conducted using a 5 kN load cell to ensure higher measurement sensitivity for low-force specimens. Tensile samples were prepared in the shape of a dog bone according to ASTM D638. The sample dimensions were set according to Type 1, with a thickness of 3 mm, a width

of 13 mm, and a length of 165 mm. The shape and other dimensions of the sample are shown in Figure 3. Three samples were produced from each sample and tested at a speed of 5 mm/min to ensure repeatability.

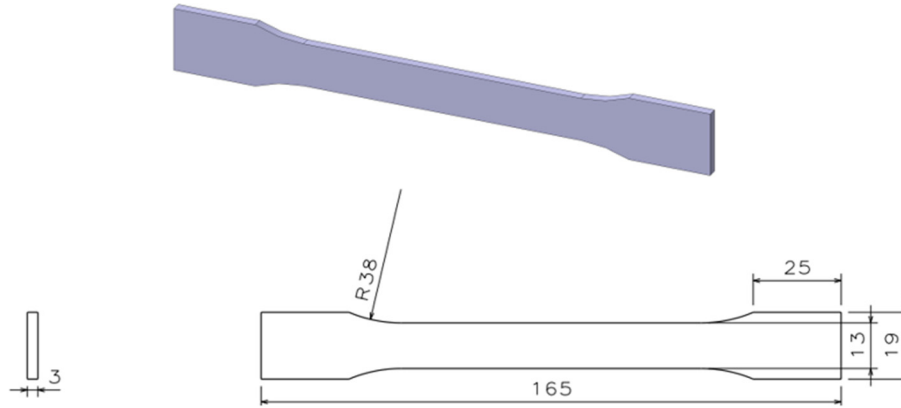


Figure 3. Specimen dimensions according to ASTM D638 standard

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Tensile Test

This study investigated the influence of process parameters in Fused Deposition Modeling (FDM) on the mechanical performance of 3D-printed PLA+ specimens. Specifically, the effects of raster angle and infill density on tensile strength were examined.

The raster angle plays a crucial role in determining the overall strength and stiffness of the printed part. Three distinct raster angles (0° , 90° , and $\pm 45^\circ$) were used to understand how the alignment of layers influences the mechanical properties.

The infill density, or internal structure, of a 3D-printed part significantly impacts its weight and mechanical performance. Three different infill densities (20%, 50%, and 100%) were selected to assess how the amount of internal material affects the tensile properties.

All the tensile test specimens were tested according to the ASTM D638 standard testing method for plastic materials. A universal tensile testing machine with a capacity of 5 kN (Shimadzu) was used to determine the tensile strength. The data obtained from the test data were converted into a stress-strain graph, and the results are summarized in Table 3. Also, Stress-strain curves of PLA+ specimens with raster angles and infill density are given in Figure 5-10. In addition, the expression “Smp.” in the graphs represents the sample number.

To evaluate the mechanical behavior, tensile tests were conducted on the specimens and measured key parameters, including:

Ultimate Tensile Stress (MPa): The maximum stress the material can withstand before failure.

The ultimate stress of 0° raster angle with 100% infill density increased and reached 41.52 MPa. Specimens with a 90° raster angle exhibited lower ultimate stress compared with a 0° raster angle; however, at 100% infill density, the ultimate stress reached 40.20 MPa, which is slightly lower than that of the 0° -100% specimens. The $\pm 45^\circ$ raster angle exhibited the highest ultimate stress, reaching 44.52 MPa at 100% infill density.

At 20% infill density, the ultimate stress was significantly reduced across all raster angles. The 0° raster angle achieves a maximum of 20.56 MPa, while the 90° reached only 14.23 MPa. At 50% infill density, a notable increase in ultimate stress was observed. The 0° raster angle reached 34.53 MPa, while the $\pm 45^\circ$ achieved 21.56 MPa. At 100% infill density, the highest ultimate stress values were achieved with the $\pm 45^\circ$.

The ultimate stress bar prepared according to different raster angles and infill densities is given in Figure 4.

Accordingly, it was determined that the main reason for the strength differences varied depending on the anisotropic structure of the parts, the infill density, and the raster angle [24].

In samples produced at a 0° raster angle, because the filaments were aligned parallel to the tensile direction, load transfer occurred more effectively along the filament, resulting in higher tensile strength. In contrast, in samples produced at a 90° raster angle, premature fracture was observed due to weak interlayer bonding and stress concentrations at the filament interfaces, resulting in decreased strength. At a $\pm 45^\circ$ raster angle, because the load direction was applied diagonally to the filaments, a mixed behavior resulting from both filament strength and interlayer adhesion was observed. This resulted in a moderate tensile strength. Increasing the infill density from 20% to 100% improved load-carrying capacity by reducing the void ratio within the sample and increasing the contact area between filaments [25].

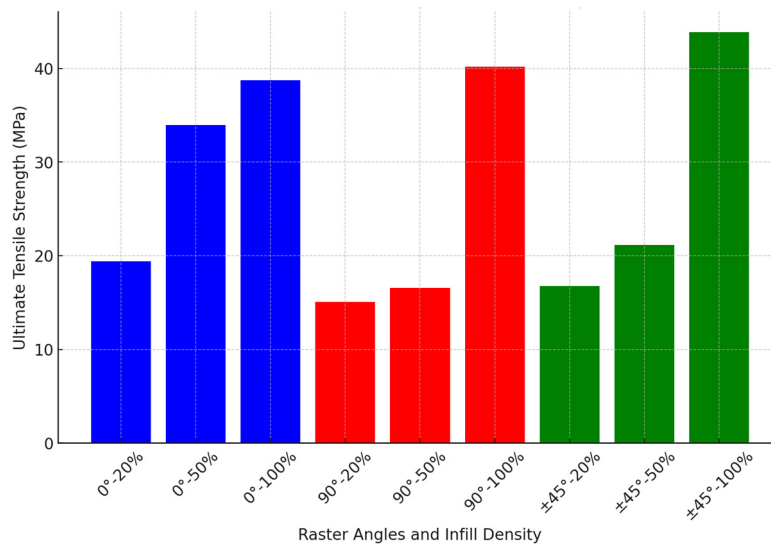


Figure 4. UTS of PLA+ samples at various raster angles and infill densities

Modulus of Elasticity (GPa): A measure of the material's stiffness, indicating its resistance to deformation under stress. The modulus of elasticity is the slope of the linear portion of the stress-strain curve corresponding to the elastic deformation region of the material. To reduce the influence of data noise and nonlinear behavior, data from the 20%–80% portion of the elastic region were selected. The slope of this region was calculated using the linear regression (linear fit) function in Origin software.

The modulus of elasticity varied significantly across different raster angles and infill densities. The 0° raster angle demonstrated a consistent increase in stiffness, rising from 0.76 GPa at 20% infill to 1.49 GPa at 100% infill. The raster angle significantly affected the modulus of elasticity. Samples with a 0° raster angle had the highest average stiffness values. This is consistent with literature showing anisotropic behavior of FDM printed parts [26]. In contrast, the 90° raster angle generally exhibited lower stiffness compared to the 0° orientation, with values ranging from 0.65 GPa at 20% infill to 1.55 GPa at 100% infill. Notably, at 100% infill density, the $\pm 45^\circ$ raster angle showed a slightly lower modulus of elasticity, measuring 1.42 GPa. The modulus of elasticity behavior of the 90° and $\pm 45^\circ$ raster angle samples is consistent with the literature [26].

The modulus of elasticity had low values at 20% filler density and ranged between 0.65 and 0.78 GPa. As the infill density increased to 50%, the modulus of elasticity improved significantly, with the 0° orientation reaching 1.13 GPa and the $\pm 45^\circ$ raster angles reaching 0.87 GPa. At 100% infill density, the 90° raster angle exhibited the highest modulus of elasticity with 1.55 GPa, followed closely by the 0° raster angle with 1.49 GPa. which is consistent with previous studies. Higher infill density reduces internal voids and improves interlayer adhesion, leading to greater stiffness [27].

Modulus of Toughness (kJ/m^3): The amount of energy the material can absorb before rupture, reflecting its ability to withstand impact. The toughness of modulus was obtained as the area under the stress-strain curve of the sample up to the fracture point. All stress-strain data were analyzed in Origin. The area under the curve was calculated precisely. This method provided accurate and reproducible determinations of the energy absorption capacity of the samples.

Modulus of toughness varied considerably with both raster angle and infill density. The 0° raster angle showed a peak toughness of 280 kJ/m^3 at 20% infill, but this value increased to 430 kJ/m^3 at 100% infill. In contrast, the 90° raster angle exhibited a trend of increasing toughness with higher infill density, reaching a maximum of 630 kJ/m^3 at 100% infill. Notably, the $\pm 45^\circ$ raster angle consistently demonstrated the highest toughness values across all infill densities, peaking at 1420 kJ/m^3 with 100% infill. This value is significantly higher than 0° and 90° raster angles. The $\pm 45^\circ$ raster angle is most effective in enhancing the material's ability to absorb energy before rupture. In particular, it is consistent with the literature that when the raster angle is loaded diagonally, it exhibits much higher toughness compared to loading parallel/perpendicular to the raster angle [28,29].

Maximum Extension (mm): The extent to which the material can stretch before rupture, indicating its ductility.

Maximum extension, a measure of ductility, also varied with raster angle and infill density. The 0° raster angle showed moderate elongation between range 2.50 mm to 3.72 mm. The 90° raster angle exhibited slightly higher elongation, reaching a maximum of 3.48 mm at 50% infill. However, the $\pm 45^\circ$ raster angle consistently demonstrated the highest maximum extension values, reaching 5.22 mm at 100% infill density. This indicates that the $\pm 45^\circ$ raster angle imparts greater ductility to the PLA+ specimens, allowing them to undergo more deformation before rupture. These features are consistent with the literature [30].

Table 3. The tensile test results for the PLA+ due to the raster angle and infill density

Raster angles and infill density	Samples	Ultimate stress (MPa)	Modulus elasticity (GPa)	Modulus toughness (KJ/m^3)	Max. extension (mm)
0° -%20	1	19.41	0.77	264	2.82
	2	20.56	0.78	280	280
	3	18.76	0.76	263	2.79
0° -%50	1	33.94	1.12	647	3.66
	2	33.41	1.10	655	3.60
	3	34.53	1.13	640	3.72
0° -%100	1	38.74	1.47	425	2.54
	2	41.52	1.49	430	2.50
	3	40.12	1.48	428	2.62
90° -%20	1	15.08	0.68	279	3.25
	2	14.23	0.65	270	3.30
	3	15.32	0.67	288	3.12
90° -%50	1	16.56	0.74	328	3.41
	2	17.02	0.75	319	3.36
	3	17.25	0.75	333	3.48
90° -%100	1	40.20	1.54	622	3.08
	2	39.20	1.53	630	3.02
	3	39.45	1.55	619	3.22
$\pm 45^\circ$ -%20	1	16.77	0.66	575	5.19
	2	16.28	0.66	580	5.15
	3	15.88	0.65	570	5.20
$\pm 45^\circ$ -%50	1	21.14	0.84	564	4.30
	2	20.98	0.85	560	4.74
	3	21.56	0.87	572	4.15
$\pm 45^\circ$ -%100	1	43.85	1.40	1380	5.16
	2	44.52	1.42	1420	5.22
	3	44.28	1.40	1360	5.10

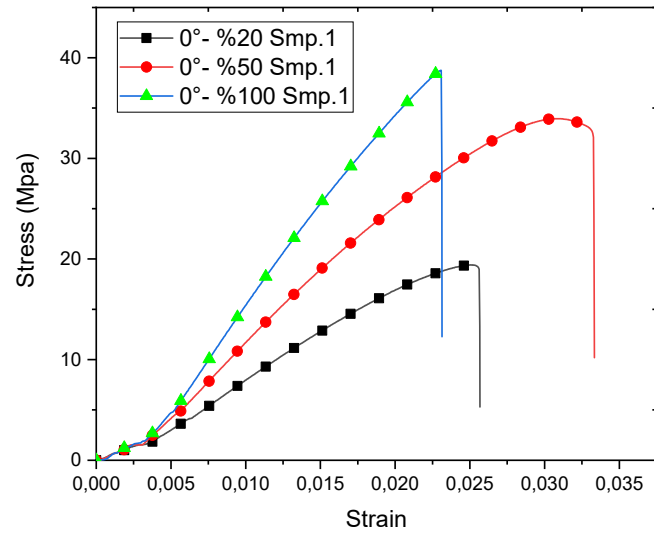


Figure 5. Stress-strain curves of 0° raster angle

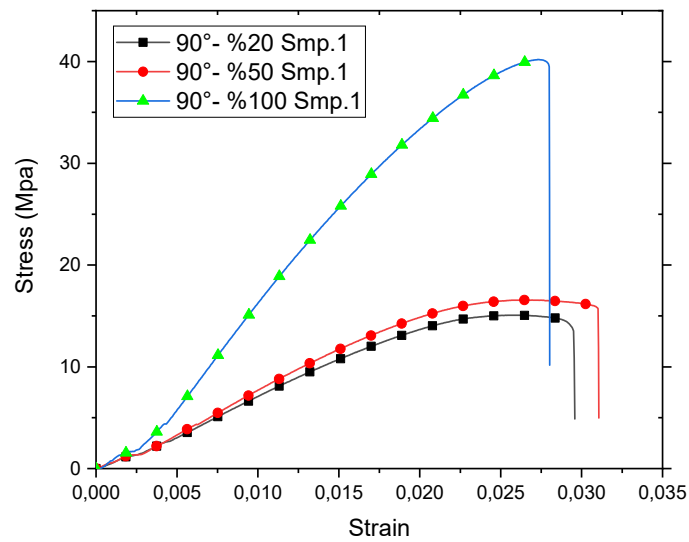


Figure 6. Stress-strain curves of 90° raster angle

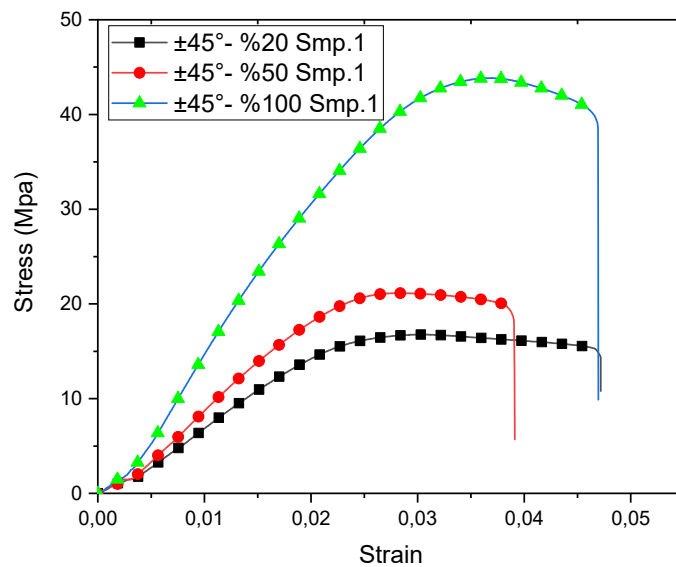


Figure 7. Stress-strain curves of $\pm 45^\circ$ raster angle

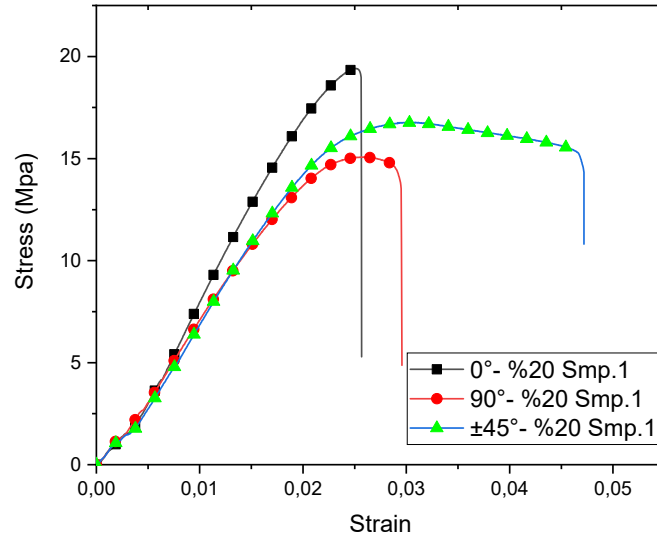


Figure 8. Stress-strain curves of 20% infill density

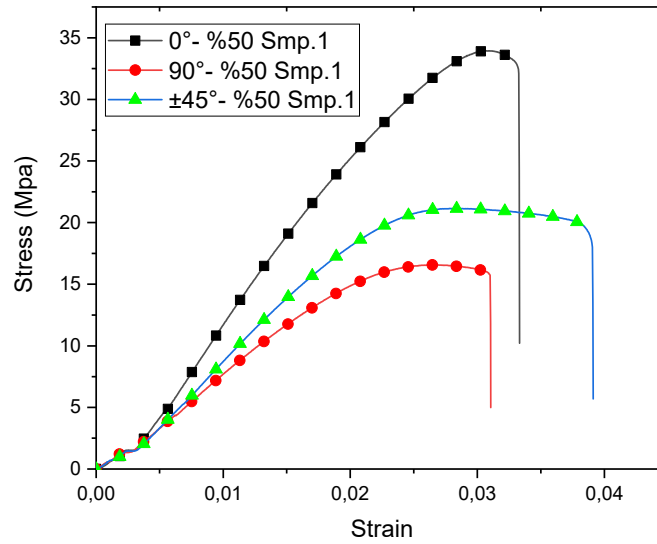


Figure 9. Stress-strain curves of 50% infill density

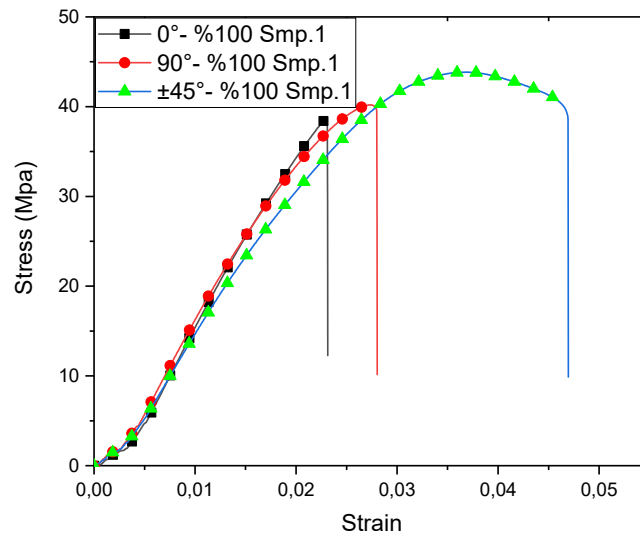


Figure 10. Stress-strain curves of 100% infill density

3.2. Fracture Specimens

After tensile testing, different types of fractures were observed in PLA+ samples. Some fractured more smoothly and vertically, while others fractured more fibrously and in pieces. Different raster angles and infill densities that caused these types of fractures are given in Figure 11.

The 0° raster angle has flat fracture surfaces due to being parallel to the loading direction. The fracture surface became smoother with the increase of the infill density. However, the fracture direction of the 90° raster angle specimen has a perpendicular surface to the loading direction. So, its fractured zone has a roughness surface. This rough surface was observed more in the samples with 20% and 50% infill density. The roughest surfaces were observed in the fracture region of the $\pm 45^\circ$ raster angle samples. This is because these samples are at an angle of 45 degrees to the loading direction. The fracture surface direction of the samples has almost 45-degree angles.

Such fracture cases are directly related to the orientation of the layers and the melting and cooling of the PLA filament between the layers. As PLA is an inherently brittle material, necking was not observed in any of the samples. Crack initiation and propagation occurred in the middle in some specimens and at the ends in others. These differences in crack initiation points are due to defects related to the FDM printing process, such as vibrations, printing defects, uneven fill density, overheating, insufficient material flow or air voids. Specimens with such printing defects are more prone to crack initiation and propagation in high-stress regions [31].

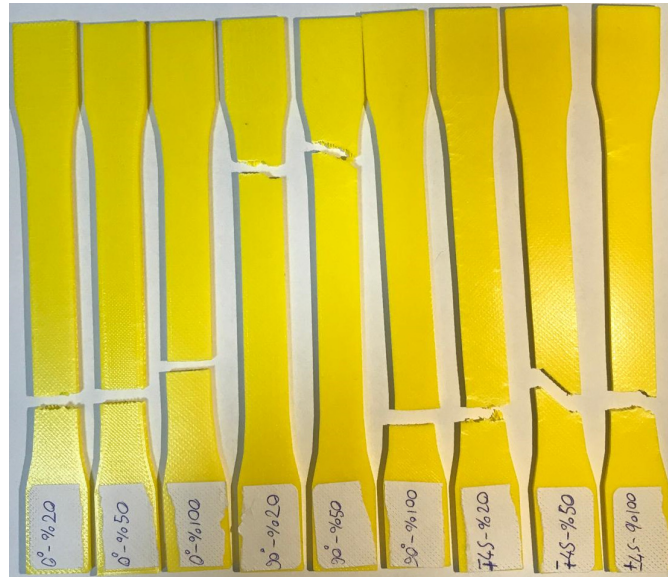


Figure 11. Specimens fractured under tensile load

4. CONCLUSIONS

This study investigated the mechanical properties of PLA+ samples produced by Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printing. For this purpose, the effects of raster angle and infill density parameters on tensile strength were researched. Raster angles were selected as 0° , 90° , $\pm 45^\circ$, and infill density were selected as 20%, 50%, 100%. Accordingly, the following findings were obtained.

- Increasing the infill density increased the ultimate stress value of PLA+ samples. The highest ultimate stress value of 44.52 MPa was obtained at the $\pm 45^\circ$ -100% combination. However, the UTS values of the 0° raster angle perpendicular to the tensile direction at 20% and 50% are higher than those of the 90° and $\pm 45^\circ$ raster angles at the same infill density.
- The increase in the infill density increased the modulus of elasticity value. The highest modulus of elasticity value of 1.55 GPa was obtained at the 90° -100% combination.
- The infill density had no significant effect on elongation. The highest elongation value of 5.22 mm was obtained in the $\pm 45^\circ$ -100% combination.

5. ACKNOWLEDGMENTS

This study was supported by the Scientific Research Projects Coordination Unit (BAP) of Şırnak University, Şırnak, Turkey [grant number 2022.FNAP.06.05.01].

6. REFERENCES

1. Singh, A.K. & Chauhan, S. (2016). Technique to Enhance FDM 3D Metal Printing. *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science*, 6(4), 128-134.
2. Woosley, S. & Aravamudhan, S. (2022). *Functionally Modified Composites for FDM 3D Printing*.
3. Atef, A., Gomaa, A., Abdelaziz, A., Elbehiry, E. & Ali, N. (2024). FDM 3D Printer based on Raspberry Pi. *Fayoum University Journal of Engineering*, 7, 61-66.
4. Boztepe, M.H. (2025) Effect of Infill Density and Raster Angle on the Flexural Properties of FDM-Printed PLA+ Specimens. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(27), 451-462.
5. Alsoufi, M.S. & Elsayed, A.E. (2018). Quantitative Analysis of 0% Infill Density Surface Profile of Printed Part Fabricated by Personal FDM 3D Printer. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(1), 44.
6. Yardımcı, A.I. (2022). Polyacrylonitrile (Pan) Electrospun Nanofibers Coated 3d Printed Pla Materials With Different Infill Patterns and Their Tensile Properties. *International Journal of 3d Printing Technologies and Digital Industry*, 6(2), 307-313.
7. Tümer, E.H. and Erbil H.Y. (2021). Extrusion-Based 3D Printing Applications of PLA Composites: A Review. *Coatings*, 11(4), 390.
8. Fadillah, F., Suryanto, H. & Suprayitno, S. (2024). Characteristics of 3D Printing Products Using PLA/Nanographite Nanocomposite Filaments. *Bio Web of Conferences*, 117, 01016.
9. Albadrani, M.A. (2023). Effects of Raster Angle on the Elasticity of 3D-Printed Polylactic Acid and Polyethylene Terephthalate Glycol. *Designs*, 7(5), 112.
10. Horasan, M. & Sarac, I. (2024). The fatigue responses of 3D-printed polylactic acid (PLA) parts with varying raster angles and printing speeds. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 47(10), 3693-3706.
11. Afrose, M.F., Masood, S.H., Iovenitti, P., Nikzad, M. & Sbarski I. (2016). Effects of part build orientations on fatigue behaviour of FDM-processed PLA material. *Progress in Additive Manufacturing*, 1(1), 21-28.
12. Letcher, T. & Waytashek, M. (2014). Material Property Testing of 3D-Printed Specimen in PLA on an Entry-Level 3D Printer, 2.
13. Mazen, A., McClanahan, B. & Weaver, J. (2022). Factors Affecting Ultimate Tensile Strength and Impact Toughness of 3D Printed Parts Using Fractional Factorial Design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(3-4), 2639-2651.
14. Sedlak, J., Joska, Z., Hrbáčková, L., Jurickova, E., Hrušecká, D. & Horak, O. (2023). Determination of Mechanical Properties of Plastic Components Made by 3D Printing. *Manufacturing Technology*, 22(6), 733-746.
15. Rajpurohit, S.R. & Dave, H.K. (2018). Effect of Process Parameters on Tensile Strength of FDM Printed PLA Part. *Rapid Prototyping Journal*, 24(8), 1317-1324.
16. Tanikella, N.G., Wittbrodt, B. & Pearce, J.M. (2017). Tensile Strength of Commercial Polymer Materials for Fused Filament Fabrication 3D Printing. *Additive Manufacturing*, 15, 40-47.
17. Çakan, B.G. (2021). Effects of raster angle on tensile and surface roughness properties of various FDM filaments. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35(8), 3347-3353.
18. Rajpurohit, S.R. & Dave, H.K. (2019). Analysis of tensile strength of a fused filament fabricated PLA part using an open-source 3D printer. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(5), 1525-1536.
19. Bolat, Ç. & Ergene, B. (2022). An Investigation on Dimensional Accuracy of 3D Printed PLA, PET-G and ABS Samples With Different Layer Heights. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(2), 449-458.
20. Kamer, M.S., Temiz, Ş., Yaykaşlı, H., Kaya, A. & Akay, O.E. (2022). Effect of Printing Speed on FDM 3d-Printed Pla Samples Produced Using Different Two Printers. *International Journal of 3d Printing Technologies and Digital Industry*, 6(3), 438-448.
21. Günay, M., Gündüz, S., Yılmaz, H., Yaşar, N. & Kaçar, R. (2020). PLA Esaslı Numunelerde Çekme Dayanımı İçin 3D Baskı İşlem Parametrelerinin Optimizasyonu. *Politeknik Dergisi*, 23(1), 73-79.

22. Kamer, M.S. and Uzay Ç. (2024). Investigation of The Effect of CNC Milling Cutting Process on The Tensile Test of PLA Samples Produced Using Two Different 3D Printers with The FDM Method. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(3), 599-608.
23. Ramírez-Prieto, J., Martínez-Yáñez, J. & González-Hernández, A. (2025). Effect of raster angle on the tensile and flexural strength of 3D printed PLA+ parts. *AIMS Materials Science*, 12, 363-379.
24. Biroş, M.T., Ledenyák, D. & Andó, M. (2022). Effect of FDM infill patterns on mechanical properties. *Polymer Testing*, 113, 107654.
25. Perez, D.B., Celik, E. & Karkkainen, R.L. (2021). Investigation of Interlayer Interface Strength and Print Morphology Effects in Fused Deposition Modeling 3D-Printed PLA. *3D Print Addit Manuf*, 8(1), 23-32.
26. Zhang, X., Chen, L., Mulholland, T., & Osswald, T. (2019). Effects of raster angle on the mechanical properties of PLA and Al/PLA composite part produced by fused deposition modeling. *Polymers For Advanced Technologies*, 30(8), 2122-2135.
27. Dawood, L.L. & Alameen, E.S. (2024). Influence of infill patterns and densities on the fatigue performance and fracture behavior of 3D-printed carbon fiber-reinforced PLA composites. *Aims Materials Science*, 11(5), 833-857.
28. Kiendl, J. & Gao, C. (2020). Controlling toughness and strength of FDM 3D-printed PLA components through the raster layout. *Composites Part B: Engineering*, 180, 107562.
29. Ayatollahi, M.R., Nabavi-Kivi, A., Bahrami, B., Yahya, M. & Khosravani, M. (2020). The influence of in-plane raster angle on tensile and fracture strengths of 3D-printed PLA specimens. *Engineering Fracture Mechanics*, 237, 107225.
30. Boztepe, M.H. (2025). A Study on the Mechanical Properties of PLA+ Samples Manufactured Using 3d Printing with Different Raster Angles. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 923-932.
31. Algarni, M. (2021). The Influence of Raster Angle and Moisture Content on the Mechanical Properties of PLA Parts Produced by Fused Deposition Modeling. *Polymers*, 13(2), 237.

Dip Tarama Çamurunun (Van Gölü) Jeoteknik Özellikleri ve Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılabilirliği

Elif ERDEVE ÖZVAN^{1,a}, Ayşe ÖZGÜVEN^{2,b}, Mehmet TÜRKMENOĞLU^{3,c},
Dilara ÖZTÜRK^{2,d}, Ömer YEŞİLOVA^{4,e}, Ali ÖZVAN^{5,f}

¹Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Van, Türkiye

²Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Van, Türkiye

³Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Van, Türkiye

⁴Van 11.Karayolları Bölge Müdürlüğü, Van, Türkiye

⁵Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Van, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-3355-3432; ^bORCID: 0000-0003-1071-2813; ^cORCID: 0000-0001-6088-4416;

^dORCID: 0000-0003-2689-560X; ^eORCID: 0009-0001-6597-3431; ^fORCID: 0000-0001-5459-3989

Makale Bilgileri

Geliş : 15.09.2025

Kabul : 05.12.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1784243

Sorumlu Yazar

Elif ERDEVE ÖZVAN

eliferdevezvan@yyu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Dip tarama çamuru

Dolgu malzemesi

Geoteknik özellikler

Van Gölü

Atıf şekli: ERDEVE ÖZVAN, E., ÖZGÜVEN, A., TÜRKMENOĞLU, M., ÖZTÜRK, D. YEŞİLOVA, Ö., ÖZVAN, A., (2025). Dip Tarama Çamurunun (Van Gölü) Jeoteknik Özellikleri ve Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılabilirliği. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(4), 949-958.

ÖZ

Van Gölü doğu kıyısında geçmiş yıllarda göle deşarj edilen arıtma çamuru, büyük bir göl tabanı kirliliğine neden olmuştur. 2021 yılında tamamlanan Van İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi çıkış sularının deşarj edildiği göl tabanında dip çamuru temizliği başlatılmıştır. Bu çalışmada, göl tabanından çıkartılan dip tarama çamurlarının bertarafı konusunda araştırma başlatılmış ve ekskavatör ile alınan dip tarama malzemesinin ilksel hali (DTM-1) ile geotüplerde susuzlaştırılarak elde edilen dip tarama malzemesi üzerinde (DTM-2) bazı fiziksel ve mekanik deneyler yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada dip çamurlarının inorganik özellik gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca dip çamurlarının yol dolgu malzemesi olarak uygunluğunu araştırmak amacıyla Standart Proktor deneyi, sıkıştırılmış her iki dip tarama malzemesi üzerinde yaş CBR (California Taşıma Oranı) ve direk kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Elde edilen verilere göre, dip çamurlarının güncel Karayolları Teknik Şartnamesinde (KTŞ) dolgular için istenilen limit değerlerin bir kısmını sağladığı ve dolgu malzemesi olarak ek katkılar ile karıştırılıp kullanılabilceği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca bu sonuçlar, jeoteknik ve çevre mühendisliği uygulamalarında sürdürülebilir malzeme yönetimine katkı sağlayacaktır.

Geotechnical Properties and Usability of Dredged Sediment from the Eastern Shore of Lake Van as a Fill Material

Article Info

Received : 15.09.2025

Accepted : 05.12.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1784243

Corresponding Author

Elif ERDEVE ÖZVAN

eliferdevezvan@yyu.edu.tr

Keywords

Dredging mud,

Embankment fill

Geotechnical properties

Lake Van

How to cite: ERDEVE ÖZVAN, E., ÖZGÜVEN, A., TÜRKMENOĞLU, M., ÖZTÜRK, D. YEŞİLOVA, Ö., ÖZVAN, A., (2025). Geotechnical Properties and Usability of Dredged Sediment from the Eastern Shore of Lake Van as a Fill Material. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(4), 949-958.

ABSTRACT

The sewage sludge discharged into the eastern shore of Lake Van in the past years has caused major lake bottom pollution. Bottom sludge cleaning has been initiated at the bottom of the lake where the effluents of the Van Advanced Biological Wastewater Treatment Plant, completed in 2021, are discharged. In this study, research was initiated on the disposal of dredging mud extracted from the lake bottom, and some physical and mechanical experiments were carried out on the initial state of the dredging material taken by excavator (DTM-1) and the dredging material obtained by dewatering in geotubes (DTM-2). In the experimental study, it was determined that the bottom muds showed inorganic properties. In addition, Standard Proctor test, wet CBR (California Bearing Ratio), and pole shear box tests were performed on both compacted dredging materials to investigate the suitability of bottom muds as road fill material. According to the data obtained, it was concluded that the bottom muds meet some of the limit values required for fillings in the current Highway Technical Specifications (HTS) and can be mixed with additional additives and used as filling material. In addition, these results contribute to sustainable material management in geotechnical and environmental engineering applications.

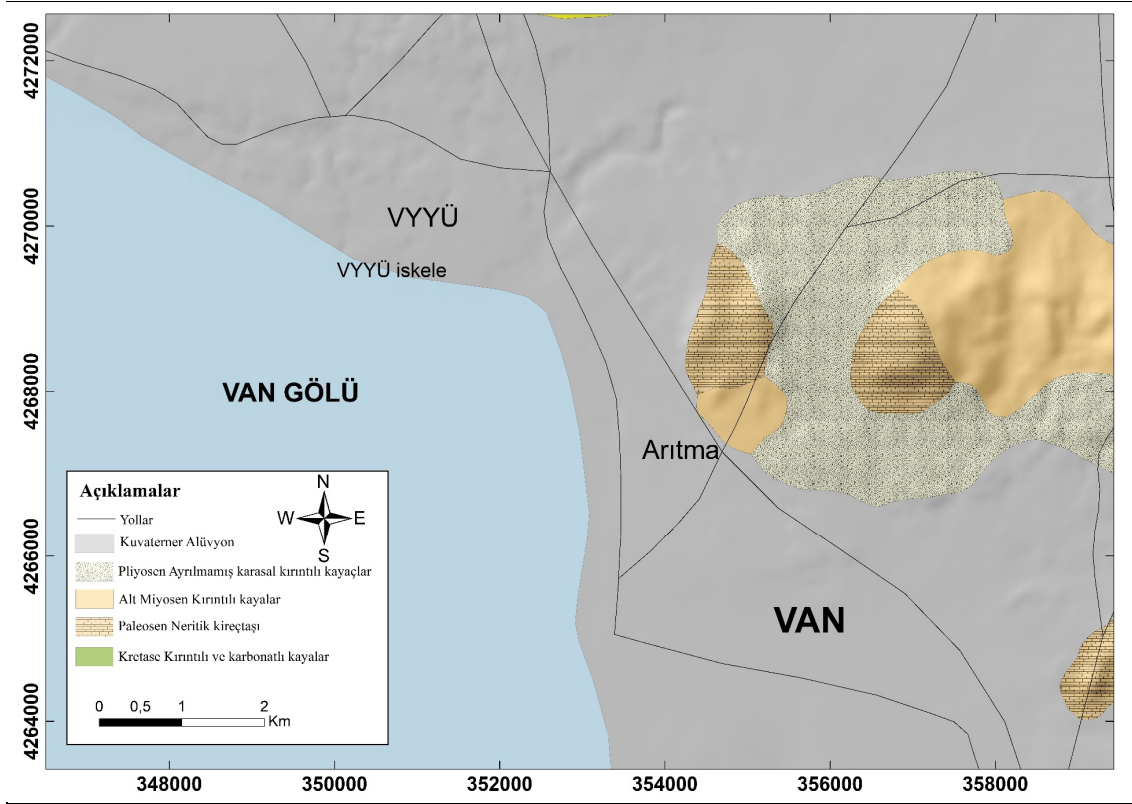
1. GİRİŞ

Mineral ve toprakların ayrışma ile erozyona uğraması sonucu oluşan sedimanlar; rüzgâr, su ve buzul gibi akışkanların etkisiyle denizlere, nehirlere ve göllere taşınabilmektedir. Sanayileşmenin de etkisiyle atıkların kapalı havza dediğimiz yüzeysel su ortamlarına deşarj edilmesi sonucu, sedimanlarla karışan atıkların oluşturduğu dip çamurlarının önemli bir kısmı inorganik ve organik kirleticiler içermekte olup, Avrupa Birliği Direktifi No. 2002-540 (2002) uyarınca 17 05 05* (kirlenmiş sedimanlar) ve 17 05 06 (diğer sedimanlar) kodları altında atık olarak sınıflandırılmaktadır. Bu tür atıkların yönetimi, çevresel etkilerinin olumsuzluğu nedeniyle, geleneksel çözümler olan denize boşaltma ve karada depolama yöntemlerinin giderek daha az tercih edilmesine yol açmıştır. Bu bağlamda, denizel yaşamın minimal düzeyde tahribata uğramasına yönelik, zararsız dip tarama çamurlarının faydalı geri dönüşüm malzemesi olarak kullanım alanlarını araştırma ihtiyacı önemli hale gelmiştir. Taranan çamurların tehlikeli atık olarak sınıflandırılmadığı sürece, maliyetinin yüksek olması, geniş alan ve uzun vadeli izleme gereksinimleri nedeniyle genellikle arazide bertarafı tercih edilmez [1,2]. Bu yönüyle tarama çamurlarının iyileştirilmesi ve faydalı alanlarda değerlendirilmesi için çalışmalar yapılmaktadır. Geçirimsiz tabaka ve ara örtü olarak deponi sahalarında [3,4], tuğla üretimi [5,6] ve çimento üretimi [7,8] gibi sektörel çalışmalarda dip çamurlarının kullanılabilirliği araştırılmıştır. Özellikle inşaat alanında dolgu malzemesi temininde kısıtlı olanaklar göz önünde bulundurularak, taranmış dip sedimanların stabilizasyon/solidifikasyon teknikleri ile alternatif malzeme kaynağı olarak değerlendirilmesi giderek önem kazanmıştır. Dip tarama çamurları dolgu ve sedde yapımında [9,10] kullanımı araştırılırken, çimento ile stabilize edilmiş tarama [24] Japonya’da deniz üzerine inşa edilen havalimanlarının pist dolgularında kullanılmıştır. Dünya sıralamasında önemli bir yere sahip olan Türk inşaat sektöründe bu tür çalışmaların yapılması çevrenin korunması ve maliyet açısından ciddi faydalar sağlayacaktır [11]. Sedimentlerin tek başına kullanılması [12,13], sedimanların potansiyel yeniden kullanım alanları; temel ve alt temel tabakaları [14-16], beton üretimi [17], uçucu kül ve cam tozu [18,19,20] gibi alanlarda da dip çamurunun geri kazanımına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca Karayolları Teknik Şartnamesine (2013) göre dip tarama çamurlarının yol dolgu malzemesi olarak uygunlukları [21] gibi araştırmalar da mevcuttur.

Geoteknik açıdan dip tarama çamurlarının katı atık depolama tesislerinde taban geçirimsizlik tabakası ve ara örtü olarak kullanımı ile ilgili incelemeler de yer almaktadır [22]. Ayrıca ince agrega olarak tarama çamurlarının hazır beton yapımında [23] ve mühendislik yapılarında kıyı koruma olarak kullanımı [24] gibi çalışmalar da mevcuttur. Çevresel etkiler açısından da bazı çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan birisinde Atık Yönetimi Yönetmeliği (AYY) (02.04.2015-R.G.29314)’nin belirttiği sınırlara göre tarama çamurları, “tehlikesiz atık (atık kodu 17 05 06)” olarak sınıflandırılmıştır [25]. Diğer bir çalışmada ise tarama çamurlarının iyileştirilmiş yüzey toprağı olarak çevre düzenlemelerinde kullanımları araştırılmıştır [26]. Geoteknik açıdan yapılan bir diğer çalışmada ise, Haliç dip tarama çamuru geotüp kullanarak susuzlaştırılmış ve yapılan deney sonuçlarına göre Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ)’nin belirttiği sınır değerlere dayanarak dip çamurlarının dolgu malzemesi olarak kullanılabileceği vurgulanmıştır [27].

Hydrolojik havzalar boyunca yüzey akışı ve dereler aracılığıyla yüzeysel su ortamlarına su girişi olmaktadır. Kıyı bölgelerde bulunan sanayi siteleri ve atıksu arıtma tesisleri gibi yapılardan gelen atıksular mevcut su ortamlarına deşarj edilmektedir. Kapalı havza özelliğı taşıyan göller, deşarj edilen kirleticilerin göl tabanında ve suyunda birikmesine karşı duyarlı ekosistemlerdir. Van Gölü hazvasının jeolojik geçmişi üzerinde pek çok inceleme yapılmıştır. Bitlis ili sınırları içerisinde yer alan Nemrut volkanik dağıının aktivitesi sonucu meydana gelen volkanik setin gerisinde Van Gölü oluşmuştur. Günümüzde 1650 m kotlarında olan Van Gölü oluşumundan bugüne farklı seviyelere yükselerek göl kıyısından 1900 m kotlarına kadar çıkarak, çakıldan kile değişen tane boyuna sahip göl sedimanının istiflenmesine neden olmuştur. Mühendislik jeolojisi açısından Van ili yerleşim alanını inceleyen bir araştırma, bölgenin göl ve akarsu çökelleri üzerine kurulu olduğunu belirtmiştir [28] (Şekil 1). Genel olarak, kil, silt ve kum ardalanmalı olarak gözlenen genç göl çökellerinin gevşek, tutturulmamış ve iri taneli seviyelerinin geçirimli özelliklere sahip olduğunu vurgulamakta [28], Van Gölü kıyısına yakın alanlarda da yeraltı suyu seviyesinin daha sığ olduğunu ve zeminin dayanım özelliklerinin düştüğünü öne sürmektedir [28]. Göl gibi kapalı havzalara giren su kaynaklarının ve atıksuların tabandaki gevşek sedimanların yüksek geçirimliliğı

nedeniyle düzenli olarak izlenmesi önemlidir. Yüksek geçirimsliliğe sahip gevşek ve tutturulmamış sedimanlar deşarj malzemelerini hem düşeyde hem de yanarda boşluklarına alarak hapsedebilmektedirler.



Şekil 1. İnceleme alanının ve yakın civarının jeolojisi

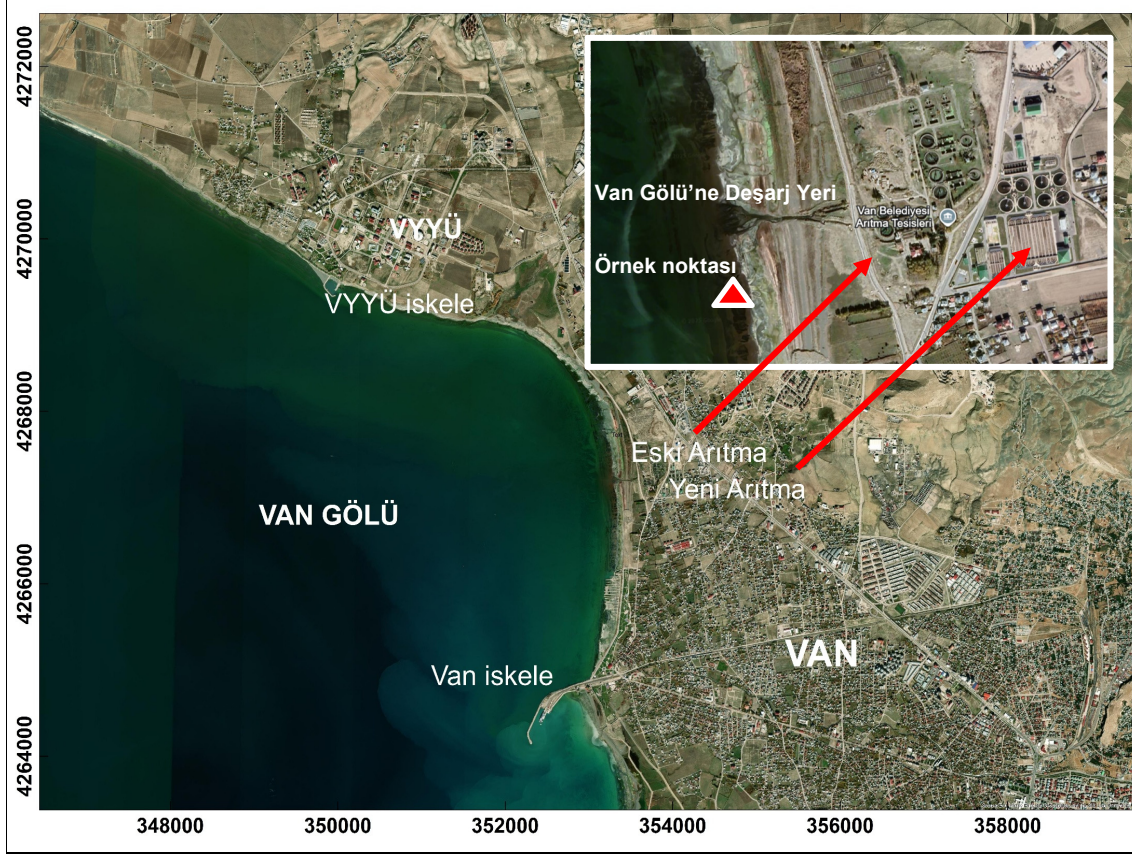
Van Gölü doğu kıyısında da uzun yıllar göle deşarj edilen atık suların göl tabanındaki tahribatını bertaraf etmek için çalışmalar başlatılmış ve bu dip çamurları alınarak göl dışındaki depolama alanlarına taşınmıştır. Taşınan dip çamurları ikincil bir çevre kirliliği oluşturduğu için bu malzemenin geri dönüşümü üzerinde farklı yaklaşımlar üzerinde durulmuştur. Çıkarılan dip çamurlarının karakterizasyonu bilinmediğinden geri dönüşüm adı altında şimdiye kadar kullanılamamıştır. Bu nedenle, bu çalışma ile Van Gölü doğu kıyısında yapılan tarama temizliği işleminde çıkarılan dip çamurunun karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

2. YÖNTEM

Çalışma kapsamında, arazide dip çamurlarının tanımlanması, örnek alımı, susuzlaştırma işlemleri ve çıkarılan dip çamurlarının çevresel etkilerinin azaltılmasına yönelik olarak faydalı kullanımının belirlenmesi amacıyla çalışmalar yapılmıştır.

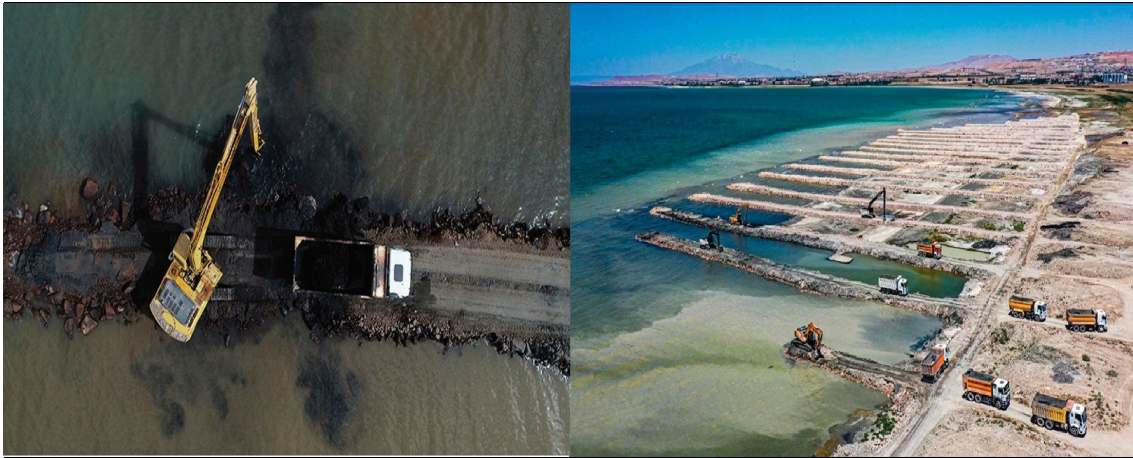
2.1. Materyal

Van Gölü'nün şehir merkezine kıyısı bulunan yaklaşık 20 km uzunluğundaki yerleşim kuşağında, endüstriyel kaynaklı atıksuların deşarjı sonucunda göl tabanında kalın dip çamuru tabakaları oluşmuştur. Kapalı havza karakteri nedeniyle bu durum çeşitli çevresel riskleri beraberinde getirmektedir. Geçmiş yıllarda şehir merkezinden göle doğrudan bırakılan atıksular, yetersiz altyapı sebebiyle arıtma proseslerinden geçmeksizin göle ulaşmış ve ciddi çevresel problemlere yol açmıştır. Söz konusu dip çamurlarının hem düşey hem de yatay yönde sıvı geçişine imkân tanıyan özellikleri, tarama çamurunun kendiliğinden sökülebilirliğini daha zor bir hale getirmiştir. Ancak 2021 yılında hizmete giren Van İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi, karşılaşılan bu sorunların giderilmesini önemli ölçüde kolaylaştırmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Çalışma alanına ait Google Earth görüntüsü

Bu süreçte, yeni atıksu arıtma tesisinin devreye alınmasının ardından, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ile Van Büyükşehir Belediyesi iş birliğiyle 2021 yılında mekanik tarama çalışmalarına başlanmıştır. Söz konusu çalışmalar, arıtma tesisinin deşarj noktalarına yakın bölgelerde, Tuşba ve İpekyolu ilçelerinin göl kıyısında birikmiş olan dip çamurunun temizlenmesine yönelik olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Van Gölü dip çamurları tarama faaliyetleri ile ilgili yapılan çalışma kapsamında, Tuşba sahilinde Van Gölü tabanında ekskavatör ile çekilen çamur, karaya getirilerek önce flokülasyon işlemi yapılmış daha sonra geotekstil tüplere dolumu yapılarak belirli oranlarda kurutularak susuzlaştırma çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Şekil 4).



Şekil 3. Çalışma alanında yapılan mekanik tarama işlemlerine ait görüntüler.



Şekil 4. Flokülasyon işlemi ve geotekstil tüpler ile susuzlaştırma işlemi

2.2. Laboratuvar Çalışmaları

Laboratuvar çalışmalarının ilk adımında, Atıksu arıtma tesisinin Van Gölü doğu kıyısından ekskavatör ile numune alınmış ve DTM-1 (dip tarama çamuru 1) olarak isimlendirilmiştir. Ekskavatör ile alınan dip tarama çamurları geotüp içerisine dolumu yapılmış ve yaklaşık 3 gün süreyle susuzlaştırması sağlanmıştır. Bu malzeme de DTM-2 (dip tarama çamuru 2) olarak isimlendirilmiştir. Atıksu arıtma tesisi çıkış noktasından temin edilen tarama çamurlarının bir kısmı, doğal halde laboratuvarda kuruması sağlanmış, bir kısmı ise 105°C’de susuzlaştırılmıştır. Daha sonra plastik tokmak yardımıyla numunelerin tane boyutlarına zarar vermeden yapışmış olan tanelerin birbirinden ayrılması sağlanmıştır. Deneysel aşamaya hazır olan dip çamurlarının endeks (fiziksel) ve mekanik özellikleri laboratuvar ortamında belirlenmiştir (Çizelge 1). Ardından yaş CBR deneyi yapılmıştır. Aynı sıkışma enerjisi ile sıkıştırılmış numuneden direk kesme deneyi için numuneler alınarak deney gerçekleştirilmiştir ve tarama çamurlarının kayma mukavemeti parametreleri belirlenmiş ve Karayolları Teknik Şartnamesinin limit değerlerini sağlayıp sağlamadığı deneysel verilerle ortaya konulmuştur.

Çizelge 1. Laboratuvar deneyleri ve deney standartları

Karakterizasyon türü	Uygulanan deneyler	Deney standardı
Fiziksel özellikler	Doğal su içeriği	TS EN ISO 17892-1[29], TS-1900-1[30]
	Organik madde içeriği	TS EN 13039 [31]
	Özgül ağırlık deneyi	TS EN ISO 17892-3 [32], TS 1900-1 [30]
	Tane boyu dağılım analizi	TS EN ISO 17892-4 [33]
	Kıvam limiti deneyleri	TS EN ISO 17892-12 [34]
	Zemin sınıflaması	TS EN ISO 14688-2 [35], ASTM-D2487 [36]
Mekanik özellikler	Standart proktor deneyi	TS-1900-1 [30], AASHTO T 99 [37]
	Yaş CBR deneyi	TS-1900-1 [28], AASHTO T 193-13 [38]
	Direk kesme deneyi	TS EN ISO 17892-10 [39]

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Laboratuvar ortamına alınan dip tarama çamurunun standartlara bağlı kalınarak dolgu malzemesi olarak kullanılıp kullanılamayacağı araştırılmıştır. Fiziksel ve mekanik bazı zemine ait testlere tabi tutulan tarama çamurlarından elde edilen sonuçlar aşağıda ayrı iki başlık altında yorumlanmıştır.

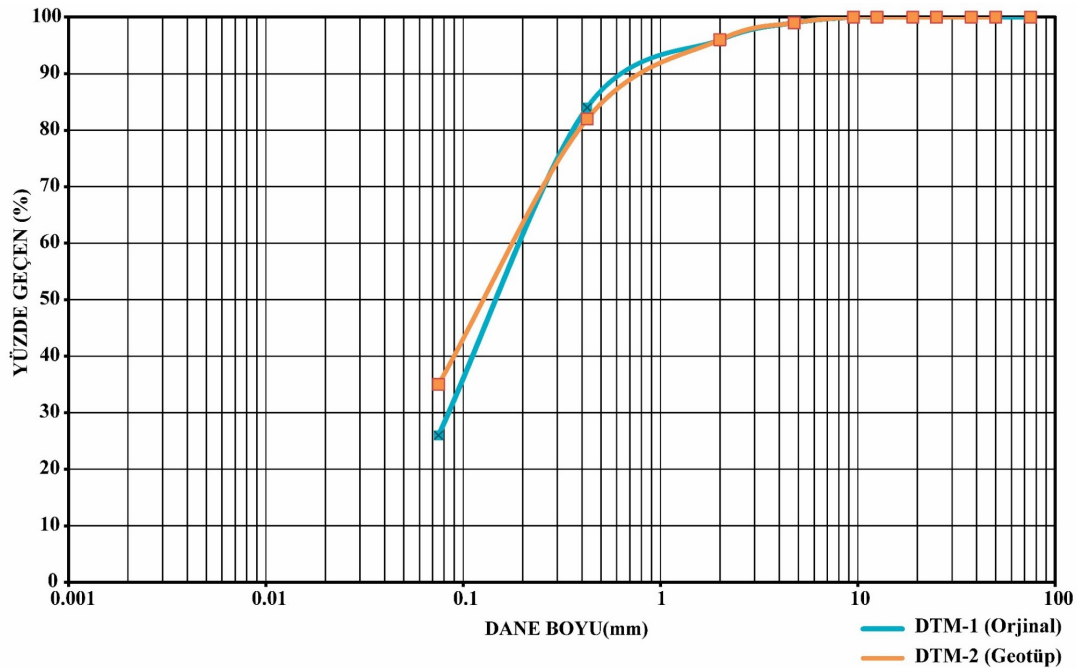
3.1. İnceleme Alanındaki Dip Çamurlarının Fiziksel Özellikleri

105°C’de etüvde kurutulan dip tarama çamuru örneklerinin başlangıç su içeriği yaklaşık %31.70 olarak hesaplanmıştır. Tamamen su altından alınan zemin örneğinde belirlenen bu su miktarı genel olarak zemin tanelerinin etrafını saran serbest su olup zeminin dolguda kullanılması durumunda 1-2 günlük sürede kolaylıkla ortamdaki uzaklaştırılabilecek ve dolgunun sıkışmasını etkilemeyecek miktarda olduğunu göstermektedir. ASTM D2487 [36] sınıflama ve standartlarına göre DTM-1 örneği %1 çakıl, %73 kum ve %26 silt-kil tane boylanmasıyla sahip iken, DTM-2 örneği ise %1 çakıl, %64 kum ve %35 silt-kil tane boylanmasıyla olduğu ve her iki örneğin SM (siltli kum, kum-silt karışımı) zemin sınıfında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Atterberg Limit deneyleri sonucunda tarama çamuru, nonplastik (NP) olarak bulunmuştur (Şekil 5), (Çizelge 2).

Organik madde içeriği, 550°C’de yakma kaybı yöntemiyle ölçülmüş ve yaklaşık %2,73 olarak belirlenmiştir. Bu miktar dolgu malzemesinin genel kompozisyonunun inorganik yapıda olduğunu göstermektedir ki optimum su içeriğinde sıkıştırılması sırasında malzemenin sıkışmaya karşı olumsuz tepkiler vermeyeceğini işaret etmektedir. Özgül ağırlığın 2,65 g/cm³ olması malzemenin kum veya siltli kum özelliğinde bir malzeme olabileceğini ve dolgular için ideale yakın bir malzemeye sahip olduğunu göstermektedir.

Çizelge 2. İnceleme alanındaki dip çamurlarının fiziksel özellikleri

	DTM-1 (İlksel)	DTM-2 (Geotüp)
Doğal su içeriği (W _n) (%)	31,70	28,3
Organik madde içeriği (%)	2,73	4,18
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2,65	2,62
Likit limit (%)	N.P.	N.P.
Plastisite indeksi (%)	N.P.	N.P.
Tane boyu dağılımı	%1 çakıl-%73 kum-%26 silt-kil	%1 çakıl-%64 kum-%35 silt-kil
Zemin sınıflaması	SM	SM



Şekil 5. Çalışma alanındaki zeminlerin tane boyu dağılım grafiği

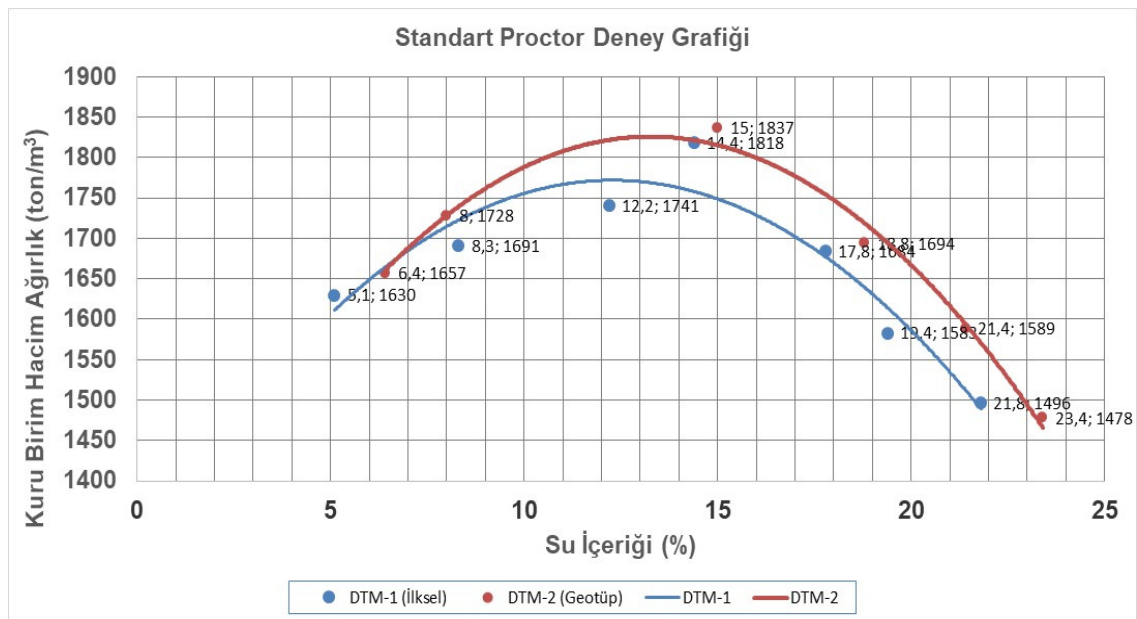
3.2. İnceleme Alanındaki Dip Çamurlarının Mekanik Özellikleri

Dip tarama çamurlarının dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması amacıyla Standart Proktor, Kaliforniya Taşıma Oranı ve şişme deneyleri yapılmıştır ve bu tarama çamurlarının yol dolgularında, sanat yapılarının yaklaşım dolgularında kullanım alanları Karayolları Genel Müdürlüğü'nce hazırlanan KTŞ kriterlerine göre yorumlanmaya çalışılmıştır. Deneylerde Standart Proktor sıkılığında belirlenen optimum su muhtevası ve bu değere karşı gelen maksimum kuru birim hacim ağırlıkları Şekil 6'daki gibi belirlenmiştir. Buna göre DTM – 1 dip çamurunun sırasıyla maksimum kuru birim hacim ağırlık (ton/m^3) ve optimum içeriği (%) 1,772 ve 12,40, DTM – 2'nin değerleri ise 1,825 ve 13,2 olarak bulunmuştur (Şekil 6). KTŞ'ne göre kullanıma uygun nitelikli kazı malzemesinin Çizelge 3'te verilen değerlerine göre DTM-1 ve DTM-2 numunelerinin asgari düzeyde kuru birim hacim ağırlık ve plastisite indisi kriterlerini sağladığı görülmektedir.

Çizelge 3. İnceleme alanındaki dip çamurlarının mekanik özellikleri

	DTM -1 (İlksel)	DTM-2 (Geotüp)
Maksimum kuru birim hacim ağırlık (ton/m^3)	1,772	1,825
Optimum içeriği (%)	12,40	13,2
Yaş CBR (%)	8	6
Yaş CBR şişme yüzdesi (%)	0	0
Kohezyon (c) (kPa)	49,04	51,87
İçsel sürtünme açısı (ϕ) (derece)	6	6

Ayrıca, TS 1900-1[30] standartına göre DTM – 1 ve DTM – 2 numunelerinin yaş CBR (California Taşıma Oranı) şişme yüzdeleri hesaplanmıştır ve % 0 olarak bulunmuştur (Çizelge 3). Laboratuvar ortamında sıkıştırılan zeminlerin dayanımı Yaş Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyi ile belirlenmektedir. Bu çalışmada CBR kalıplarında standart proktor enerjisinde optimum su muhtevalarında sıkıştırılarak hazırlanan dip tarama çamurları 2,6 kPa sürüşer yükü altında suda en az 3 gün süre ile bekletilmiş, şişme miktarları mekanik mikrometrelerle takip edilmiştir. Numunelerin sudan çıkarılmalarının ardından CBR deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sabit bir hızda standart kesit alanlı bir başlığın zemine batırıldığı deneyde batma miktarı - düşey yük ilişkisi belirlenmiştir. Sıkıştırılmış dip tarama çamuruna başlığın 2.5 cm ve 5 cm batması için gereken kuvvetin kırmataşa ait standart deney verilerine oranlanarak karşılaştırılması ile elde edilen yaş CBR değerleri DTM-1 %8, DTM-2 %6 olarak bulunmuştur (Çizelge 3). Ayrıca Karayolları Teknik Şartnamesi "Dolgular" başlığı altında ifade edilen yaş CBR (California Taşıma Oranı) değerinin ≤ 8 olan malzemelerin üstyapı tabanı olarak kullanılmasının yasaklanması şartına göre dip çamuru değerlendirildiğinde, DTM – 1 için yaş CBR değerinin sınırda olduğu ve DTM – 2 için ise bu değer altında olduğu ve dolgu üstyapı tabanı malzemesi için kullanımının uygun olmadığı belirlenmiştir.



Şekil 6. Çalışmada kullanılan numunelerin kuru birim hacim ağırlık ve su içeriği grafiği

Çizelge 4. Karayolları Teknik Şartnamesi'ne göre dolgu malzemesi özelliklerinin sınır değerleri (KTŞ-2013; Çizelge-206-1)

Deney	KTŞ sınır değerleri	Deney standardı
Likit limit (LL) %	≤60	TS1900-1[30], AASHTO T-89 [40]
Plastisite indeksi (PI) %	≤35	TS1900-1 [30], AASHTO T-90 [41]
Maksimum kuru birim hacim ağırlık t/m^3	≥1,450	TS1900-1 [30], AASHTO T-99 [37]
Yaş CBR şişme yüzdesi %	≤3	TS1900-1 [30], AASHTO T-193 [38]

KTŞ'de kullanım amacına göre en büyük Yaş CBR Şişme miktarları alt temelde %0.5, üstyapı tabanında %1, dolgularda %2 ve esnek üstyapılarda ise %3 olarak istenmektedir. Buna göre, DTM-1 ve DTM-2 numunelerinin şişme miktarı bu değerlerin altında olduğundan, alt temelde, üst yapı tabanında, dolgularda ve esnek üst yapılarda bu malzeme şişme miktarı açısından kullanılabilir özelliklere sahip olduğu gözlenmiştir. Ayrıca Yaş CBR şişme miktarının Çizelge 4'de verilen sınır değerine göre DTM-1 ve DTM-2 dip çamurlarının dolguda kullanılabileceği gözlenmiştir. Özellikle ülkemizde dip akış ortamlarına sahip denizlerde yapılan bu tür çalışmalar bulunmasına karşın [21,22,27], kapalı bir göl havzasında dip tarama çamurunun özelliklerinin ve geri dönüşümünün araştırması açısından bu çalışma özgün bir değer içermektedir.

4. SONUÇLAR

Bölgedeki en büyük arıtma tesisine ait arıtma çamurunun uzun yıllar boyunca doğrudan göle deşarj edilmesine bağlı olarak Van Gölü doğu kıyısında, ciddi bir taban kirliliği oluşmuştur. Bu kirliliğin giderilmesi amacıyla gerçekleştirilen dip tarama çalışmaları sonucunda elde edilen tarama çamuru malzemesi iki farklı koşulda alınarak çeşitli deneylere tabi tutulmuş ve dolgu malzemesi olarak kullanım potansiyeli araştırılmıştır. Laboratuvar deney sonuçlarına göre, DTM-1 ve DTM-2 dip tarama çamurlarının, Atterberg limitleri, maksimum kuru birim hacim ağırlık, optimum su içeriği ve yaş CBR şişme yüzdesi sonuçlarına göre dolgu malzemesi olarak kullanılabileceği belirlenmiştir. Yaş CBR değerleri dikkate alındığında, DTM-1'in sınır değerlere sahip olduğu, DTM-2'nin ise iyileştirme yöntemleri uygulanması halinde dolguda kullanılabileceği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, dip çamurlarının sınır özellikler göstermesine rağmen dolgu malzemesi olarak değerlendirilebilecek niteliklere sahip olduğunu ve bertarafı açısından umut verici bulgular sunduğunu göstermektedir. Laboratuvar ortamında sıkıştırılan dip tarama çamuru üzerinde yapılan direkt kesme kutusu deneyi sonucunda, kohezyon değeri 50 kPa'dan küçük, içsel sürtünme açısı ise 8°'den düşük bulunmuştur. İdeal yol dolgularında, drenajlı koşullarda oluşturulan dolgular için kohezyon değerinin sıfıra yakın, içsel sürtünme açısının ise 30°'nin üzerinde olması beklenmektedir. Bu nedenle, elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde malzemenin stabilitesi açısından doğrudan kullanımının uygun olmadığı, ancak içsel sürtünme açısını artıracak kaba tane boyutuna sahip ek malzemeler ile iyileştirilip yol dolgusunda yeniden kullanım potansiyelinin araştırılması önerilmektedir. Ayrıca ileriki çalışmalarda saha uygulamaları için dip tarama çamurunun içerisindeki ince dane oranını kontrol altında tutmak amacıyla yıkama eleme vb. yöntemlerle istenilen yaş CBR değerinin sağlanması önerilmektedir.

Sonuç olarak, dip tarama çamurlarının doğal yaşama vereceği zararların hem çevresel hem de ekonomik etkileri göz ardı edilmemelidir. Bu çalışma sonunda da Van şehrine ait eski arıtma tesisine bağlı kirliliğe sebep olan dip çamurlarının inorganik özelliklerde olması, dolgu malzemesi olarak kullanılabilir özelliklere yakın olması, dip tarama çamurlarının karada bertarafının mümkün olduğu ve tehlikesiz olanların ise faydalı kullanıma dönüştürülebileceği belirlenmiştir. Bu çalışmada dip tarama çamurlarının yol dolgu malzemesi olarak kullanımına yönelik testler üzerinde durulmuştur, farklı sektörler için de çalışmanın genişletilmesi ve en faydalı kullanım alanının ayrıca belirlenmesi de tarafımızca önerilmektedir.

5. KAYNAKLAR

1. Agustini, F., Skoczylas, F. & Lafhaj, Z. (2007). About a possible valorisation in cementitious materials of polluted sediments after treatment. *Cement and Concrete Composites*, 29, 270-278.
2. LIFE, (2002). Methods for management and reuse of polluted sediments. *European Project Realized by in vivo, France (in French)*.
3. Krause, P.R. & McDonnell, K.A. (2000). The beneficial reuse of dredged material for upland disposal. *HLA Project No. 48881*, California, USA.

4. Riordan, J., Murphy, J.P. & Harrington, J.R. (2008). Construction and demolition waste and dredge material as landfill liner in Ireland. *1st Middle European Conference on Landfill Technology. The Hungarian Academy of Sciences*, Budapest, Hungary.
5. Hamer, K. & V, Karius. (2002). Brick production with dredged harbour sediments. *An Industrial-Scale Experiment. Waste Management*, 22, 521-30.
6. Samara, M., Lafhaj, Z. & Chapiseau, C. (2009). Valorization of stabilized river sediments in fired clay bricks: Factory scale experiment. *Journal of Hazardous Materials*, 163, 701-710.
7. Dalton, J.L., Gardner, K.H., Seager, T.P., Weimer, M.L., Spear, J.C.M. & Magee, B.J. (2004). Properties of Portland cement made from contaminated sediments. *Resources, Conservation and Recycling*, 41, 227-241.
8. Aouad, G., Laboudigue, A. Gineys, N. & Abriak, N.E. (2012). Dredged sediments used as novel supply of raw material to produce Portland cement clinker. *Cement & Concrete Composites*, 34, 788-793.
9. Douglas, W.S., Maher, A. & Jafari, F. (2005). Analysis of environmental effects of the use of stabilized dredged material from New York/New Jersey harbor, USA, for construction of roadway embankments. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 1(4), 355-364.
10. Levacher, D. & Sanchez, M. (2011). Characterization of marine sediments for a reuse in land disposal and embankment. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 15(2), 167-178.
11. DPC, 2009. Challenging the industry, Panama report. *Dredging and Port Construction Magazine*.
12. Wang, H.Y. (2009). Durability of self-consolidating lightweight aggregate concrete using dredged silt. *Construction and Building Materials*, 23, 2332-2337.
13. Tang, C.W., Chen, H.J., Wang, S.Y. & Spaulding, J. (2011). Production of synthetic lightweight aggregate using reservoir sediments for concrete and masonry. *Cement and Concrete Composites*, 33, 292-300.
14. Wang, D., Abriak, N.E., Zentar, R. & Xu, W. (2012). Solidification/stabilization of dredged marine sediments for road construction. *Environmental Technology*, 33(1), 95-101.
15. Wang, D., Abriak, N.E. & Zentar, R. (2013a). Strength and deformation properties of Dunkirk marine sediments solidified with cement, lime and fly ash. *Engineering Geology*, 166, 90-99.
16. Wang, D., Abriak, N.E. & Zentar, R. (2013b). Co-valorisation of Dunkirk dredged sediments and siliceous-aluminous fly ash using lime. *Road Materials and Pavement Design*, 14(2), 415-431.
17. Chen, H.J., Yang, M.D., Tang, C.W. & Wang, S.Y. (2012a). Durability design and performance of self-consolidating lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 28, 387-394.
18. Tang, C.W. (2014). Producing synthetic lightweight aggregates by treating waste TFT-LCD glass powder and reservoir sediments. *Computers and Concrete*, 13, 149-171.
19. Karakılçık, G. & Türkmen, S. (2019). Endüstriyel ham madde atıklarının dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(2), 121-134.
20. Uysal, F., Yılmaz, V. & Topçu, H.M. (2020). Farklı atık malzemeler ile stabilize edilmiş ince daneli zeminin mühendislik özellikleri. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(1), 19-26.
21. Cevikbilen, G., Teymur, B., Karadogan, U., Basar, H.M., Dağlı, S. & Tolun, L. (2015a). An investigation on suitability of dredge materials on road construction. *International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICOCEE)*, Nevşehir, Turkey.
22. Cevikbilen, G., Teymur, B., Karadogan, U., Basar, H.M., Dağlı, S., Özer-Erdoğan, P., Güzel, B. ve Tolun, L. (2015b). Kaba daneli deniz dibi tarama malzemelerinin geoteknik özelliklerinin değerlendirilmesi. *6. Geoteknik Sempozyumu*, Adana, Türkiye.
23. Ozer-Erdogan, P., Basar, H.M., Erden, I. & Tolun, L. (2016). Beneficial use of marine dredged materials as a fine aggregate in ready-mixed concrete: Turkey example. *Construction and Building Materials*, 124, 690-704.
24. Cai, Y., Qiao, H., Wang, J., Geng, X., Wang, P. & Cai, Y. (2017). Experimental tests on effect of deformed prefabricated vertical drains in dredged soil on consolidation via vacuum preloading. *Engineering Geology*, 222, 10-19.
25. Başar, M.B., Guzel, B., Erdoğan-Ozer, P. ve Tolun, L. (2017) Türkiye'deki deniz dibi tarama malzemelerinin faydalı kullanım öncesi çevresel etkilerinin belirlenmesi: Ticari limanlar & balıkçı barınakları. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(4), 1063-1076.
26. Güzel B., Başar H.M., Güneş K., Yenisoğlu-Karakaş S., Karakaş D. & Tolun L., (2017). Assessment of marine dredged materials taken from Turkey's ports/harbors in landscaping. *Desalination and Water Treatment*, 71, 207-220.

27. Karadoğan, Ü. (2021). Haliç dip tarama çamuru ve maden atığının geotekstil tüp ile susuzlaştırılması ve geoteknik mühendisliği açısından değerlendirilmesi. *Doktora tezi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı, İstanbul, 125.
28. Özvan, A. (2004). Van yerleşim alanının mühendislik jeolojisi. *Yüksek lisans tezi*. Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Van, 103.
29. TS EN ISO 17892-1, (2014). *Geoteknik etüt ve deneyler - Zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Su içeriğinin belirlenmesi*, Ankara.
30. TS 1900-1, (2017). *İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri-Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini*, Ankara.
31. TS EN 13039, (2012). *Toprak islahını iyileştirici ve geliştirenleri - Organik madde içeriği ve kül tahsisi*, Ankara.
32. TS EN ISO 17892-3, (2016). *Geoteknik etüt ve deneyler - Zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 3: Tane yoğunluğunun belirlenmesi*, Ankara.
33. TS EN ISO 17892-4, (2016). *Geoteknik etüt ve deneyler - Zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 4: Tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi*, Ankara.
34. TS EN ISO 17892-12, (2016). *Geoteknik etüt ve deneyler - Zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 12: Likit ve plastik limitlerin tayini*, Ankara.
35. TS EN ISO 14688-2, (2018). *Geoteknik etüt ve deneyler - Zeminlerin ayrılması ve sınıflandırılması- Bölüm 2: Sınıflandırma kuralları*, Ankara.
36. ASTM D 2487-06, (2006). Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system), *In Annual Book of ASTM Standards*, 1-12, Philadelphia, USA.
37. AASHTO T 99, (2015). Moisture Density Relations of Soils. *American Association of State Highway and Transportation Officials*.
38. AASHTO T 193-13, (2017). The standard method of test for the California bearing ratio. *Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials*.
39. TS EN ISO 17892-10, (2019). *Geoteknik etüt ve deneyler - Zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 10: Doğrudan kesme deneyi*, Ankara.
40. AASHTO T 89, (2015). Determining the liquid limit of soils. *American Association of State Highway and Transportation Officials*.
41. AASHTO T 90, (2020). Determining the plastic limit and plasticity index of soils. *American Association of State Highway and Transportation Officials*.

Sürdürülebilir Elektrikli Ulaşım için Stratejik Planlama: Bursa İlinde Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Yer Seçimi Analizi

Adnan ABDULVAHİTOĞLU^{1,a}, Aslı ABDULVAHİTOĞLU^{2,b}, Ziya ARSLAN^{3,c}

¹Mudanya Üniversitesi Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

²Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye

³Togg Fabrikası Proje Departmanı, Bursa, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-2659-6709; ^bORCID: 0000-0002-3603-6748; ^cORCID: 0009-0003-0721-6840

Makale Bilgileri

Geliş : 20.03.2025

Kabul : 05.12.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1661781

Sorumlu Yazar

Adnan ABDULVAHİTOĞLU

abdulvahitoglu@gmail.com

Anahtar Kelimeler

Elektrikli araç

Şarj istasyonu

Şarj istasyonu kuruluş yeri seçimi

ÇKKV

Borda kuralı

Atf şekli: ABDULVAHİTOĞLU, A., ABDULVAHİTOĞLU, A., ARSLAN, Z., (2025). Sürdürülebilir Elektrikli Ulaşım için Stratejik Planlama: Bursa İlinde Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Yer Seçimi Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(4), 959-976.

ÖZ

Küresel ısınma ve iklim değişikliği günümüzün en önemli çevresel sorunları arasında yer almakta, fosil yakıt kullanımı nedeniyle artan sera gazı emisyonları bu süreci daha da hızlandırmaktadır. Sera gazı emisyonlarının azaltılması ve iklim değişikliğiyle mücadele, düşük karbonlu teknolojilerin kullanılmasını öne çıkarmaktadır. Küresel karbon emisyonlarının önemli bir kısmından sorumlu olan ulaşım sektöründe, fosil yakıtla çalışan içten yanmalı motorlu (İYM) araçlar hem çevresel kirlilik hem de halk sağlığı açısından ciddi riskler oluşturmaktadır. Elektrikli araçlar (EA), bu bağlamda çevre dostu bir alternatif sunmaktadır. Ancak EA'ların geniş ölçekte benimsenmesi yalnızca teknolojik ilerlemeye değil, aynı zamanda kullanıcıların bu teknolojiye adaptasyonunu kolaylaştıracak yeterli şarj altyapısının ve destekleyici ekosistemlerin geliştirilmesine de bağlıdır. Bu çalışmada, Türkiye'nin ilk yerli ve milli EA fabrikası Togg'un kurulu bulunduğu Bursa ilinde potansiyel şarj istasyonu konumları Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri ile analiz edilerek en uygun konumların belirlenmesi amaçlanmıştır. Dört farklı ÇKKV yöntemiyle alternatifler karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş, sonuçlar, Borda kuralı ile birleştirilerek nihai sıralama oluşturulmuştur.

Strategic Planning for Sustainable Transportation: Analysis of Electric Vehicle Charging Station Location Selection in Bursa Province

Article Info

Received : 20.03.2025

Accepted : 05.12.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1661781

Corresponding Author

Adnan ABDULVAHİTOĞLU

abdulvahitoglu@gmail.com

Keywords

Electric vehicle

Charging station

Charging station location selection

MCDM

Borda rule

How to cite: ABDULVAHİTOĞLU, A., ABDULVAHİTOĞLU, A., ARSLAN, Z., (2025). Strategic Planning for Sustainable Transportation: Analysis of Electric Vehicle Charging Station Location Selection in Bursa Province. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(4), 959-976.

ABSTRACT

Among the foremost environmental concerns of our era are global warming and climate change, and the process is further accelerated by the increasing greenhouse gas emissions that result from the consumption of fossil fuels. Mitigating greenhouse gas emissions and combating climate change necessitates the widespread adoption of low-carbon technologies. The transportation sector, which accounts for a substantial share of global carbon emissions, poses significant environmental and public health risks due to its heavy reliance on fossil fuel-powered internal combustion engine (ICE) vehicles. In this context, electric vehicles (EV) emerge as a more environmentally sustainable alternative. However, the large-scale adoption of EVs relies not only on technological progress but also on the development of sufficient charging infrastructure and supportive ecosystems that ease user adaptation to this technology. This study aims to analyze potential charging station locations in Bursa, where Togg, Turkey's first domestic and national EV factory, is located, using Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods to determine the most suitable locations. The alternatives were analyzed comparatively using four different MCDM methods, and the results were combined with the Borda Rule to create the final ranking.

1. GİRİŞ

Ulaşım sektörü, teknolojik gelişmelerin doğrudan şekillendirdiği ve büyük dönüşümler geçiren bir alandır. Sanayi Devrimi'nden itibaren ulaşım teknolojilerinde yaşanan gelişmeler, ekonomik ve toplumsal yapıyı önemli ölçüde etkilemiştir. Bu bağlamda otomobillerin gelişim tarihi, 18. yüzyılda buharlı motorların icadından günümüzün çevre dostu elektrikli motor (EM)'larına kadar uzanan bir değişimi kapsamaktadır. Bu süreçte İYM'li araçlar uzun yıllar sektöre hâkim olmuş, ancak neden oldukları CO2 salınımı ve küresel ısınma gibi çevresel kaygılar alternatif arayışlarını hızlandırmıştır.

Otomotiv endüstrisinde önemli dönüm noktalarından biri olan EA'ların kökeni 19. yüzyıla dayanmaktadır. 1828'de Macar fizikçi Ányos Jedlik, ilk EM'lu aracı tasarlamış, ardından 1834'te Thomas Davenport raylar üzerinde hareket eden bir EA geliştirmiştir. 1881'de Fransız mucit Gustave Trouvé, elektrikle çalışan üç tekerlekli bir araç üretmiştir [1]. Ancak dönemin yetersiz enerji depolama teknolojileri, EA'ların yaygınlaşmasını geciktirmiştir. Karl Benz'in 1886 yılında İYM'lu aracı üreterek pazara girmesinden hemen sonra Morris ve Salomon 1895 yılında iki koltuklu bir EA üretmişlerdir. Hatta 1897 yılında İngiltere'de, 1901 yılında ise New York'ta EA'lar taksi olarak hizmet vermişlerdir [2]. 20. Yüzyılın başlarında ABD'de Ford'un, üretim bandı sistemini kullanmaya başlaması otomotiv endüstrisinde üretimi devrim niteliğinde artırmış, İYM'lu araç pazarı daha düşük maliyet, uzun menzil ve enerjiye ulaşım kolaylığı gibi sebeplerden dolayı hızlı bir büyüme göstermiştir [3]. Bu gelişmeler EA'ların bir kenara itilerek unutulmasına; menzil, batarya, şarj imkânları gibi sorunlardan dolayı da yıllarca hak ettiği ilgiyi görememesine neden olmuştur. Hemen hemen tüm EA üreticileri 1920-1960 yıllarında tamamen İYM'lu araç üretimine odaklanmışlardır [4]. İYM'ların neden olduğu CO2 emisyonu, hava ve gürültü kirliliği, bazı küçük ölçekli firmaları çevre dostu EA üretimine yöneltmiştir [5]. 1970'li yıllarda yaşanan petrol krizi ise, özellikle petrolde dışa bağımlı gelişmiş ülkelerin EA çalışmalarını desteklemesine neden olmuştur [6].

Ancak bu dönemde geliştirilen prototipler, batarya teknolojisinin yetersizliği nedeniyle yaygınlaşamamış, düşük hız ve kısa menzil gibi sınırlamalardan dolayı başarılı olamamışlardır. 1980'lerde batarya teknolojisindeki ilerlemeler, elektrikli araçların potansiyelini yeniden artırmıştır [7]. EA'ların modern anlamda yükselişi 1990'larda hız kazanmış, Toyota Prius gibi hibrit araçlar EM ve İYM'ları birleştirerek bir geçiş süreci başlatmıştır. 2000'li yıllarda lityum-iyon bataryaların yaygınlaşması, menzil ve performans açısından önemli iyileştirmeler sağlamıştır. 2008'de, tamamen elektrikli yapısıyla yüksek performans ve uzun menzil sunan Tesla Roadster sektörde dönüm noktası olmuştur [8].

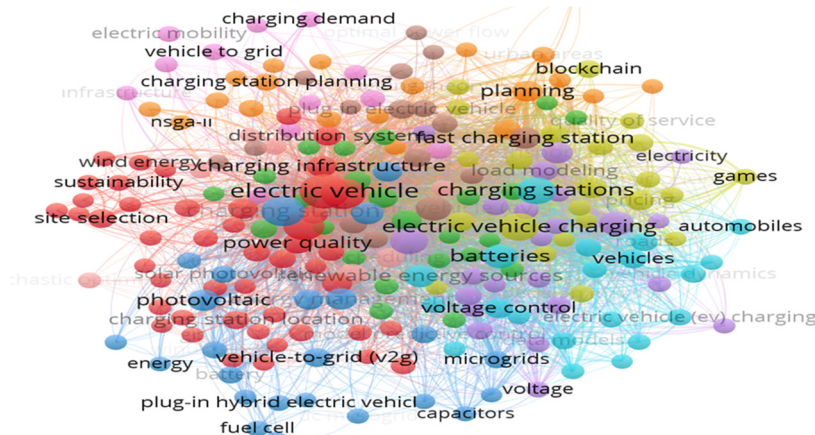
Avrupa Birliği (AB), İklim Anlaşması ve küresel emisyon azaltma hedefleri doğrultusunda, 2035 yılı itibarıyla yeni benzinli ve dizel araç satışını yasaklamayı planlayarak EA'ların yaygınlaşmasını teşvik eden politikalar geliştirmekte ve sürdürülebilir ulaşım çözümlerini desteklemektedir. Bu doğrultuda, elektrikli araç şarj istasyonları (EAŞİ) için altyapının genişletilmesi gibi geleceğe yönelik projeler hayata geçirilmeye çalışılmaktadır [9]. İYM'lu araç sektöründe küresel ölçekte etkili bir konum elde edemeyen Çinli üreticiler, EA üretimi ve batarya teknolojileri alanında yaptıkları yatırımlar sayesinde sektörde dünya liderliğine ulaşmıştır. Çinli üreticiler, maliyet etkinliği ve yenilikçi tasarımlarıyla dikkat çekmekte ve küresel pazarda rekabet avantajı elde etmektedir [10].

2023-2024 yıllarında küresel ölçekte yaşanan ekonomik ve siyasi gelişmeler, özellikle ABD ve AB merkezli otomotiv devlerinin Çinli üreticilerin pazar hâkimiyeti konusunda endişe duymalarına yol açmış ve kısa vadede elektrikli araç sektöründe bazı tereddütlere neden olmuştur. Bununla birlikte, 2025 yılında dünyada meydana gelen ekonomik ve siyasi gelişmeler ile fosil yakıt kaynaklarını çeşitlendirme çalışmaları, AB ülkelerinin EA yatırımlarına yeniden hız vermesine neden olmuştur.

Bu gelişmelerin yakinen takip edildiği Türkiye'de 25 Haziran 2018 yılında EA üretimi için Togg girişim grubu oluşturulmuş olup, bu girişimin Trugo ve Trumore alt markaları bulunmaktadır. Togg fabrikasının 29 Ekim 2022'de resmi açılışı yapılmış ve 2023 yılında ilk EA'lar piyasa yerini almıştır. Türkiye'de yoğun ilgi duyulan Togg'un ilk EA'ı olan T10X modelini 2025 yılında C segmentindeki T10F modelinin takip etmesi, 2032 yılına kadar pazardaki farklı ihtiyaçlara cevap verecek yeni modelleri ile piyasada yer alması beklenmekte ve 1 milyon araç satışına ulaşılması hedeflenmektedir [11].

Literatürde, Türkiye'de EAŞİ altyapısı [12], EM ve İYM'lu araçların enerji verimliliklerinin karşılaştırılması [13], bulanık mantık ile EAŞİ yer seçimi [14], hibrit şarj sistemleri [15], Hızlı tren istasyon yeri seçimi [16], EAŞİ yerlerinin elektrik şebekesi üzerine etkisi [17], EA tercihi eden faktörler [18],

EA otoparklarında şarj yönetimi [19], uzman görüşlerine dayalı ÇKKV yöntemleri ile EA seçimi [20], Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tümleşik ÇKKV ile EAŞİ yer seçimi [21], EA şarj yöntemleri [22], AHP ve bulanık TOPSIS yöntemleri ile optimum EAŞİ yeri seçimi [23], EA'ların güç transfer sistemi tasarımı [24], hibrit güç sistemleri [25], EA bataryalarının SWARA-TOPSIS yöntemleri ile değerlendirilmesi [26], ömrü tamamlanmış EA bataryalarının çevresel yönetimi [27], EA ve İYM'lu araçların çevresel yaşam döngüsü karşılaştırması [28], optimum EAŞİ yeri seçim modeli ve stratejileri [29], yeşil araç rotalama probleminde Bulanık AHP ve EDAS yöntemlerinin kullanımı [30], EA'larda batarya şarj uygulamaları [31] vb EA konulu yüzlerce çalışma yapıldığı görülmektedir. Web of Science'te yayınlanan çalışmaların Wosviewer kullanılarak analizi sonucunda EA temalı çalışmaların aşağıda Şekil 1.'de gösterildiği gibi olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 1. EA temalı çalışmalar (yazar tarafından oluşturulmuştur)

Literatürde, EA teknolojileriyle ilgili pek çok sorunun çözüldüğü ve bu teknolojilerin hızla gelişmeye devam ettiği görülmektedir. Ancak EA kullanımıındaki hızlı artış ile birlikte EA şarj altyapısı, EAŞİ konumlandırması ve elektrik dağıtım ağı yetersizliği gibi sorunlar halen devam etmektedir. Bu nedenle EA edinimine ve EAŞİ yeri seçimine etki eden birçok kriter bulunmaktadır.

Karara etki eden kriterlerin sistematik ve tutarlı bir şekilde değerlendirilmesi, karar verme süreçlerinin daha şeffaf hale getirilmesi, belirsizliklerle daha iyi başa çıkılarak karmaşık problemlerin daha etkili bir şekilde çözülmesi ve daha bilinçli kararlar alınması maksadıyla ÇKKV yöntemlerinden sıklıkla yararlanılmaktadır [32]. Bu yüzden bu çalışmada ÇKKV yöntemleri kullanılarak yapılan analiz ile araştırmacılara bilimsel karar desteği sağlanmıştır. Literatürde Bursa ili özelinde EAŞİ kuruluş yerlerinin ÇKKV yöntemleri ile analiz edildiği bir çalışmaya rastlanmaması, bu araştırmanın özgünlüğünü vurgulamaktadır.

Bu çalışmanın giriş bölümünde ilgili literatür incelenerek EA ve EAŞİ ile ilgili genel hususlar ve ele alınmıştır. İkinci bölümde, kullanılan ÇKKV yöntemleri tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde, oluşturulan senaryoya ve mevcut verilere dayanarak ÇKKV yöntemleri ile Bursa ilinde muhtemel EAŞİ konumları karşılaştırılarak optimum EAŞİ kuruluş yerleri belirlenmiştir. Sonuç bölümünde ise, ÇKKV yöntemlerinin, benzer karar problemlerinde kullanımına yönelik öneriler sunulmuştur. Çalışmanın aşamaları Şekil 2’de gösterilmiştir.

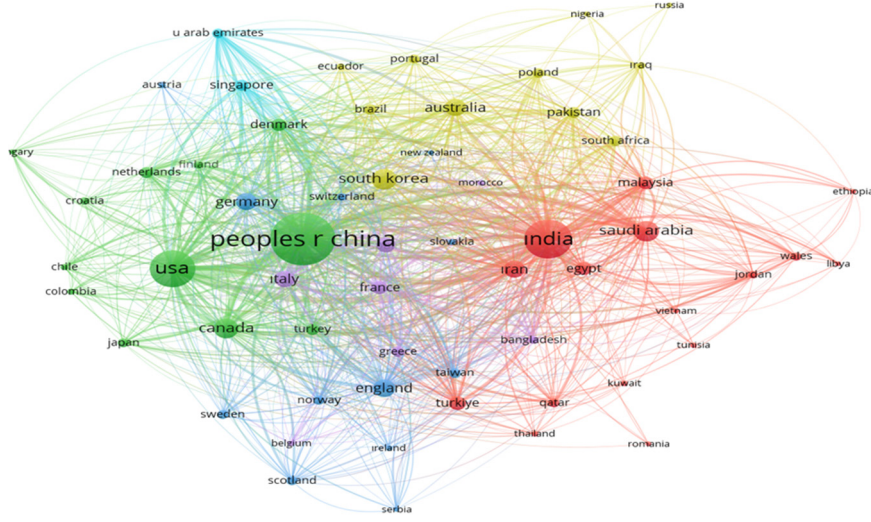


Şekil 2. Çalışmanın aşamaları

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Günümüzde EA'ların hızla yaygınlaşması, bu araçların temel bileşenleri olan EM'ları, bataryalar ve batarya şarj sistemleri üzerine yapılan araştırmaların önemini artırmaktadır. Türkiye'de, Bursa'da kurulan ve

yalnızca EA üretimine odaklanan Togg otomobil fabrikası, ilk yerli EA'yı üreterek sektörde güçlü bir yer edinmeyi hedeflemektedir. Bu girişim, fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmanın yanı sıra, otomotiv ithalatına yönelik kaynakların daha verimli kullanılmasına da katkı sağlayacaktır.



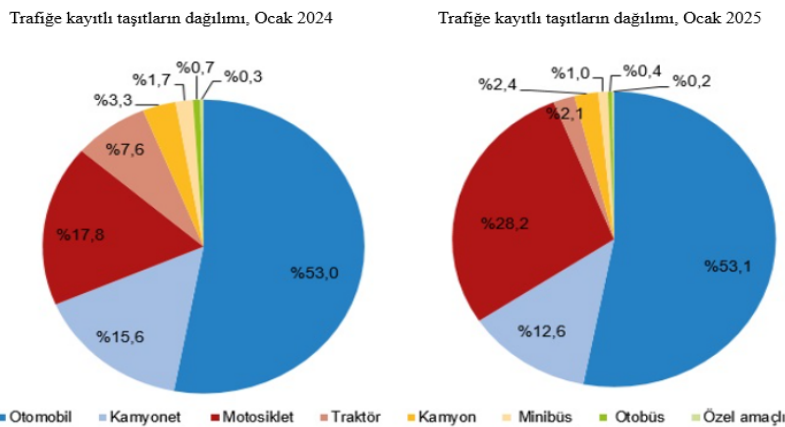
Şekil 3. EA temalı çalışma yapılan ülkeler (Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Bu bağlamda özellikle 1970'li yıllarda yaşanan petrol krizi ile özellikle petrolde dışa bağımlı gelişmiş ülkelerin EA çalışmalarına yönelmesi [6] ile başlayan çalışmalar günümüzde dünya geneline yayılmıştır. Web of Science üzerinde gerçekleştirilen EA konulu çalışmaların, Wosviewer programı kullanılarak yapılan analizinde, EA çalışmaları yapılan başlıca ülkeler Şekil 3'te sunulmuştur.

EA kullanımının yaygınlaşabilmesi için sürdürülebilir ve etkili bir altyapı gereklidir. Bu bağlamda, EAŞİ konumlarının belirlenmesi stratejik bir önem taşımaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'nin dördüncü büyük şehri ve ilk yerli EA fabrikasının bulunduğu Bursa ili özelinde potansiyel EAŞİ konumları MEREC tümleşik MAIRCA, MABAC, MOOSRA ve COPRAS yöntemleri ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

2.1. Elektrikli Araçlar

2025 yılı itibarıyla Türkiye'de EA sayısı, artan çevresel duyarlılık ve sürdürülebilir ulaşım çözümleri doğrultusunda önemli bir artış göstermektedir. Türkiye'nin yenilenebilir enerji politikaları ve EA kullanımını teşvik eden yasalar, bu trendi desteklemektedir. Aralık 2024 itibarıyla da Türkiye'de EA sayısı 165.898 olmuştur. Bir önceki yıla oranla elektrikli otomobil satışları, %72,6 artmıştır. Türkiye'de trafiğe kayıtlı araçların durumu Şekil 4.'de, trafiğe kayıtlı otomobillerin yakıt cinslerine göre miktarı ise aşağıda Çizelge 1.'de gösterilmiştir [33].



Şekil 4. Türkiye'de trafiğe kayıtlı araçlar [33]

Çizelge 1'de görüldüğü üzere, Türkiye'de trafiğe kayıtlı araç sayısındaki artış, otomotiv sektörünün dinamik bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. EA payındaki yükseliş ise sürdürülebilir ulaşım hedefleri doğrultusunda önemli bir gelişme olarak değerlendirilmektedir. Bu kapsamda, Türkiye'de şarj altyapısının genişletilmesi ve çevre dostu araçların teşvik edilmesi, ulaşımın çevresel etkilerinin azaltılmasına katkı sağlayacaktır.

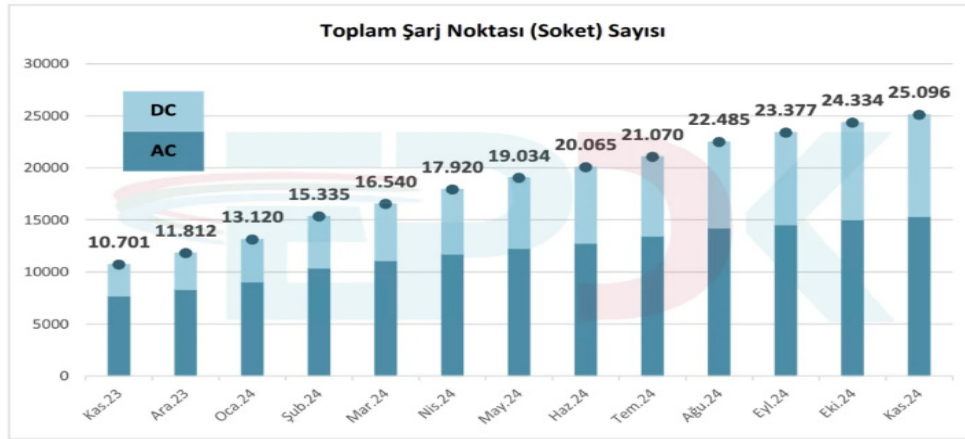
Çizelge 1. Türkiye'deki otomobillerin yakıt cinsine göre dağılımı

Yıl	Benzin	Dizel	LPG	Hibrit	Elektrik	Toplam
2019	3 020 017	4 769 714	4 661 707	13 877	1 176	12 503 049
2020	3 201 894	5 014 356	4 810 018	33 690	2 797	13 099 041
2021	3 495 172	5 158 803	4 923 275	86 682	6 267	13 706 065
2022	3 817 104	5 261 876	5 005 563	134 662	14 552	14 269 352
2023	4 362 975	5 425 652	5 094 751	222 328	80 043	15 221 134
2024	4 860 582	5 531 873	5 163 524	365 480	165 896	16 122 636

2.2. Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Kuruluş Yerinin Belirlenmesi

EAŞİ'lerinin konum seçimi, stratejik, çevresel, teknolojik, ekonomik vb faktörler dikkate alınarak belirlenmektedir [29]. İdeal konumlar; şehir merkezleri, otoyollar, alışveriş merkezleri ve dinlenme tesisleri gibi erişimi kolay alanlarda seçilmeli, enerji altyapısının uygunluğu, çevresel etkiler ve yatırım maliyetleri analiz edilmektedir. Ayrıca, sürdürülebilir ulaşımın desteklenmesi ve kullanıcıların şarj hizmetine hızlı erişimi temel hedefler arasındadır [34]. Bu süreçte, teknolojik gereksinimler, yerel yönetim düzenlemeleri ve toplumsal ihtiyaçlar da karar mekanizmasında belirleyici unsurlar olarak öne çıkmaktadır.

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) 2024 yılı Şarj Hizmeti Piyasası Aylık İstatistikleri raporuna göre (Şekil 5.), Kasım 2024 itibarıyla Türkiye'de toplam EA şarj istasyonu sayısı 25.096'ya ulaşmıştır. Ekim 2024'te bu sayı 24.334 olup, bir ayda %3,13'lük (762 adet) bir artış gözlemlenmiştir [35]. Bu artış, Türkiye'de EA'ların yaygınlaşmasıyla birlikte şarj altyapısının da hızla geliştiğini göstermektedir.



Şekil 5. Türkiye'de toplam şarj noktası sayısı [35]

EA'ların şarj edilmesi, sürdürülebilir ulaşımın temel unsurlarından biridir. EA'lar, bataryalarına enerji depolamak için şarj istasyonlarına veya ev tipi şarj cihazlarına bağlanarak çalışır. Şarj altyapısının yaygınlaşması, elektrikli araçların benimsenmesini artırmak ve kullanıcı deneyimini iyileştirmek açısından kritik öneme sahiptir. Şarj işlemleri genellikle üç kategoriye ayrılmaktadır: yavaş (AC), hızlı (AC veya DC) ve ultra hızlı (DC) [22]. Halka açık hızlı şarj istasyonları, seyahat sürelerini azaltarak kullanıcıların gereksinimlerini daha verimli karşılamaktadır.

Bununla birlikte, EA'ların yaygınlaşması, şarj altyapısının yeterliliği, enerji yönetimi ve kullanıcı deneyimi açısından çeşitli zorlukları da beraberinde getirmektedir. Şarj altyapısının geliştirilmesi yalnızca yeni istasyonların inşasıyla sınırlı kalmamakta; enerji verimliliği, şebeke yükü yönetimi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu gibi unsurları da kapsamaktadır. Bu süreçte, teknolojik gelişmeler ve politika

destekleri ile kamu ve özel sektör iş birliği karşılaşılan sorunların çözümünde önemli bir rol oynamaktadır. Bu iş birlikleri, enerji yönetimi stratejilerinin etkinleştirilmesi ve kullanıcı deneyiminin iyileştirilmesi yoluyla EA ekosisteminin daha verimli ve sürdürülebilir hale gelmesine katkı sağlamaktadır [36]. EA'ların dünya çapında hızla yaygınlaşmasıyla birlikte, birçok araştırmacı EAŞİ'lerinin en uygun konumunu belirlemek için çeşitli yaklaşımlar önermiştir. Bu konudaki çalışmalarda ÇKKV yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır [34,37-40].

Bursa'da yaklaşık 400 elektrikli araç (EA) şarj istasyonu bulunmaktadır [35]. Büyük şehirlerde şarj istasyonlarının stratejik konumlandırılması, kullanıcı memnuniyeti ve sürdürülebilir enerji kullanımı açısından önemlidir. Bu doğrultuda, Bursa'daki istasyonların ÇKKV yöntemleri ile belirlenmesi, verimlilik ve sürdürülebilirlik açısından etkili bir yaklaşım sunmaktadır. Bu çalışmada, analiz edilen potansiyel şarj istasyonu konumları Şekil 6'te gösterilmiştir.



Şekil 6. Bursa'daki şarj cihazlarının konumları

2.3. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri

Hemen hemen tüm gerçek hayat problemlerinde sıklıkla kullanılan ÇKKV yöntemleri çok sayıda kriteri birlikte göz önünde bulundurarak değerlendirme yapma imkanı vermektedir. Seçeneklerin sıralanması veya probleme etki eden kriterlerin önem derecelerinin bulunması gereken hemen hemen her alanda ÇKKV yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde 200'e yakın ÇKKV yöntemi bulunmakta ve buna ger geçen gün yenileri eklenmektedir [41]. ÇKKV yöntemlerin aşamaları aşağıda Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Çok kriterli karar verme süreci [41]

Bu çalışmada kriterlerin ağırlıklandırılması aşamasında; her bir kriterin etkisini “çıkarılma etkisi” üzerinden değerlendirerek, kriterin gerçek katkısını doğrudan ölçtüğü için diğer istatistiksel yaklaşımlara göre daha doğal ve mantıksal bulunması nedeniyle güncel kriter ağırlıklandırma yöntemlerinden biri olan MEREC yöntemi tercih edilmiştir.

Seçeneklerin sıralanması işlemi için ise MAIRCA, MABAC, MOOSRA ve COPRAS yöntemleri tümleşik olarak kullanılmıştır. Bu yöntemler, farklı matematiksel yaklaşımlara dayanan güncel yöntemler olmaları

nedeniyle tercih edilmiştir. MAIRCA yöntemi, ideal ve gerçek performans arasındaki farkı minimize ederek dengeye dayalı bir sıralama yaklaşımı benimserken; MABAC yöntemi, alternatiflerin sınır alanına olan uzaklıklarını dikkate alarak uzaklık temelli bir değerlendirme yapar. MOOSRA yöntemi, fayda ve maliyet oranlarını esas alarak alternatiflerin nispi üstünlüklerini ortaya koyarken; COPRAS yöntemi, kriter ağırlıkları üzerinden oransal bir analiz gerçekleştirir. Bu çeşitlilik, farklı algoritmik yaklaşımların sonuçlar üzerindeki etkisini karşılaştırma imkânı sunduğundan, analizlerin tutarlılığı ve güvenilirliği açısından bu yöntemlerin birlikte kullanılması uygun görülmüştür.

2.3.1. MEREC Yöntemi

Keshavarz-Ghorabae ve arkadaşları tarafından 2021 yılında geliştirilen MEREC yönteminde; probleme etki eden kriterlerin önem derecelerini (ağırlıklarını) bulmak için her bir kriterin alternatiflerin toplam performansı üzerindeki kaldırılma etkisi dikkate alınarak hesaplamalar yapılır. Yöntem aşağıdaki adımlar takip ederek uygulanmaktadır [42,43].

1. Adım. Karar matrisi oluşturulması. Eşitlik (1)'de gösterilen (mxn) ebadındaki X karar matrisi oluşturulur. x_{ik} karar matrisinin elemanlarını, n alternatifleri, m ise kriterleri ifade eder.

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2. Adım. Karar matrisinin normalize edilmesi. Yönü maksimizasyon olan kriterler eşitlik (2) ve yönü minimizasyon olan kriterler eşitlik (3) kullanılarak normalize edilir.

$$n_{ij}^x = \frac{\min_k x_{kj}}{x_{ij}} \quad (2)$$

$$n_{ij}^x = \frac{x_{ij}}{\max_k x_{kj}} \quad (3)$$

3. Adım. Seçeneklerin genel performanslarının hesaplanması. S_i değerleri eşitlik (4)'de gösterilen logaritmik bir fonksiyon ile hesaplanır.

$$S_i = \ln(1 + \frac{1}{m} \sum_j |\ln(n_{ij}^x)|)) \quad (4)$$

4. Adım. Kriter çıkararak seçeneklerin performanslarının hesaplanması. Sırasıyla her bir kriter yok sayılarak Eşitlik (5) ile seçeneklerin performansları hesaplanır. m kriter sayısı kadar m performans seti hesaplanır. j kriterin kaldırıldığı i seçeneğin performansı S'_{ij} olarak gösterilir.

$$S'_{ij} = \ln(1 + (\frac{1}{m \sum_{k, k \neq j} |\ln(n_{ik}^x)|})) \quad (5)$$

5. Adım. Mutlak sapmaların hesaplanması. 3 ve 4. Adımdaki değere bağlı olarak eşitlik (6) ile j kriterin kaldırılma etkisi (E_j) hesaplanır.

$$E_j = \sum_i |S'_{ij} - S_i| \quad (6)$$

6. Adım. Kriterlerin nihai ağırlıklarının bulunması. Her bir kriterin nihai ağırlığı (w_j) Eşitlik (7) kullanılarak hesaplanır.

$$w_j = \frac{E_j}{\sum_k E_k} \quad (7)$$

2.3.2. MAIRCA Yöntemi

Gigovic ve arkadaşları tarafından geliştirilen MAIRCA yönteminin temeli, ideal ve ampirik derecelendirmeler arasındaki boşlukların tanımlanmasına dayanır. Her kriter için ayrı ayrı boşlukların toplanmasıyla, karar seçeneklerin toplam boşluğu bulunur. Toplam boşluk değerleri en küçükten en büyüğe doğru sıralanarak değeri en az olan seçenek, en iyi seçenek olarak belirlenir. MAIRCA yöntemi (8)-(18) numaralı eşitlikler kullanılarak uygulanır [44-46].

1. Adım: Karar matrisinin oluşturulması. X karar matrisi (8) numaralı eşitlik ile oluşturulur.

$$X^* = \begin{bmatrix} x_{11}^* & \dots & x_{1p}^* \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1}^* & \dots & x_{mn}^* \end{bmatrix} \quad (i = 1, \dots, m \text{ and } j = 1, \dots, n) \quad (8)$$

2. Adım Matrisin normalize edilmesi. X karar matrisi maksimizasyon yönlü kriterler için (9), minimizasyon yönlü kriterler için ise (10) numaralı eşitlik kullanılarak (11) numaralı eşitlikte gösterilen normalize matris elde edilir.

$$n_{ij} = \frac{x_{ij} - x_i^-}{x_i^+ - x_i^-} \quad (9)$$

$$n_{ij} = \frac{x_{ij} - x_i^+}{x_i^- - x_i^+} \quad (10)$$

$$N = \begin{bmatrix} n_{11} & \dots & n_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ n_{m1} & \dots & n_{mn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

3. Adım. Alternatiflerin seçilme olasılıklarının (P_i) belirlenmesi. (12) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$P_i = P_{i+1} = \dots = P_m = 1/m \quad (12)$$

4. Adım. Teorik değerlendirme matrisinin oluşturulması. (13) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$t_{ij} = P_i * w_{ij} \quad (13)$$

5. Adım. Reel değerlendirme matrisinin oluşturulması. (14) numaralı eşitlik ile (15) numaralı eşitlikte gösterilen R reel değerlendirme matrisi oluşturulur.

$$r_{ij} = t_{ij} * n_{ij} \quad (14) \quad R = \begin{bmatrix} t_{11}n_{11} & \dots & t_{1n}n_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{m1}n_{m1} & \dots & t_{mn}n_{mn} \end{bmatrix} \quad (15)$$

6. Adım. Toplam fark matrisinin oluşturulması. (16) numaralı eşitlik ile (17) numaralı eşitlikte gösterilen fark matrisi oluşturulur.

$$G = T - R \quad (16) \quad G = \begin{bmatrix} t_{11} - r_{11} & \dots & t_{1n} - r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{m1} - r_{m1} & \dots & t_{mn} - r_{mn} \end{bmatrix} \quad (17)$$

7. Adım. Alternatiflerin kriter fonksiyon değerlerinin hesaplanması. (18) numaralı eşitlik ile hesaplanır. Daha sonra Q_i değerleri küçükten büyüğe doğru sıralanarak seçenekler sıralanmış olur.

$$Q_i = \sum_j^n g_{ij} \quad (18)$$

2.3.3. MABAC Yöntemi

İngilizce açılımı “Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison” olan ve Pamučar ve Ćirović tarafından geliştirilen MABAC yöntemi, karar alternatiflerinin kriter fonksiyonlarına ilişkin değerlerinin, sınır yakınlık alanına olan uzaklıkları dikkate alınarak değerlendirilmesine dayanmaktadır. Bu yöntem, karar alternatiflerinin performansını daha dengeli bir biçimde ölçmeyi amaçlamakta olup, (19)-(27) numaralı eşitlikler kullanılarak altı adımda uygulanmaktadır [47,48].

1. Adım. Başlangıç matrisinin oluşturulması. (19) numaralı eşitlik ile X başlangıç matrisi oluşturulur.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \ddots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (19)$$

2. Adım. Başlangıç matrisi normalize edilir. Fayda yönlü kriterler (20) numaralı eşitlik ile maliyet yönlü olanlar ise (21) numaralı eşitlik ile normalize edilir.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (20) \quad r_{ij} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (21)$$

3. Adım. Normalize matris ağırlıklandırılır. (22) numaralı eşitlik ile ağırlıklandırma işlemi yapılır.

$$V_{ij} = W_j * (1 + r_{ij}) \quad (22)$$

4. Adım. Sınır yakınlık alanlarının belirlenmesi (23) numaralı eşitlik ile bulunur.

$$g_i = \left(\prod_{j=1}^m V_{ij} \right)^{1/m} \quad (23)$$

5. Adım. Seçeneklerin sınır yakınlık alanlarına uzaklıklarının hesaplanması. (24-26) numaralı eşitlikler ile hesaplanır.

$$G = [g_i]_{1 \times n} \quad (24)$$

$$Q = (v_i - G) = \begin{bmatrix} v_{11} - g_1 & v_{12} - g_2 & \cdots & v_{1n} - g_n \\ v_{21} - g_1 & v_{22} - g_2 & \cdots & v_{2n} - g_n \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ v_{m1} - g_1 & v_{m2} - g_2 & \cdots & v_{mn} - g_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & \cdots & q_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{m1} & q_{m2} & \cdots & q_{mn} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$A_i \in \begin{cases} G^+ & \text{eğer } q_{ij} > 0 \\ G & \text{eğer } q_{ij} = 0 \\ G^- & \text{eğer } q_{ij} < 0 \end{cases} \quad (26)$$

6. Adım. Alternatiflerin sıralanması. (27) numaralı eşitlik ile nihai sıralama elde edilir. Daha sonra S_i değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanarak seçenekler sıralanmış olur.

$$S_i = \sum_{j=1}^n q_{ij} \quad (27)$$

2.3.4. MOOSRA Yöntemi

İngilizce açılımı “Multi-Objective Optimization Based on Simple Ratio Analysis” olan MOOSRA yöntemi, 2012 yılında Das ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem; kısa hesaplama süresi, az sayıda

matematiksel işlem gerektirmesi, yüksek güvenilirliği ve uygulanma kolaylığı nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir. MOOSRA yöntemi, (28)-(31) numaralı eşitlikler kullanılarak beş adımda uygulanmaktadır [49-51].

1. Adım. Başlangıç matrisinin oluşturulması. X^* başlangıç matrisi (28) numaralı eşitlik ile ifade edilir.

$$X^* = \begin{bmatrix} x_{11}^* & \dots & x_{1p}^* \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1}^* & \dots & x_{mn}^* \end{bmatrix} \quad (i = 1, \dots, m \text{ ve } j = 1, \dots, n) \quad (28)$$

2. Adım. Başlangıç matrisi normalize edilmesi. Normalizasyon için (29) numaralı eşitlik kullanılır.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2} \quad (29)$$

3. Adım. Normalize edilmiş matris ağırlıklandırılması. Ağırlıklandırma işlemi (30) numaralı eşitlik ile yapılır.

$$a_{ij} = x_{ij}^* \cdot w_j \quad (30)$$

4. Adım. Fayda maliyet oranları bulunması. Fayda yönlü kriterlerin değerler toplamı maliyet yönlü kriterlerin değerler toplamına eşitlik (31) kullanılarak bölünür.

$$Y_i = \frac{\sum_j^g x_{ij}^* \cdot w_j}{\sum_{j'=g+1}^n x_{ij'}^* \cdot w_j} \quad (31)$$

$j = 1, 2, \dots, g$ fayda yönlüler için, $j' = g + 1, g + 2, \dots, n$ maliyet yönlüler için

5. Adım. Seçenekler sıralanması. Y_i değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanarak seçenekler sıralanmış olur.

2.3.5. COPRAS Yöntemi

İngilizce açılımı “The Complex Proportional Assesment” olan COPRAS yöntemi, Zavadskas ve Kaklauskas tarafından 1996 yılında geliştirilmiştir. Bu yöntem, kriterlerin fayda ve maliyet odaklı amaçlarını dikkate alarak alternatifleri değerlendirir. COPRAS’ın en önemli avantajı, alternatifleri karşılaştırarak bunların birbirlerine göre hangi oranda daha iyi ya da daha kötü olduğunu oransal olarak ortaya koyabilmesidir. Diğer Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerine kıyasla daha az işlem gerektirmesi ve daha basit formüller kullanması, yöntemin uygulanabilirliğini artırmaktadır. COPRAS yöntemi, (32)-(38) numaralı eşitlikler kullanılarak altı adımda uygulanmaktadır [52-54].

1. Adım. Başlangıç matrisinin oluşturulması. X başlangıç matrisi eşitlik (32) ile ifade edilir.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \ddots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (32)$$

2. Adım. Başlangıç matrisinin normalize edilmesi. Başlangıç matrisi (33) numaralı eşitlik ile normalize edilir.

$$X_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (33)$$

3. Adım. Normalize edilmiş matrisin ağırlıklandırılması. Normalize edilmiş matris (34) numaralı eşitlik ile ağırlıklandırılır.

$$r_{ij} = x_{ij}^* w_j \quad (34)$$

4. Adım. Fayda ve maliyet ölçütlerinin hesaplanması. Fayda ölçütü (35), maliyet ölçütü ise (36) numaralı eşitlik ile hesaplanır.

$$S_i^+ = \sum_{j=1}^k r_{ij} \quad (35)$$

$$S_i^- = \sum_{j=k+1}^m r_{ij} \quad (36)$$

5. Adım. Göreli önem derecelerinin belirlenmesi. Q_i göreli önem dereceleri eşitlik (37) ile bulunur.

$$Q_i = S_i^+ + \frac{\sum_{i=1}^m S_i^-}{S_i^- \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{S_i^-} \right)} \quad (37)$$

6. Adım. Göreli önem derecelerinin en büyüğünün belirlenmesi ve seçeneklerin performans indekslerinin hesaplanması. Performans indeksleri eşitlik (38) ile hesaplanır. Daha sonra P_i değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanarak seçenekler sıralanmış olur.

$$P_i = \left(\frac{Q_i}{Q_{max}} \right) * 100 \quad (38)$$

2.3.6. BORDA Yöntemi

Borda yöntemi, 1784 yılında Borda tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem, birden fazla analiz yönteminden elde edilen sıralamaların birleştirilerek tek bir nihai sıralama oluşturulmasını sağlar [55]. Borda Kuralı'na göre, en yüksek değere sahip alternatif (n-1) puan verilirken, en düşük değere sahip alternatif 0 puan verilmektedir [56]. Borda kuralı ile her bir Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yönteminden elde edilen sonuçlar puanlanmakta; ardından elde edilen Borda skorlarının eşitlik (39) ile toplanmasıyla alternatiflerin toplam puanları hesaplanmaktadır. Son olarak, bu değerler büyükten küçüğe doğru sıralanarak alternatiflerin nihai sıralaması belirlenmektedir [32].

$$B_i = \sum_{k=1}^r m - a_{ik} \quad (39)$$

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışmada EAŞİ konumları, Bursa ilinde EA araç kullanıcılarının yoğun olduğu bölgeler, ticaret ve sanayi alanları, üniversiteler, oteller, AVM'ler ve dinlenme tesisleri gibi potansiyel noktalar dikkate alınarak belirlenmiştir. Konumların belirlenmesinde ve değerlendirilmesinde bu konuda uzman mühendislerin görüşlerine başvurulmuştur. Togg fabrikasında çalışan EA konusunda uzman personel ile yapılan görüşmeler sonucunda EA şarj istasyonlarının konumlarının belirlenmesine etki eden 8 parametre tespit edilmiştir. Muhtemel EAİŞ kuruluş yerlerin belirlenmesine etki eden faktörler ve kodları [46];

- i. Kurulum maliyeti (K_1),
- ii. Araç yoğunluğu (K_2),
- iii. Erişilebilirlik (K_3),
- iv. Müşteri tercihi (K_4),
- v. Elektrik altyapı uygunluğu (K_5),
- vi. Yıllık operasyon ve bakım maliyeti (K_6),
- vii. Yasal düzenlemeler ve izinler (K_7),
- viii. Yakın çevredeki şarj istasyonları (K_8) olarak belirlenmiştir.

Bu bağlamda Bursa ili özelinde EAŞİ kurulabilecek 21 nokta belirlenmiştir. Belirlenen bu noktalar aşağıda Çizelge 2’de gösterilmiştir [46].

Çizelge 2. Bursa ilinde muhtemel EAŞİ kuruluş yerleri

S. no	Muhtemel EAŞİ kuruluş yerleri	S. no	Muhtemel EAŞİ kuruluş yerleri
1	Ankara-İzmir yolu benzin istasyonu	12	Uludağ oteller bölgesi
2	Yalova-İstanbul yolu benzin istasyonu	13	Hilton otel
3	İstanbul İzmir otobanı Bursa tesisleri	14	Almira otel
4	Korupark AVM	15	Kervansaray otel
5	Suryapı AVM	16	Kültürpark
6	Anatolium AVM	17	Bursaspor stadı
7	Özdilek park AVM	18	Organize sanayi bölgesi
8	Kent meydanı AVM	19	Nilüfer sanayi bölgesi
9	Uludağ Üniversitesi	20	Demirtaş sanayi bölgesi
10	Bursa Teknik Üniversitesi	21	Heykel tarihi Bursa alanı
11	Mudanya Üniversitesi		

EAŞİ kurulacak konumlar belirlendikten sonra EA projesinde çalışan mühendisler tarafından yapılan değerlendirmelere göre çizelgeler doldurulmuştur. İlk aşamada MEREC yöntemi ile ağırlıklar bulunmuş, daha sonra MAİRCA yöntemi ile kuruluş yerleri en uygun olandan itibaren sıralanmıştır. Mühendislerin Çizelge 3’de belirtilen 1-9 dilsel ölçeği kullanarak doldurulan başlangıç matrisi Çizelge 4’de gösterilmiştir.

Çizelge 3. Uzmanların kullandığı dilsel ölçek [57]

Değer	Açıklama
1	Çok düşük
3	Düşük
5	Normal
7	Yüksek
9	Çok yüksek

Çizelge 4. Başlangıç matrisi

Şarj istasyonu konumu	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆	K ₇	K ₈
kriter yönü	max	max	max	max	min	min	min	min
Ankara-İzmir yolu benzin istasyonu	9	9	5	9	7	5	5	9
Yalova-İstanbul yolu benzin istasyonu	9	9	5	9	7	5	5	9
İstanbul İzmir otobanı Bursa tesisleri	9	9	9	9	7	5	5	9
Korupark AVM	9	9	9	5	7	5	7	9
Suryapı AVM	9	9	9	5	7	5	7	7
Anatolium AVM	7	9	9	5	7	5	7	9
Özdilek park AVM	7	9	9	5	7	5	7	5
Kent meydanı AVM	9	9	9	5	7	5	7	9
Uludağ Üniversitesi	7	9	7	5	7	5	7	1
Bursa Teknik Üniversitesi	5	9	7	5	7	5	7	1
Mudanya Üniversitesi	5	9	7	5	7	5	7	1
Uludağ oteller bölgesi	7	5	7	3	9	5	9	1
Hilton otel	7	9	5	5	7	5	9	1
Almira otel	7	9	5	5	7	5	9	7
Kervansaray otel	7	9	5	5	7	5	9	1
Kültürpark	7	9	7	5	7	5	7	3
Bursaspor stadı	5	9	7	5	7	5	7	1
Organize sanayi bölgesi	9	9	9	9	7	5	7	1
Nilüfer sanayi bölgesi	9	9	9	9	7	5	7	1
Demirtaş sanayi bölgesi	9	9	9	9	7	5	7	1
Heykel tarihi Bursa alanı	9	9	9	5	7	5	5	7

3.1. MEREC Yöntemi ile EAŞİ Yeri Seçimine Etki Eden Kriterlerin Ağırlıklandırılması

Çizelge 4’de puanlanan konumların MEREC yöntemi ile kriter ağırlıkları hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda başlangıç matrisi doğrusal orantı yöntemi ile normalize edilmiştir. Daha sonra MEREC yönteminde (1)-(7) numaralı eşitlikler kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda EAŞİ konumu seçim kriterlerinin ağırlıkları aşağıda Çizelge 5’te gösterildiği gibi ortaya çıkmıştır.

Çizelge 5. EAŞİ kuruluş yeri seçim kriterleri ve ağırlıkları

Kriterler	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆	K ₇	K ₈
Ağırlıklar	0,0905	0,1242	0,1750	0,1430	0,0495	0,0968	0,0587	0,2623

Çizelge 5’da görüldüğü gibi en önemli üç kriter sırasıyla “K₈: Yakın çevredeki şarj istasyonları”, “K₃: Erişilebilirlik” ve “K₄: Müşteri tercihi” olarak belirlenmiştir.

3.2. MEREC Yöntemi ile EAŞİ Yeri Seçimine Etki Eden Kriterlerin Ağırlıklandırılması

Kuruluş yerim seçim kriterlerinin ağırlıkları hesaplandıktan sonra MAIRCA yöntemi ile (8)-(18) numaralı eşitlikler kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda her bir EA Şarj istasyonu kuruluş yerinin aldığı puan ve sıralaması aşağıda Çizelge 6’da gösterilmiştir.

Çizelge 6. Şarj istasyonu konumlarının MAIRCA puanı ve sıralaması

Muhtemel EAŞİ kuruluş yerleri	Puanı	Sıra	Muhtemel EAŞİ kuruluş yerleri	Puanı	Sıra
Ankara-İzmir yolu benzin istasyonu	0,003669	10	Uludağ oteller bölgesi	0,05284	13
Yalova-İstanbul yolu benzin istasyonu	0,003669	10	Hilton otel	0,05284	8
İstanbul İzmir otopanı Bursa tesisleri	0,003669	2	Almira otel	0,054422	14
Korupark AVM	0,032784	9	Kervansaray otel	0,054422	8
Suryapı AVM	0,038231	6	Kültürpark	0,054664	7
Anatolium AVM	0,043683	12	Bursaspor stadı	0,054664	5
Özdilek park AVM	0,043884	4	Organize sanayi bölgesi	0,054794	1
Kent meydanı AVM	0,043884	9	Nilüfer sanayi bölgesi	0,060075	1
Uludağ Üniversitesi	0,043884	3	Demirtaş sanayi bölgesi	0,075623	1
Bursa Teknik Üniversitesi	0,046226	5	Heykel tarihi Bursa alanı	0,077428	11
Mudanya Üniversitesi	0,046427	5			

3.3. MABAC Yöntemi ile EAŞİ Kuruluş Yerlerinin Sıralanması

MABAC yöntemi ile (19)-(27) numaralı eşitlikler kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda her bir EA Şarj istasyonu kuruluş yerinin aldığı puan ve sıralaması aşağıda Çizelge 7’de gösterilmiştir

Çizelge 7. Şarj istasyonu konumlarının MABAC puanı ve sıralaması

Muhtemel EAŞİ kuruluş yerleri	Puanı	Sıra	Muhtemel EAŞİ kuruluş yerleri	Puanı	Sıra
Muhtemel EAŞİ kuruluş yerleri	-0,0339	12	Uludağ oteller bölgesi	-0,2016	15
Ankara-İzmir yolu benzin istasyonu	-0,0339	12	Hilton otel	-0,0193	8
Yalova-İstanbul yolu benzin istasyonu	0,1411	2	Almira otel	-0,2160	16
İstanbul İzmir otopanı Bursa tesisleri	-0,0320	10	Kervansaray otel	-0,0193	9
Korupark AVM	0,0336	6	Kültürpark	0,0320	7
Suryapı AVM	-0,0772	14	Bursaspor stadı	0,0523	5
Anatolium AVM	0,0539	4	Organize sanayi bölgesi	0,3740	1
Özdilek park AVM	-0,0320	11	Nilüfer sanayi bölgesi	0,3740	1
Kent meydanı AVM	0,0975	3	Demirtaş sanayi bölgesi	0,3740	1
Uludağ Üniversitesi	0,0523	5	Heykel tarihi Bursa alanı	-0,0350	13
Bursa Teknik Üniversitesi	0,0523	5			

3.4. MOOSRA Yöntemi ile EAŞİ Kuruluş Yerlerinin Sıralanması

MOOSRA yöntemi ile (28)-(31) numaralı eşitlikler kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda her bir EA Şarj istasyonu kuruluş yerinin aldığı puan ve sıralaması aşağıda Çizelge 8’de gösterilmiştir

Çizelge 8. Şarj istasyonu konumlarının MOOSRA puanı ve sıralaması

Muhtemel EAŞİ kuruluş yerleri	Puanı	Sıra	Muhtemel EAŞİ kuruluş yerleri	Puanı	Sıra
Ankara-İzmir yolu benzin istasyonu	0,9683	10	Uludağ oteller bölgesi	1,1687	7
Yalova-İstanbul yolu benzin istasyonu	0,9683	10	Hilton otel	1,6092	4
İstanbul İzmir otobanı Bursa tesisleri	1,1300	8	Almira otel	0,7942	14
Korupark AVM	0,8816	12	Kervansaray otel	1,6092	4
Suryapı AVM	1,0351	9	Kültürpark	1,3886	5
Anatolium AVM	0,8444	13	Bursaspor stadı	1,8030	3
Özdilek park AVM	1,2003	6	Organize sanayi bölgesi	3,0032	1
Kent meydanı AVM	0,8816	12	Nilüfer sanayi bölgesi	3,0032	1
Uludağ Üniversitesi	1,8945	2	Demirtaş sanayi bölgesi	3,0032	1
Bursa Teknik Üniversitesi	1,8030	3	Heykel tarihi Bursa alanı	0,9662	11
Mudanya Üniversitesi	1,8030	3			

3.5. COPRAS Yöntemi ile EAŞİ Kuruluş Yerlerinin Sıralanması

COPRAS yöntemi ile (32)-(38) numaralı eşitlikler kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda her bir EA Şarj istasyonu kuruluş yerinin aldığı puan ve sıralaması aşağıda Çizelge 9’da gösterilmiştir

Çizelge 9. Şarj istasyonu konumlarının COPRAS puanı ve sıralaması

Muhtemel EAŞİ kuruluş yerleri	Puanı	Sıra	Muhtemel EAŞİ kuruluş yerleri	Puanı	Sıra
Ankara-İzmir yolu benzin istasyonu	57,40239	11	Uludağ oteller bölgesi	63,19794	7
Yalova-İstanbul yolu benzin istasyonu	57,40239	11	Hilton otel	74,15745	4
İstanbul İzmir otobanı Bursa tesisleri	63,94603	6	Almira otel	50,3513	14
Korupark AVM	55,91233	12	Kervansaray otel	74,15745	4
Suryapı AVM	59,05985	9	Kültürpark	66,17968	5
Anatolium AVM	54,26364	13	Bursaspor stadı	78,44802	3
Özdilek park AVM	62,02706	8	Organize sanayi bölgesi	100	1
Kent meydanı AVM	55,91233	12	Nilüfer sanayi bölgesi	100	1
Uludağ Üniversitesi	80,09672	2	Demirtaş sanayi bölgesi	100	1
Bursa Teknik Üniversitesi	78,44802	3	Heykel tarihi Bursa alanı	57,90242	10
Mudanya Üniversitesi	78,44802	3			

3.6. Borda Yöntemi ile Sonuçların Birleştirilmesi

EAŞİ istasyonu konumlarının dört farklı ÇKKV yöntemiyle yapılan sıralama sonuçları Borda kuralı ile birleştirilmiştir. Öncelikle eşitlik (39) ile her bir yöntemin borda değeri bulunmuştur. Daha sonra bu değerler toplanarak seçeneklerin toplam borda değeri bulunmuş ve nihai sıralama yapılmıştır. Yapılan bu işlemlerin sonucu Çizelge 10’da gösterilmiştir.

Çizelge 10. ÇKKV yöntemlerinin sonuçlarının Borda kuralı ile birleştirilmesi

EA Şarj istasyon konumu	MAIRCA	Borda değeri	MABAC	Borda değeri	MOOSRA	Borda değeri	COPRAS	Borda değeri	Toplam Borda değeri	Nihai Borda sıralaması
Ankara-İzmir yolu benzin istasyonu	10	4	12	4	10	4	11	3	15	10
Yalova-İstanbul yolu benzin istasyonu	10	4	12	4	10	4	11	3	15	10
İstanbul İzmir otobanı Bursa tesisleri	2	12	2	14	8	6	6	8	40	4
Korupark AVM	9	5	10	6	12	2	12	2	15	10
Suryapı AVM	6	8	6	10	9	5	9	5	28	8
Anatolium AVM	12	2	14	2	13	1	13	1	6	13
Özdilek park AVM	4	10	4	12	6	8	8	6	36	5
Kent meydanı AVM	9	5	11	5	12	2	12	2	14	11
Uludağ Üniversitesi	3	11	3	13	2	12	2	12	48	2
Bursa Teknik Üniversitesi	5	9	5	11	3	11	3	11	42	3

Çizelge 10. Devamı

Mudanya Üniversitesi	5	9	5	11	3	11	3	11	42	3
Uludağ Oteller Bölgesi	13	1	15	1	7	7	7	7	16	9
Hilton Otel	8	6	8	8	4	10	4	10	34	6
Almira Otel	14	0	16	0	14	0	14	0	0	14
Kervansaray Otel	8	6	9	7	4	10	4	10	33	7
Kültürpark	7	7	7	9	5	9	5	9	34	6
Bursaspor Stadi	5	9	5	11	3	11	3	11	42	3
Organize Sanayi Bölgesi	1	13	1	15	1	13	1	13	54	1
Nilüfer Sanayi Bölgesi	1	13	1	15	1	13	1	13	54	1
Demirtaş Sanayi Bölgesi	1	13	1	15	1	13	1	13	54	1
Heykel Tarihi Bursa Alanı	11	3	13	3	11	3	10	4	13	12

Farklı ÇKKV yöntemleri ile yapılan hesaplamalar sonucunda Çizelge 10'da görüldüğü gibi Bursa İlinde optimum EAŞİ konumu “Organize Sanayi Bölgesi”, “Nilüfer Sanayi Bölgesi” ve “Demirtaş Sanayi Bölgesi”, en uygun olmayan lokasyon ise “Almira Otel” olarak ortaya çıkmıştır. Farklı matematiksel mantığa bağlı dört değişik ÇKKV yöntemi ile elde edilen sonuçlar ve Borda kuralı ile elde edilen nihai sonucun birbirini doğruladığı görülmektedir. Organize sanayi bölgelerinin altyapı ve servis özelliklerinin yüksek olması ve başta otomotiv sanayi olmak üzere sanayi çalışanlarının yoğun EA kullanımı bu tespiti ayrıca doğrular niteliktedir. Çalışmada tüm hesaplamalar Microsoft Excel kullanılarak yapılmıştır.

4. SONUÇLAR

EA'ların yaygınlaşması, Türkiye'nin enerji bağımlılığını azaltması ve karbon salınımını düşürmesi açısından önemli bir fırsat sunmaktadır. Bu bağlamda, şarj altyapısının etkin planlanması, kullanıcıların sürdürülebilir bir ulaşım deneyimi yaşamasını sağlayacaktır. Bu çalışma, EAŞİ'lerin konumlandırılmasında karar destek sistemlerinin kullanımına odaklanmış olup, Bursa ili özelinde önemli bulgular sunmaktadır. Bursa, sanayi ve ticaret alanındaki stratejik konumu nedeniyle şarj altyapısının geliştirilmesi gereken kritik şehirlerden biridir. Elektrikli araç kullanımının artmasına paralel olarak, mevcut istasyonların sayısı ve dağılımının etkin bir planlamaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Araştırmada, Bursa ili özelinde EAŞİ konumlandırılmasına odaklanılmıştır. Çalışma, yalnızca kent merkezindeki belirli bölgelerle sınırlandırılmış olup, kırsal alanlar kapsam dışı bırakılmıştır. Ana ulaşım güzergâhları, dinlenme tesisleri, alışveriş merkezleri, üniversiteler, turistik ve konaklama alanları, sanayi bölgeleri ve tarihi merkezler gibi stratejik noktalar; mevcut şarj istasyonları, trafik yoğunluğu, nüfus dağılımı ve enerji altyapısının uygunluğu gibi faktörler göz önünde bulundurularak aşağıda belirtilen varsayımlara göre değerlendirilmiştir. Bu kapsamda;

- EAŞİ'lerin doğru konumlandırılmasının sürdürülebilir enerji kullanımını artıracığı,
- Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinin uygun istasyon yerlerinin belirlenmesinde etkili olduğu,
- Kullanıcı yoğunluğunun fazla olduğu bölgelerde şarj istasyonlarının konumlandırılmasının memnuniyeti artıracığı,
- Yeterli sayıda istasyonun EA kullanımının yaygınlaşmasını destekleyeceği değerlendirilmektedir.

Araştırmada kullanılan ÇKKV yöntemleri, nesnel ve sistematik karar mekanizmaları sağlayarak en uygun istasyon konumlarını belirlemede etkili olmuştur. EAŞİ'lerin stratejik konumlandırılması, enerji verimliliğini artırmanın yanı sıra kullanıcı memnuniyetini de yükseltmektedir. Bursa gibi hızla büyüyen şehirlerde bu altyapının planlanması, sürdürülebilir şehircilik hedeflerine ulaşmak açısından kritik bir gerekliliktir. Araştırma sonucunda ulaşılan başlıca bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- ÇKKV yöntemleri, EAŞİ konumlandırılmasında nesnel ve sistematik bir yaklaşım sunmuş, EAŞİ yeri seçimine etki eden kriterlerin önceliklendirilmesine olanak tanımıştır.
- Yakın çevredeki şarj istasyonları, erişilebilirlik ve müşteri tercihi en etkili faktörler olarak belirlenmiştir. Araç yoğunluğu ve yıllık operasyon ve bakım maliyeti de kritik rol oynamaktadır.

- iii. Değerlendirilen 21 konum arasında organize sanayi bölgelerinin (İlk üç sıralama: Organize Sanayi Bölgesi, Nilüfer Sanayi Bölgesi, Demirtaş Sanayi Bölgesi) ve altyapısı uygun alanlarının öne çıktığı görülmüştür.
- iv. Şehrin sanayi ve ticaret merkezi olması, EA kullanımını artırmaktadır. Mevcut şarj altyapısının güçlendirilmesi, enerji verimliliği ve sürdürülebilir ulaşım hedefleri için önem taşımaktadır.
- v. Farklı ÇKKV yöntemleri ile yapılan değerlendirme ile Borda Kuralı ile yapılan birleştirilmiş değerlendirmenin sonuçların aynı çıkması sonuçların güvenilirliğini ve tutarlılığını doğrulamaktadır.

Sonuç olarak bu çalışma, Bursa ili özelinde gerçekleştirilmiş olup, benzer yöntemlerle diğer şehirlerde de uygulanarak EA altyapısının gelişimine katkı sağlanabilir. Değişik ÇKKV yöntemleri ile kriter ağırlıklarının belirleme açısından tekrar yapılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir ve kriterlerde yapılacak değişikliklerin sonuca etkileri duyarlılık analizi ile tespit edilebilir.

5. KAYNAKLAR

1. Kirsch, D.A. (2000). The electric vehicle and the burden of history. *Rutgers University Press*.
2. Larminie, J. & Lowry, J. (2012). Electric vehicle technology explained. *John Wiley & Sons*.
3. Puiboube, D. (2000), Un siècle d'automobile en France. *Paris: ETAL.*, 28.
4. Kerem, A. (2014). Elektrikli araç teknolojisinin gelişimi ve gelecek beklentileri. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(1), 1-13.
5. Leitman, S. & Brant, B. (2008). Build your own electric vehicle. *The McGraw-Hill Companies Second Edition*.
6. Stoops, L. (2022). *How the 1970s oil crisis paved the way for the first EVs*. <https://qmerit.com/blog/>, Access date: 12 Mart 2025.
7. Mom, G. (2004). The electric vehicle: technology and expectations in the automobile age. *Johns Hopkins University Press*.
8. Chan, C.C. (2007). The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 704-718.
9. European Commission, (2021). *Fit for 55: Delivering the EU's 2030 climate target on the way to climate neutrality*. <https://www.eesc.europa.eu/en/our-work/opinions-information-reports/opinions>. Access date: 5 Ocak 2025.
10. T.C. Ticaret Bakanlığı, (2025). *Çin elektrikli araç sektöründe dönüşüm: küresel eğilimler ve bölgesel dinamikler*. <https://ticaret.gov.tr/data/63db95d713b876d06090b612>, Access date: 22 Şubat 2025
11. Togg, (2025). <https://www.togg.com.tr/>, Access date: 18 Şubat 2025.
12. Çakmak, R. ve Turan, A. (2022). Türkiye'de iller bazında elektrikli araç şarj istasyonu altyapısı: ölçekler aracılığıyla analizi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12(1), 246-268.
13. Albatayneh, A., Assaf, M.N., Alterman, D. & Jaradat, M. (2020). Comparison of the overall energy efficiency for internal combustion engine vehicles and electric vehicles. *Rigas Tehniskas Universitates Zinatniskie Raksti*, 24(1), 669-680.
14. Karaşan, A., Kaya, I. & Erdoğan, M. (2020). Location selection of electric vehicles charging stations by using a fuzzy MCDM method: a case study in Turkey. *Neural Computing and Applications*, 32, 4553-4574.
15. Öter, A. ve Baltacı, F. (2022). Elektrikli araçlar için akıllı hibrit şarj istasyonu örneği. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1), 160-175.
16. Kalan, O. (2024). Analitik hiyerarşi prosesi ile Mersin-Gaziantep yüksek hızlı tren hattı için istasyon yeri seçimi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(1), 31-45.
17. Ahmad, F., Iqbal, A., Ashraf, I., Marzband, M. & Khan, I. (2022). Optimal location of electric vehicle charging station and its impact on distribution network: A review. *Energy Reports*, 8, 2314-2333.
18. Pandey, A., Singh, S.K., Srivastava, H.K. & Pandey, S. (2025). Factors causing electric vehicles adoption in India: a regression and sentiment analysis approach. *International Journal of Energy Sector Management*, 07, 2024-0048
19. Çiçek, A. ve Erdinç, O. (2019). PV-batarya hibrit sistemi içeren elektrikli araç otoparkının şarj yönetimi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 15, 466-474.
20. Güler, A. & Polatgil, M. (2024). Investigation of the effect of expert's opinions on multi-criteria decision-making techniques in electric vehicle selection. *European Transport*, 99, 1-17.

21. Iravani, H. (2022). A multicriteria GIS-based decision-making approach for locating electric vehicle charging stations. *Transportation Engineering*, 9, 100135.
22. Durmuş, F.S. ve Kaymaz, H. (2020). Elektrikli araç şarj yöntemleri. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 3(2), 123-139.
23. Dhingra, A., Jareda, A., Choudhary, H. & Agrawal, S. (2020). Selection of optimal electric vehicle charging station location using AHP-fuzzy TOPSIS approach. In *Proceedings of the 2nd International Conference on ICT for Digital, Smart, and Sustainable Development, ICIDSSD*.
24. Özüpak, Y. (2022). Elektrikli araçların kablosuz güç transferi sistemi için dairesel bobinli bir transformatörün tasarımı ve veriminin analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(1), 209-219.
25. Almasoudi, F.M., Bakeer, A., Magdy, G., Alatawi, K.S.S., Shabib, G., Lakhout, A. & Alomrani, S.E. (2024). Nonlinear coordination strategy between renewable energy sources and fuel cells for frequency regulation of hybrid power systems. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(2), 102399.
26. Abdulvahitoğlu, A., Abdulvahitoğlu, A. ve Kılıç, M. (2022). Elektrikli araç bataryalarının bütünleşik SWARA-TOPSIS metodu ile değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(4), 1061-1076.
27. Güven, E.C. ve Gedik, K. (2019). Ömrünü tamamlamış elektrikli araç bataryalarının çevresel yönetimi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 9(2), 726-737.
28. Üçtuğ, F.G. (2022). Türkiye’de üretilen elektrikli ve içten yanmalı motorlu araçların karşılaştırmalı çevresel yaşam döngüsü değerlendirmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(4), 1701-1714.
29. Harshil, B. & Nagababu, G. (2023) Strategies and models for optimal EV charging station site selection. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 1372(1), 012106.
30. Bakioğlu, G. (2024). Yeşil araç rotalama problemlerinin entegre pisagor bulanık AHP ve EDAS yöntemleri ile analizi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 12(4), 864-881.
31. Erdoğan, B., Tan, A. ve Tümay, M. (2024). Elektrikli araçlarda kullanılan batarya şarj uygulamaları için genetik algoritma ile geliştirilmiş bir rezonans dönüştürücü tasarımı. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(4), 1129-1142.
32. Abdulvahitoğlu, A., Abdulvahitoğlu, A. & Cengiz, N. (2024). A comprehensive analysis of apricot drying methods via multi-criteria decision-making techniques. *J. Food Process Eng.*, 47, e14759.
33. Türkiye İstatistik Kurumu, (2025). *Türkiye’de trafiğe kayıtlı araçlar*. <https://www.tuik.gov.tr>, Access date: 6 Şubat 2025.
34. Krishankumar, R. & Ecer, F. (2024). A multi-criteria framework for electric vehicle charging location selection using double hierarchy preferences and unknown weights. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 133, 108251.
35. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, (2024). *Elektrikli araç şarj istasyonları hakkında düzenlemeler*. <https://www.epdk.gov.tr>, Access date: 4 Şubat 2025.
36. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), (2024). *Elektrikli araçların global durumu ve Türkiye’nin elektrikli araç girişimlerine katkısı*. <https://www.iea.org>, Access date: 14 Şubat 2025.
37. Zhang, Y., Liu, X., Zhang, T. & Gu, Z. (2019). Review of the electric vehicle charging station location problem. *International Conference on Dependability in Sensor, Cloud, and Big Data Systems and Applications*. Springer, Singapore, 435-445.
38. Alegre, S., Míguez, J.V. & Carpio, J. (2017). Modeling of electric and parallel-hybrid electric vehicles using Matlab/Simulink environment and planning of charging stations through a geographic information system and genetic algorithms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 1020-1027.
39. Genevois, M.E. & Kocaman, H. (2018). Locating electric vehicle charging stations in Istanbul with AHP based mathematical modelling. *International Journal of Transportation Systems*, 3.
40. Kumar, P. & Channi, H.K. (2024). Optimal electric vehicle charging station placement: a multi-criteria decision-making approach for site selection. In *2024 International Conference on Integrated Circuits and Communication Systems (ICICACS)*, 1-6.
41. Cengiz, N., Abdulvahitoğlu, A. & Abdulvahitoğlu, A. (2025). Comparative analysis of different drying methods on strawberry aroma compounds via multi-criteria decision-making techniques. *Applied Sciences*, 15(815), 2-28.
42. Keshavarz-Ghorabae, M., Amiri, M., Zavadskas, E.K., Turskis, Z. & Antucheviciene, J. (2021). Determination of objective weights using a new method based on the removal effects of criteria (MEREC). *Symmetry*, 13(4), 525

43. Ulutaş, A., Stanujkic, D., Karabasevic, D., Popovic, G. & Novakovic, S. (2022). Pallet truck selection with MEREC and WISP-S methods. *Strategic Management*, 27(4), 23-29
44. Gigović, L., Pamučar, D., Bajić, Z. & Milićević, M. (2016). The combination of expert judgment and GIS-MAIRCA analysis for the selection of sites for ammunition depots. *Sustainability*, 8(4), 1-30.
45. Rani, P., Chen, S.M. & Mishra, A.R. (2023). Multiple attribute decision making based on MAIRCA, standard deviation-based method, and Pythagorean fuzzy sets. *Information Sciences*, 644, 119274.
46. Arslan Z. (2025). Elektrikli araç şarj istasyonları konum seçimi için karar destek sistemi Bursa örneği. *Yayımlanmamış tezsiz yüksek lisans projesi*. Mudanya Üniversitesi Endüstri Mühendisliği ABD, Bursa.
47. Pamučar, D. & Ćirović, G. (2015). The selection of transport and handling resources in logistics centers using multi-attributive border approximation area comparison (MABAC). *Expert Systems with Applications*, 42(6), 3016-3028.
48. Stojanović, I. & Puška, A. (2021). Logistics performances of gulf cooperation council's countries in global supply chains, decision making. *Applications in Management and Engineering*, 4(1), 174-193.
49. Taşcı, M.Z. (2024). Allianz sigorta şirketinin performansının LOPCOW-MOOSRA karar modeliyle analizi. *Social Sciences Studies Journal*, 8(104), 3963-3970.
50. Keleş, N. (2023). Türkiye'nin 81 ilinin sağlık performansının güncel karar verme yöntemleriyle değerlendirilmesi. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, (75), 120-141.
51. Demircioğlu, M. ve Çoskun, İ.T. (2018). CRITIC-MOOSRA yöntemi ve UPS seçimi üzerine bir uygulama. *Ç.Ü. Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 27(1), 183-195.
52. Özbek, A. (2017). İlkokul öğretmenleri sağlık ve sosyal yardım sandığının finansal performans analizi. *Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 7(1), 1-31.
53. Hezam İ.M., Mishra, A.R., Rani, P., Saha, A., Smarandache, F. & Pamucar, D. (2023). An integrated decision support framework using single-valued neutrosophic-MASWIP-COPRAS for sustainability assessment of bioenergy. *Expert Systems with Applications*, 211, 118674.
54. Hezer, S., Gelmez, E. & Özceylan, E. (2021) Comparative analysis of TOPSIS, VIKOR and COPRAS methods for the COVID-19 regional safety assessment. *Journal of Infection and Public Health*, 14(6), 775-786.
55. Akyüz, G. ve Aka, S. (2017). Çok kriterli karar verme teknikleriyle tedarikçi performansı değerlendirmede toplamsal bir yaklaşım. *Yönetim ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 15(2), 28-46.
56. Hacıfettahoğlu, Ö. ve Pereçin, S. (2020). Bütünleşik ÇKKV yaklaşımı ile finansal boyutta Türk inşaat firmalarının performansının değerlendirilmesi. *Dokuz Eylül Üni., Sos.Bil.Ens.Der.* 22(2), 543-567.
57. Cengiz, N. ve Abdulvahitoğlu, A. (2024). Entropy tümleşik TOPSIS tekniği ile optimum kayısı kurutma yönteminin belirlenmesi. *Çukurova Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 39(2), 267-281.

Direct Shear Box Assessment of Sand–Rubber Mixtures: Strength, Ductility, and a Performance Index

Şahin Çağlar TUNA^{1,a}

¹Yaşar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-6762-1245

Article Info

Received : 03.10.2025

Accepted : 16.12.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1796691

Corresponding Author

Şahin Çağlar TUNA

caglar.tuna@yasar.edu.tr

Keywords

Sand–rubber mixture

Shear strength

Performance index

Sustainable geotechnics

Waste tires

How to cite: TUNA, Ş.Ç., (2025). Direct Shear Box Assessment of Sand–Rubber Mixtures: Strength, Ductility, and a Performance Index. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(4), 977-991.

ABSTRACT

The reuse of waste materials in geotechnical engineering promotes sustainability while enhancing soil performance. This study investigates the effect of shredded waste rubber on sand through consolidated drained direct shear tests at two relative densities ($D_r \approx 30\%$ and 70%) with 0–10% rubber content. Rubber inclusion reduced brittleness and improved ductility, with mixtures containing 2.5–5% achieving the most favorable strength–deformation balance. In loose sand, cohesion and friction angle increased up to 5%, while in dense sand cohesion rose slightly but friction angle declined at higher contents.

A new Performance Index (PI) is proposed in this study, integrating energy absorption, ductility, and residual-to-peak strength into a unified framework. The PI confirmed the 2.5–5% range as optimum, providing a practical tool for mixture evaluation. These findings indicate that low rubber contents are suitable for seismic embankments, retaining walls, and transportation subgrades, while higher contents may be more effective in lightweight and energy-dissipative applications.

Kum–Lastik Karışımlarının Doğrudan Kesme Kutusu ile Değerlendirilmesi: Mukavemet, Süneklik ve Performans İndeksi

Makale Bilgileri

Geliş : 03.10.2025

Kabul : 16.12.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1796691

Sorumlu Yazar

Şahin Çağlar TUNA

caglar.tuna@yasar.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Kum–lastik karışımı

Kesme mukavemeti

Performans indeksi

Sürdürülebilir geoteknik

Atık lastikler

Atf şekli: TUNA, Ş.Ç., (2025). Kum–Lastik Karışımlarının Doğrudan Kesme Kutusu ile Değerlendirilmesi: Mukavemet, Süneklik ve Performans İndeksi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(4), 977-991.

ÖZ

Geoteknik mühendisliğinde atık malzemelerin yeniden kullanımı, sürdürülebilirliği teşvik ederken zemin performansını da artırmaktadır. Bu çalışma, parçalanmış atık lastiklerin kum üzerindeki etkisini konsolide-drenajlı doğrudan kesme deneyleri ile incelemektedir. İki farklı bağıl sıklıkta ($D_r \approx \%30$ ve $\%70$) ve $\%0$ – $\%10$ lastik katkı oranı ile yapılan deneylerde, lastik ilavesinin kırılma direnci azalttığı ve sünekliği artırdığı; özellikle $\%2.5$ – $\%5$ aralığındaki karışımların en uygun mukavemet–deformasyon dengesini sağladığı belirlenmiştir. Gevşek kumlarda kohezyon ve içsel sürtünme açısı $\%5$ 'e kadar artarken, sıkı kumlarda kohezyon hafif artış göstermiş, ancak sürtünme açısı yüksek katkı oranlarında azalmıştır. Bu çalışmada ayrıca enerji yutma, süneklik ve artık/tepe mukavemet oranını bütünleştiren yeni bir Performans İndeksi (PI) önerilmiştir. PI, $\%2.5$ – $\%5$ aralığının optimum olduğunu doğrulamış ve karışımların değerlendirilmesinde pratik bir araç sunmuştur. Bulgular, düşük lastik katkı oranlarının sismik dolgular, istinat duvarları ve ulaşım altyapısı alt dolguları için uygun olduğunu; daha yüksek oranların ise hafif ve enerji sönmeyici dolgular için daha etkili olabileceğini göstermektedir.

1. INTRODUCTION

The reuse of waste materials in geotechnical engineering has attracted growing interest over the past two decades due to the combined pressures of sustainable development, environmental protection, and cost efficiency. Among these materials, discarded automobile tires represent a major environmental challenge worldwide, as millions of tons are generated annually and their non-biodegradable nature leads to long-term hazards and uncontrolled accumulation in landfills. Recycling waste tires for geotechnical purposes has therefore emerged as a promising approach, simultaneously addressing sustainability and soil improvement objectives [1-2].

Granular soils, particularly sand, are widely used in earth structures such as embankments, foundations, and backfills because of their high permeability and ease of compaction. However, their inherent brittleness and low ductility under monotonic or cyclic loading present a key limitation, especially in seismic regions. Clean sands typically exhibit negligible cohesion and sudden strength loss after peak, with little energy absorption capacity [3]. To overcome these shortcomings, various reinforcing materials have been examined, including fibers, geosynthetics, and shredded waste rubber, with the aim of improving both shear strength and deformation capacity.

Recent studies on sustainable soil and material modification have highlighted that alternative additives, including biopolymers and waste tire rubber, primarily influence the balance between strength and ductility in geomaterials [4,5]. Previous research has shown that rubber inclusion can provide multiple benefits [6], through sixty direct shear tests, reported that ~5% rubber content at moderate density enhanced the internal friction angle, while higher contents or dense conditions reduced peak shear resistance, illustrating the dual role of rubber. Other studies confirmed that shredded tires reduce the unit weight of mixtures, increase ductility, and enhance energy absorption, delaying brittle failure [7,8]. [2] emphasized their effectiveness as lightweight backfill, while [9] and [3] highlighted the influence of rubber content and geometry on shear response. More recent investigations [10-13] further revealed that low rubber contents enhance resistance, but excessive amounts increase liquefaction susceptibility or reduce interparticle friction. Complementary numerical modeling studies have clarified the microscale mechanisms of contact force redistribution and deformation in rubber–sand systems [14].

Although these contributions highlight the potential of sand–rubber mixtures, consensus is still lacking on the optimum content that balances strength and ductility. Moreover, limited attention has been paid to the combined effects of relative density and rubber inclusion on shear behavior. To address these gaps, the present study investigates sand–rubber mixtures at two densities ($Dr \approx 30\%$ and 70%) and rubber contents of 0–10%. In addition to conventional shear strength parameters, the study evaluates ductility, energy absorption, and post-peak performance. A novel Performance Index (PI) is proposed, integrating these response parameters into a single framework to identify optimum content. This approach provides both new insights into the mechanics of sand–rubber mixtures and a practical tool for sustainable, performance-based geotechnical design.

2. MATERIALS AND METHODS

The experimental program was conducted using poorly graded clean sand (SP) according to the Unified Soil Classification System (USCS). The sand was oven-dried before testing to eliminate moisture effects. Shredded waste rubber particles were obtained from recycled automobile tires and mechanically processed to achieve particle dimensions ranging from approximately 10–25 mm in length and 2–4 mm in width.

Five types of specimens were prepared by blending sand with four different rubber contents: 2.5%, 5%, 7.5%, and 10% by dry weight, along with a control sample of pure sand (0%). Two relative density conditions were considered— $Dr \approx 30\%$ (loose) and $Dr \approx 70\%$ (dense)—to capture the influence of packing state on shear behavior. The physical properties of the materials are summarized in Table 1.

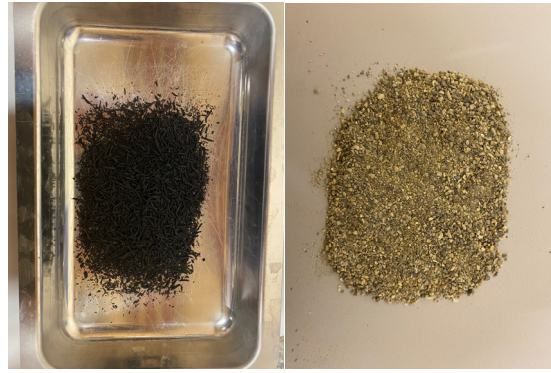


Figure 1. Sand/Rubber and Rubber-mixed sand specimen.

Table 1. Physical properties of materials used in the experimental study

Material	Property	Value / Range
Sand	Soil classification (USCS)	SP (poorly graded clean sand)
	Specific gravity (G_s)	2.65
	Maximum dry unit weight	15.5 kN/m ³
	Minimum dry unit weight	14.1 kN/m ³
	Particle size	Fine to medium sand
Shredded rubber	Source	Recycled automobile tires
	Particle dimensions	Length: 10–25 mm; Width: 2–4 mm
	Color / type	Black, mechanically shredded
Mixtures	Rubber content by dry weight	0%, 2.5%, 5%, 7.5%, 10%
	Relative density (D_r)	30% (loose), 70% (dense)

Each mixture was thoroughly blended in a mixing tray to ensure a uniform distribution of rubber particles within the sand matrix. Specimens were prepared in a standard direct shear box with internal dimensions of $60 \times 60 \times 25$ mm. The material was placed in three equal layers, each compacted using a manual tamper to achieve the target density. The preparation process and the direct shear apparatus are shown in Figure 2.

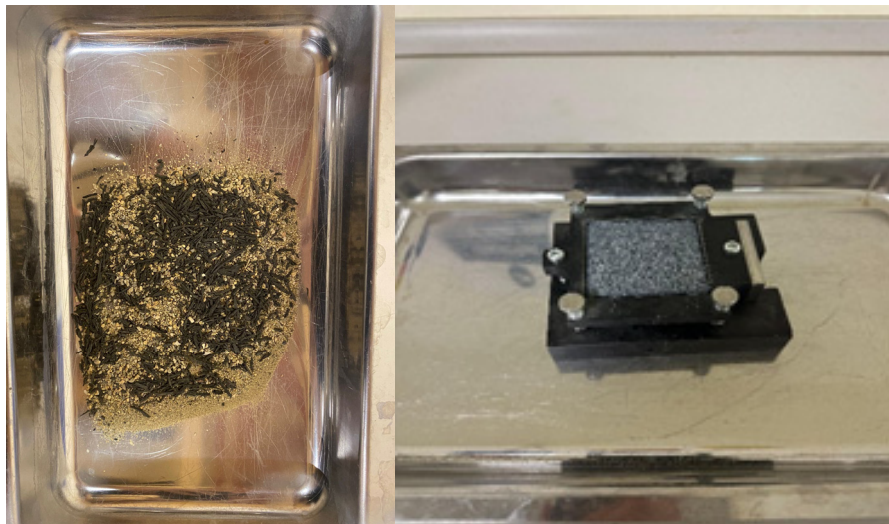


Figure 2. Representative appearance of sand and rubber particles before mixing. The image is shown for visual illustration only; the actual specimens were thoroughly mixed to ensure uniform distribution prior to testing

Direct shear tests were performed in accordance with [15] For each test, shear stress–displacement (τ – δ) curves and shear stress–normal stress (τ – σ) relationships were obtained. From the peak shear stresses at different normal stresses, Mohr–Coulomb strength envelopes were established, enabling determination of cohesion (c) and friction angle (ϕ) via linear regression. In addition to peak strength, the post-peak response was evaluated to quantify ductility, energy absorption, and brittleness reduction.

3. RESULTS AND DISCUSSION

This study evaluated the influence of shredded waste rubber on the shear strength and deformation behavior of sand through a series of direct shear tests. Rubber was incorporated at 2.5%, 5%, 7.5%, and 10% by dry weight, alongside a control specimen of clean sand (0%). The sand was classified as poorly graded (SP) under the USCS, while rubber particles were mechanically shredded from discarded tires. Two relative densities were examined: $Dr \approx 30\%$ (loose) and $Dr \approx 70\%$ (dense). All tests were conducted in a $60 \times 60 \times 25$ mm shear box under vertical loads of 1–4 kg, and shear stress–displacement (τ – δ) responses were recorded until failure.

3.1. Shear Stress–Displacement Response

The shear stress–displacement (τ – δ) responses for sand–rubber mixtures at $Dr \approx 30\%$ (loose) and $Dr \approx 70\%$ (dense) are presented in Figure 3. In loose specimens (top panel), the inclusion of 2.5–5% rubber markedly reduced the post-peak softening, producing smoother transitions and enhanced ductility compared to clean sand. At higher inclusions ($\geq 7.5\%$), peak shear stresses decreased, reflecting disruption of the sand skeleton.

In the loose sand specimens, a modest drop in shear stress was observed after the peak. This behaviour can be explained by the development of a shear band during deformation. As shearing progresses, the sand particles initially interlock and mobilise higher resistance, which produces the peak. Once the shear plane becomes fully formed, the local structure is rearranged and the number of active contact points between particles decreases. At the same time, lateral dilation is partially restricted by the boundaries of the shear box. These combined effects result in a small reduction in shear stress, after which the response tends to stabilise at a nearly constant level. This limited post-peak reduction is consistent with previously documented mechanisms where interlocking and dilatancy create initial peak resistance, followed by shear-band development, rearrangement of contacts, and transition toward a critical-state response [16–17].

In dense specimens (bottom panel), the peak shear stresses of clean sand were highest, but ductility improved with small rubber additions. However, excessive inclusions (≥ 7.5 –10%) reduced peak resistance despite sustaining deformation capacity. Together, these results highlight that rubber addition promotes ductility in both densities, though the trade-off between peak strength and deformability becomes more pronounced at higher rubber contents.

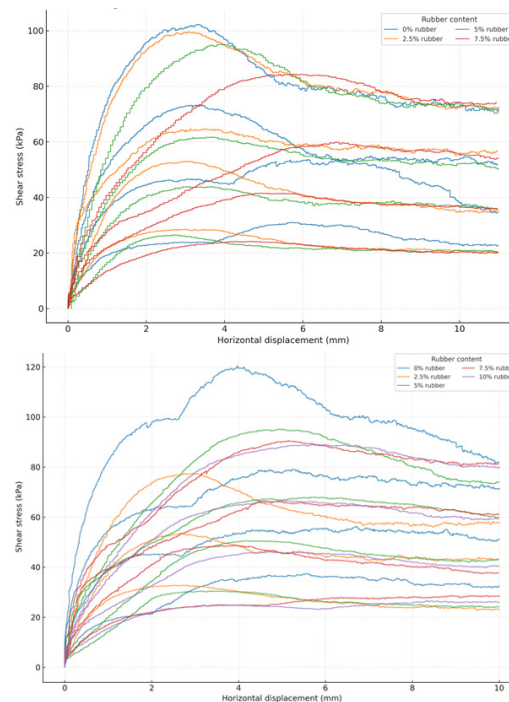


Figure 3. Shear stress–displacement (τ – δ) curves of sand–rubber mixtures for loose ($Dr \approx 30\%$, top) and dense ($Dr \approx 70\%$, bottom) specimens at varying rubber contents

The inclusion of shredded rubber modified the τ - δ response in two principal ways:

1. Enhanced ductility: Rubber addition produced smoother post-peak transitions, reducing brittleness and enabling larger residual deformations. This ductility improvement was most evident in loose specimens, where post-peak strength loss was substantially mitigated at 2.5–5% rubber content.
2. Variation in peak strength: At low rubber contents (2.5–5%), peak shear stresses increased relative to clean sand, indicating a reinforcing effect from particle interlocking and stress redistribution. However, higher rubber contents ($\geq 7.5\%$) reduced peak stresses, particularly in dense specimens, suggesting that excessive rubber disrupts sand skeleton packing and lowers interparticle friction.

The overall results highlight a trade-off: while small inclusions of rubber (2.5–5%) enhance both strength and ductility, larger inclusions primarily increase deformability at the expense of peak resistance. This dual role is consistent with earlier findings in sand–rubber mixture studies and provides a basis for identifying the optimum range of rubber content.

3.2. Shear Strength Envelopes and Post-peak Behaviour

The shear strength of sand–rubber mixtures was evaluated through Mohr–Coulomb envelopes derived from peak shear stresses under different normal loads. Cohesion (c) and internal friction angle (ϕ) were obtained by linear regression of the peak shear stress–normal stress data. Figure 4 presents the envelopes for loose ($Dr \approx 30\%$) and dense ($Dr \approx 70\%$) specimens, respectively, together with regression fits, while the corresponding shear strength parameters are summarized in Tables 2 and 3.

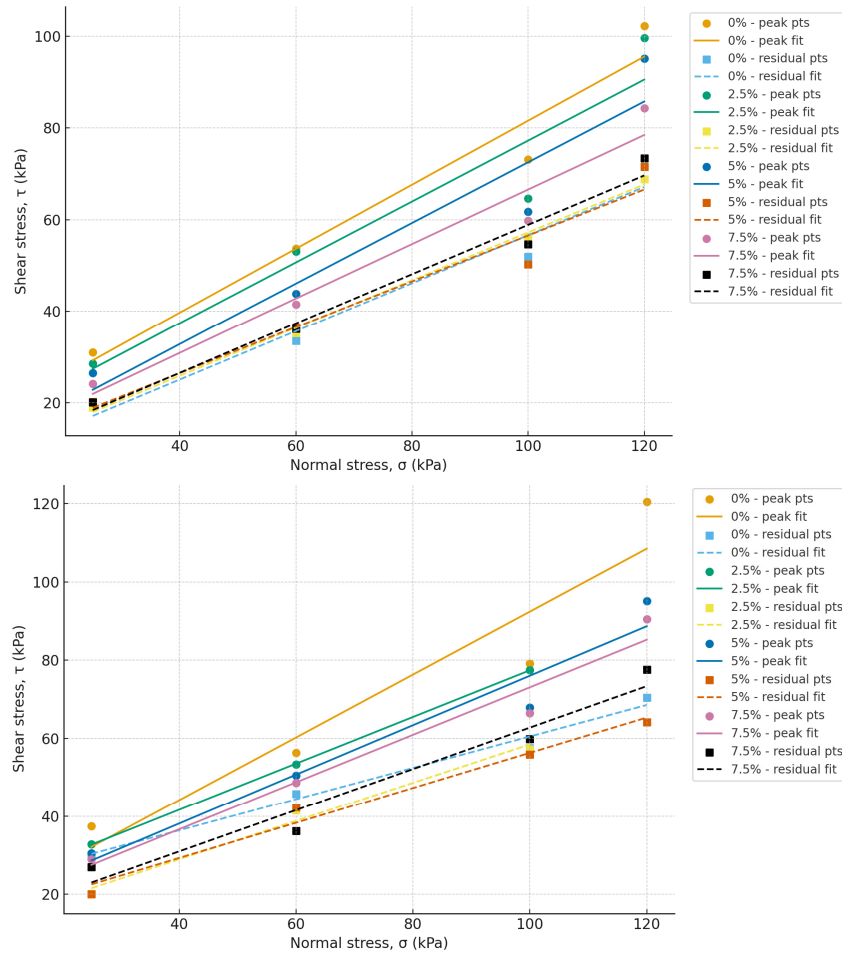


Figure 4. Shear strength envelopes from direct shear: (a) $Dr \approx 30\%$, (b) $Dr \approx 70\%$

For loose specimens ($Dr \approx 30\%$), the friction angle remained nearly constant up to 5% rubber and dropped slightly at 7.5%, while cohesion values were small and inconsistent. Residual strength parameters showed limited variation, indicating that rubber had only a minor influence in the loose state.

Table 2. Peak and Residual Mohr–Coulomb parameters (c , ϕ) for loose sand–rubber mixtures ($Dr \approx 30\%$).

Rubber Content (%)	c_{peak} (kPa)	ϕ_{peak} (°)	c_{res} (kPa)	ϕ_{res} (°)
0.0 (clean sand)	12.03	38.79	20.27	21.93
2.5	17.8	30.81	9.24	26.22
5	12.83	32.3	11.25	24.27
7.5	12.34	31.28	9.76	27.94

For dense specimens ($Dr \approx 70\%$), the friction angle of clean sand was the highest and decreased progressively with rubber inclusion. At the same time, cohesion exhibited a modest increase at low rubber contents (≈ 2.5 –5%), before stabilizing. Residual strength parameters reflected similar tendencies, with slightly higher values at low rubber percentages.

Table 3. Peak and Residual Mohr–Coulomb parameters (c , ϕ) for dense sand–rubber mixtures ($Dr \approx 70\%$).

Rubber Content (%)	c_{peak} (kPa)	ϕ_{peak} (°)	c_{res} (kPa)	ϕ_{res} (°)
0.0 (clean sand)	21.43	38.2	18.77	23.13
2.5	18.12	34.92	15.38	27.48
5	13.6	35.76	14.2	25.91
7.5	14.85	33.54	12.44	24.62

Figure 5 illustrates the variation of c and ϕ with rubber content. For loose specimens, ϕ reached its highest value at 5%, while cohesion exhibited a maximum at 2.5%. For dense specimens, ϕ decreased with increasing rubber content, whereas cohesion attained its highest values in the 2.5–5% range among the rubber-modified mixtures. These results indicate that the optimum rubber content lies between 2.5% and 5% by dry weight, where the mixtures achieved the most favourable balance between peak strength and post-peak ductility.

Figure 5 illustrates the variation of c and ϕ with rubber content. For loose specimens, ϕ peaked at 5% and cohesion also reached its maximum at this content. For dense specimens, ϕ decreased monotonically with increasing rubber, while cohesion attained its maximum at 2.5–5%. These results indicate that the optimum rubber content lies in the range of 2.5–5% by dry weight, where mixtures achieved the most favourable balance between peak strength and post-peak ductility.

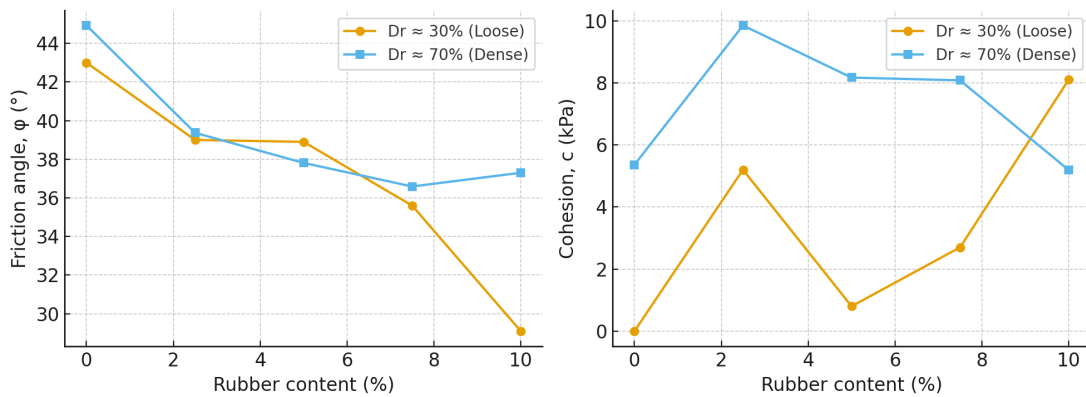


Figure 5. Variation of shear strength parameters with rubber content: (a) internal friction angle (ϕ), (b) cohesion (c), for loose ($Dr \approx 30\%$) and dense ($Dr \approx 70\%$) specimens

A slightly higher ϕ_{peak} was obtained for the loose clean sand specimen compared to the dense clean sand. This behaviour reflects the balance between interlocking and dilatancy mobilisation during shearing. In dense specimens, tighter packing increases the number of particle contacts and stabilises force chains, which is expressed as a higher apparent cohesion. At the same time, lateral confinement in the direct shear box restricts dilation along the shear plane, limiting the mobilised friction angle. Loose specimens, in contrast, have more freedom to dilate and can develop localized densification along the shear plane, which may temporarily increase ϕ_{peak} during peak mobilisation. Therefore, the small difference in ϕ_{peak} does

not imply that the loose sand is stronger; when cohesion and residual resistance are considered, the dense specimen still provides higher and more stable overall shear strength. This mechanism is consistent with dilatancy-based strength models for granular material [18]. The post-peak response further supports this interpretation, as dense specimens maintained a higher proportion of their peak strength, confirming the role of force-chain stability and reduced brittleness.

3.2.1. Residual Behaviour

Residual strength parameters further clarify the role of rubber. Figure 6 shows that, for loose specimens, residual friction angle remained nearly constant ($\approx 31\text{--}33^\circ$) and cohesion stayed low ($\approx 1\text{--}3\text{ kPa}$). In dense specimens, ϕ_r increased at 2.5% before declining, while c_r dropped sharply from clean sand to 2.5% and partially recovered at 5%. These results indicate that residual strength is more sensitive to rubber inclusion in dense specimens, with localized improvements at 2.5–5%.

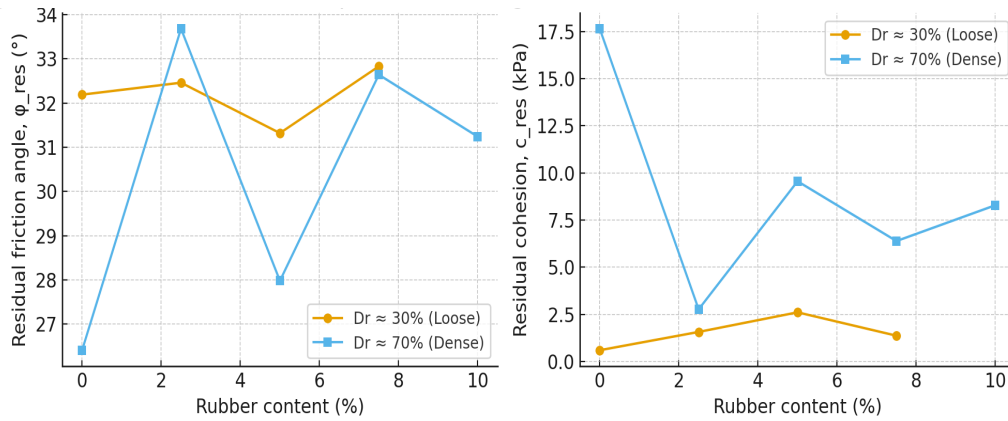


Figure 6. Variation of residual shear strength parameters with rubber content: (a) residual friction angle (ϕ_r), (b) residual cohesion (c_r), for loose ($Dr \approx 30\%$) and dense ($Dr \approx 70\%$) specimens

To quantify the effect of rubber inclusion on post-peak strength degradation, residual-to-peak ratios and a brittleness index (BI) were defined. These parameters provide normalized measures of residual strength and ductility, independent of absolute stress levels:

$$R_\phi = \frac{\phi_{res}}{\phi_{peak}} \quad (1)$$

where ϕ_{res} is the residual friction angle and ϕ_{peak} is the peak friction angle. Values close to unity indicate that the residual strength is preserved relative to the peak, while lower values reflect significant post-peak degradation.

$$R_c = \frac{c_{res}}{c_{peak}} \quad (2)$$

where c_{res} and c_{peak} represent residual and peak cohesion, respectively. This ratio captures whether apparent cohesion is sustained after peak failure.

$$BI = \frac{\tau_{peak} - \tau_{res}}{\tau_{peak}} \approx 1 - \frac{\tan(\phi_{res})}{\tan(\phi_{peak})} \quad (3)$$

Where τ_{peak} and τ_{res} denote the shear stresses at peak and residual states, respectively. A high BI indicates a brittle response with sharp strength loss after the peak, while lower values denote a ductile response characterized by gradual post-peak reduction.

Figure 7a–c illustrates the variation of normalized post-peak parameters with rubber content. R_ϕ decreased with increasing rubber content, particularly in loose specimens, where values fell below 0.8 at 10% inclusion. Dense specimens maintained higher R_ϕ ($\approx 0.85\text{--}0.90$), indicating that dense packing mitigates the reduction in residual friction. R_c showed localized cohesion gains at 2.5–5% rubber, while BI decreased consistently, confirming the transition from brittle to ductile post-peak behaviour.

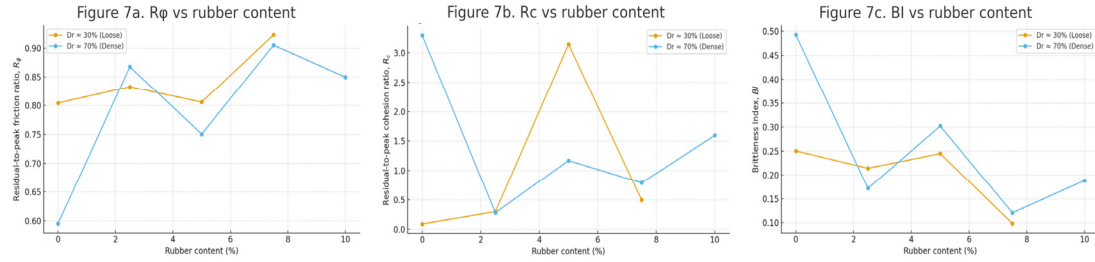


Figure 7. Normalized post-peak parameters with rubber content: (a) residual-to-peak friction angle ratio ($R\phi$), (b) residual-to-peak cohesion ratio (R_c), and (c) brittleness index (BI), for loose ($Dr \approx 30\%$) and dense ($Dr \approx 70\%$) specimens

Overall, shredded rubber introduces a trade-off: in dense sand, it enhances apparent cohesion at low contents but reduces friction, whereas in loose sand the effects are less pronounced. The optimum performance was consistently observed at 2.5–5% inclusion, which provided the most balanced compromise between strength and ductility. From an engineering perspective, this range is suitable for applications requiring both load-bearing capacity and energy absorption, such as retaining wall backfills, seismic embankments, and subgrade stabilization. Higher inclusions ($\geq 7.5\%$) may still be useful in vibration isolation or lightweight fills, but their reduced shear strength limits use in stability-critical structures. These findings align with previous studies, which also reported beneficial effects at low contents but detrimental impacts at excessive levels.

3.3. Energy Absorption and Ductility Behavior

The post-peak response of sand–rubber mixtures was further evaluated in terms of energy dissipation and deformation capacity. Two indices were adopted from the shear stress–displacement (τ – δ) curves: the normalized energy absorption index (E^*) and the ductility index (DI). These provide a quantitative measure of the ability of the mixtures to absorb energy and sustain deformation beyond the peak shear stress. The normalized energy absorption index is defined as:

$$E^* = \frac{\int_0^{\delta_{peak}} \tau(\delta) d\delta}{\tau_{peak} \delta_{peak}} \quad (4)$$

where $\tau(\delta)$ is the shear stress at displacement δ , τ_{peak} is the peak shear stress, and δ_{peak} is the displacement corresponding to the peak. High values of E^* (close to unity) indicate that the material sustains large amounts of energy before failure, characteristic of ductile behavior. Conversely, values below 0.5 denote limited energy dissipation and a brittle response.

The ductility index is defined as:

$$DI = \frac{\delta_r}{\delta_{peak}} \quad (5)$$

where δ_r is the displacement corresponding to the residual shear stress ($\tau_r \approx 0.8 \cdot \tau_{peak}$). A value of $DI > 1$ reflects significant deformation capacity beyond peak load, while $DI \approx 1$ or lower indicates a brittle response with rapid post-peak strength loss.

Figures 8 and 9 illustrate the variation of E^* and DI with rubber content for both loose ($Dr \approx 30\%$) and dense ($Dr \approx 70\%$) specimens.

- For loose sand, E^* increased markedly with the inclusion of 2.5–5% rubber, reaching values nearly twice those of clean sand, before plateauing at higher rubber contents ($\geq 7.5\%$). The ductility index exhibited a similar trend, with DI values more than doubling at 2.5% rubber and stabilizing beyond 5%.
- For dense sand, improvements in E^* and DI were less pronounced but followed the same pattern: a clear enhancement at 2.5–5% rubber followed by stabilization.

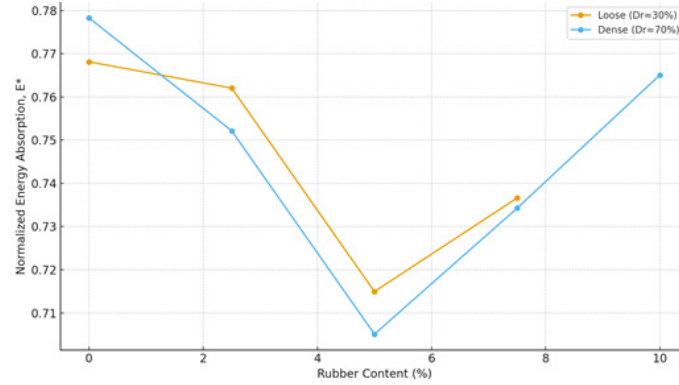


Figure 8. Variation of normalized energy absorption (E^*) with rubber content

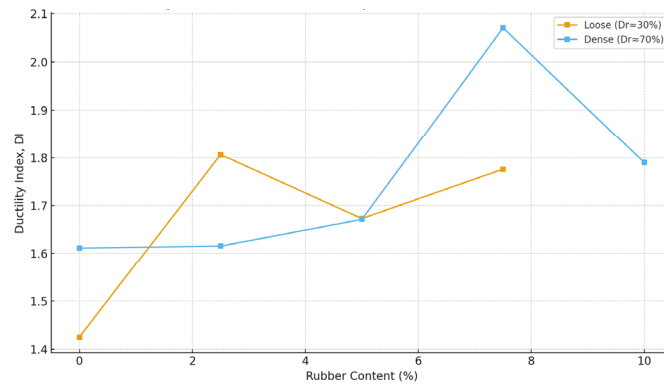


Figure 9. Variation of ductility index (DI) with rubber content

These findings highlight the dual role of rubber inclusion: low contents (2.5–5%) maximize energy absorption and ductility while maintaining adequate strength, whereas higher inclusions ($\geq 7.5\%$) mainly improve ductility at the expense of strength. This provides a rational guideline for selecting rubber content in applications where both capacity and deformability are required.

To facilitate comparison across different densities, the indices were also normalized by their values for clean sand (0% rubber) under the same relative density condition:

$$E_{norm}^* = \frac{E^*}{E_{clean}^*} \quad DI_{norm} = \frac{DI}{DI_{clean}} \quad (6)$$

Figure 10 shows that both E_{norm}^* and DI_{norm} increased significantly at 2.5–5% rubber, reaching 1.5–2.0 times those of clean sand, before plateauing. The effect was more pronounced in loose specimens, confirming the stronger reinforcing role in low-density matrices.

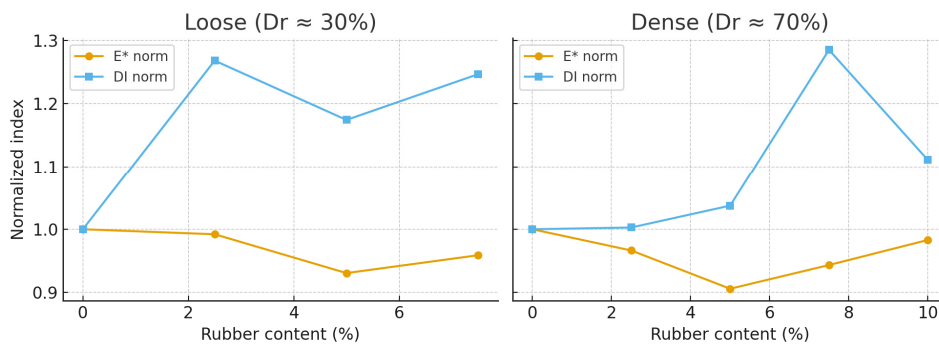


Figure 10. Normalized energy absorption index (E_{norm}^*) and ductility index

Figure 11 further demonstrates that the post-peak softening slope ($|S|$) decreased consistently with rubber inclusion, reflecting the transition from brittle to ductile response.

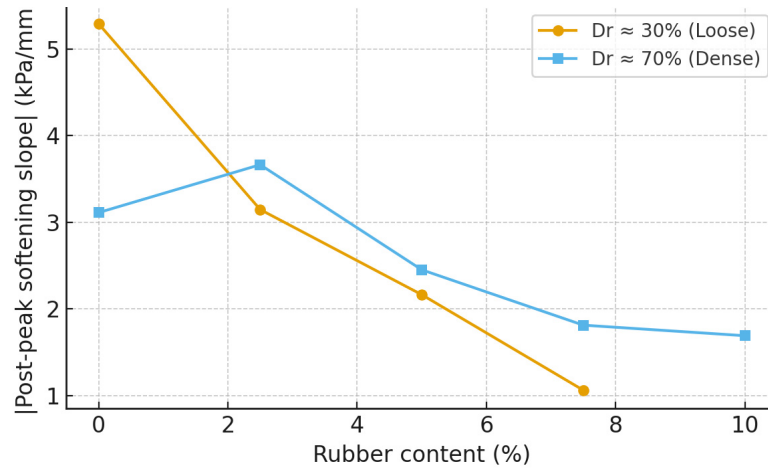


Figure 11. Variation of post-peak softening slope $|S|$ with rubber content for loose and dense specimens

Correlation analysis (Table 4, Figure 12) revealed weak associations between E^* and ϕ , but a stronger link between DI and residual cohesion, suggesting that ductility improvements partly stem from interlocking and bridging effects of rubber particles. A clear negative correlation between the performance index (PI) and brittleness index (BI) confirmed that improved performance is consistently tied to reduced brittleness.

Table 4. Correlation coefficients between normalized energy absorption (E^*) and friction angle (ϕ), and between ductility index (DI) and cohesion (c), for loose and dense specimens

Specimen	Corr(E^* , ϕ)	p(E^* , ϕ)	Corr(DI, c)	p(DI, c)
Loose (Dr≈30%)	0.406	0.594	-0.468	0.532
Dense (Dr≈70%)	0.619	0.266	0.015	0.981

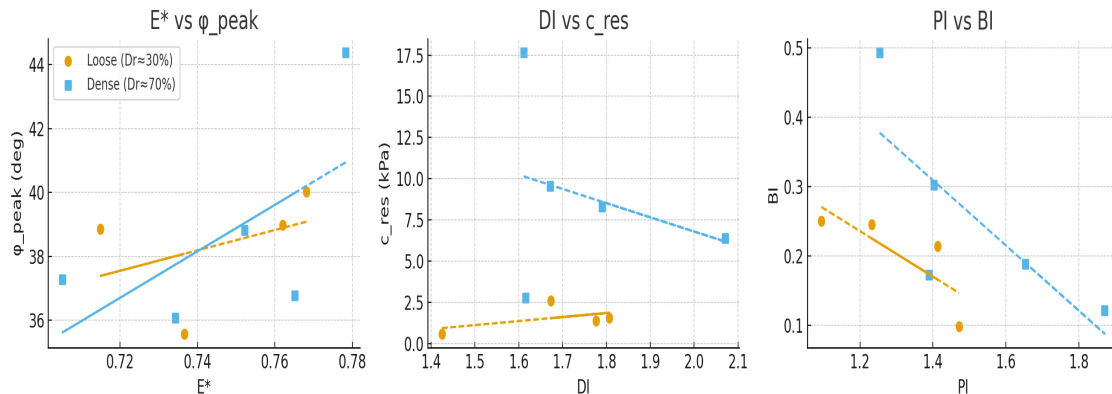


Figure 12. Correlation analysis for sand–rubber mixtures: (a) normalized energy absorption vs peak friction angle, (b) ductility index vs residual cohesion, and (c) performance index vs brittleness index.

Results for loose ($Dr \approx 30\%$) and dense ($Dr \approx 70\%$) specimens are shown with regression fits

These findings are consistent with previous literature. Rubber inclusion has been widely reported to mitigate post-peak strength loss and promote ductile behavior by reducing BI and increasing deformation capacity [8,19]. Ductility improvements have been attributed to localized interlocking and bridging of rubber particles [20–21], while the strongest energy absorption gains are often observed in loose sand matrices [22]. However, at high rubber contents ($\geq 7.5\%$), improvements plateau and reductions in shear strength become more pronounced, as also noted by [23,24]. Collectively, both the experimental findings and literature confirm that the optimum range of 2.5–5% rubber content yields the most favorable balance

between energy absorption, ductility, and strength, providing a rational design basis for geotechnical applications [25,26].

3.4. Composite Indices

While several studies have independently employed parameters such as energy absorption (E^*), ductility index (DI), and brittleness index (BI) to evaluate the mechanical response of sand–rubber mixtures [6,15,17], their interpretation has largely remained qualitative and separate. In this study, a novel composite index, referred to as the Performance Index (PI), is proposed to provide an integrated quantitative measure of mixture behavior. The PI is formulated as:

$$PI = \frac{E^* \times DI}{SR_{\phi}} \quad (7)$$

where E^* is the normalized energy absorption index, DI is the ductility index, and SR_{ϕ} is the residual-to-peak friction angle ratio. This definition simultaneously accounts for (i) the ability of the mixture to dissipate energy, (ii) its post-peak deformation capacity, and (iii) the degree of strength degradation after peak.

Figure 13 illustrates the variation of PI with rubber content for both loose and dense specimens. The results reveal a clear optimum in the 2.5–5% rubber range, where PI values reach their maximum, indicating the most favorable balance between ductility, energy absorption, and strength retention. At higher inclusions ($\geq 7.5\%$), PI decreases, reflecting the trade-off between enhanced deformability and loss of frictional strength.

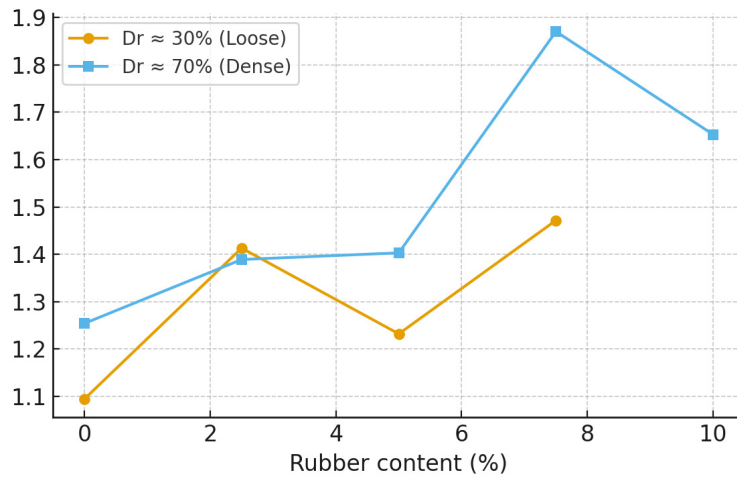


Figure 13. Variation of Performance Index (PI) with rubber content for loose and dense specimens

From a design perspective, PI serves as a composite performance indicator that consolidates both the beneficial and adverse effects of rubber inclusion into a single metric. To the authors' knowledge, only limited studies have combined energy absorption, ductility, and residual strength into a unified measure for sand–rubber mixtures, and the present study offers one such integrated evaluation. The proposed PI offers a practical tool for identifying optimum rubber content and provides a framework that could be further explored and adapted for other soil–waste composites in future research.

Additional response parameters corroborate the optimum range. As shown in Figure 14.a, the peak dilatancy angle (ψ_{peak}) decreased with rubber addition in loose sand, reflecting reduced volumetric expansion tendency, while in dense specimens it remained stable at 2.5–5% but declined at higher inclusions. Similarly, Figure 14.b illustrates that the initial stiffness (K_i), defined as the slope of the stress–displacement curve at small strains (0–0.5 mm), progressively decreased with rubber content, particularly beyond 7.5%, indicating a softer initial response and enhanced deformation capacity.

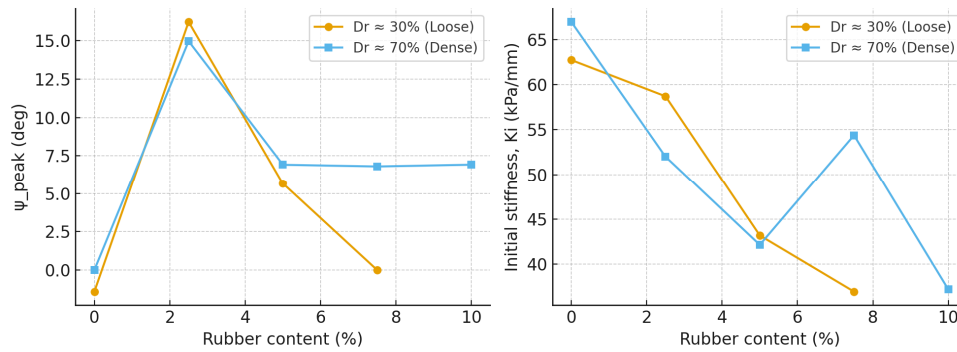


Figure 14. Variation of additional response parameters with rubber content: (a) peak dilatancy angle (ψ_{peak}), (b) initial stiffness (K_i), for loose ($Dr \approx 30\%$) and dense ($Dr \approx 70\%$) specimens

Taken together, Figures 13 and 14 confirm that shredded rubber reduces dilatancy and stiffness while enhancing ductility and energy absorption. These findings, combined with peak and residual strength analyses, converge on the conclusion that the 2.5–5% inclusion range provides the most favorable compromise for geotechnical applications. At higher contents, while ductility and vibration isolation remain advantageous, significant losses in shear strength necessitate caution. Literature consistently supports this conclusion, showing that low rubber contents maximize performance by improving energy dissipation and deformation capacity without excessive strength loss [25].

3.5. Engineering Implications

The experimental outcomes confirm that shredded rubber alters the mechanical response of sand in a density- and content-dependent manner. An optimum range of 2.5–5% consistently provided the most effective balance between strength, ductility, and energy absorption. This finding is consistent with seismic-focused studies, where rubber–sand mixtures (RSM) have been shown to function as effective isolation systems, mitigating brittle failure while sustaining load-bearing capacity under shaking table tests [26]. Reinforced RSM cushions have similarly been reported to improve seismic performance without excessive stiffness loss [27].

At low rubber contents, beneficial effects primarily arise from interlocking and bridging between rubber and sand grains, which redistribute stresses and mitigate strain localization. Comparable mechanisms have been highlighted in recent transportation infrastructure studies, where shear strength and compressibility analyses identified a similar optimum range [1]. At higher inclusions ($\geq 7.5\%$), however, the sand skeleton becomes progressively disrupted, reducing dilatancy and stiffness, as also observed in rubber–concrete and hybrid mixtures developed for damping applications [28].

The introduction of the Performance Index (PI) provides additional value, as it integrates ductility, energy dissipation, and strength retention into a single quantitative framework. This aligns with findings that optimized composite mixtures (e.g., sand–rubber–bitumen) enhance ductility while maintaining stability, underscoring the practicality of multi-parameter evaluation in design [29].

Importantly, reductions in peak dilatancy angle (ψ_{peak}) and initial stiffness (K_i) with rubber inclusion should not be viewed solely as detrimental. In seismic contexts, such reductions contribute to improved cyclic stability and resilience [30]. Overall, modest rubber contents yield a dual benefit: enhancing ductility and energy absorption while preserving adequate residual resistance.

From a design perspective, adopting 2.5–5% rubber content as a preliminary guideline offers resilience advantages for seismic embankments, retaining walls, and subgrade systems, while avoiding instability risks associated with higher inclusions. This study extends current consensus by demonstrating that a unified evaluation framework—anchored by PI and supported by conventional strength and deformation parameters—can effectively capture the optimum range for sustainable geotechnical applications [31–33].

Similar findings were also reported in regional studies. For instance, [34] experimentally confirmed that sand–rubber mixtures improve shear strength behavior at low inclusion rates, while [35] highlighted the

role of tire-based composites in enhancing soil performance for infrastructure applications. These complementary results further corroborate the present study, underlining the broad applicability of rubber-sand mixtures in sustainable ground improvement.

4. CONCLUSIONS

This study investigated the effect of shredded waste rubber on the shear strength and deformation behavior of sand through consolidated drained direct shear tests under two relative densities ($Dr \approx 30\%$ and $Dr \approx 70\%$) with rubber contents of 0–10% by dry weight. The main findings are summarized as follows:

- Shear response: Clean sand exhibited brittle post-peak behavior, whereas rubber inclusion reduced brittleness and promoted ductility. At 2.5–5% content, mixtures achieved higher peak shear stresses than clean sand, while higher inclusions ($\geq 7.5\%$) reduced peak resistance but maintained ductile deformation capacity.
- Strength parameters: In loose specimens, both cohesion and friction angle increased up to 5% rubber. In dense specimens, cohesion improved slightly at low contents, but friction angle decreased progressively with increasing rubber. These results highlight the density-dependent dual role of rubber: improving ductility at all levels but compromising frictional resistance when inclusion is excessive.
- Composite assessment: A new Performance Index (PI) was introduced, integrating energy absorption, ductility, and residual-to-peak strength into a single metric. PI consistently peaked at 2.5–5% inclusion, providing a unified framework for identifying optimum rubber content.
- Engineering implications: Mixtures with 2.5–5% rubber are most suitable for seismic embankments, retaining walls, and transportation subgrades, where both strength and resilience are critical. Higher inclusions may still serve in lightweight fills or vibration isolation, but their lower shear strength requires careful design.

In addition to strength parameters, this study evaluated deformation and post-peak behaviour through energy absorption and ductility indices. These response measures were combined in a normalized Performance Index (PI), which simultaneously incorporates (i) energy dissipation up to peak load, (ii) deformation capacity beyond the peak and (iii) strength retention through the residual-to-peak friction angle ratio. Unlike previous studies where these parameters are treated separately, the present formulation offers a unified measure that allows direct comparison between densities and mixture contents. The systematic variation of PI with rubber content clearly identified the optimum range (2.5–5%), supporting the conclusion that low contents yield the most favourable balance between ductility, energy absorption and strength. Although the individual mathematical components are not new, the combined, normalized treatment of multiple response parameters provides practical design value and demonstrates that a unified index is necessary to detect optimum content — a conclusion that neither strength-based nor ductility-based indices can provide on their own.

This study employed small-scale consolidated drained direct shear tests with a controlled range of rubber contents and gradations. The direct shear method was selected as a first-stage investigation tool, offering high repeatability for comparative evaluation. However, it does not reproduce three-dimensional stress states, natural failure surface development or cyclic loading. The present findings should therefore be interpreted as a baseline foundation, rather than a complete representation of in-situ behaviour.

Future studies can build on these results by incorporating cyclic and large-scale triaxial tests, repeated loading protocols, and large shear boxes, which will enable more realistic assessment of seismic behaviour and field-scale deformations. Micro-mechanical observations such as X-ray CT, SEM and particle tracking can be used to visualize particle arrangement, interface behaviour and the evolution of force chains. Complementary numerical approaches (DEM/FEM) would further support mechanistic interpretation and facilitate the integration of sand-rubber mixtures into performance-based geotechnical design. Expanding the range of rubber sizes, shapes, fragmentation methods and mixture ratios, and evaluating long-term durability under freeze-thaw, wet-dry cycles, creep and chemical interaction will strengthen the generality and applicability of the conclusions.

Overall, this study demonstrates that shredded rubber can be effectively used to improve the performance of sandy soils, and the proposed framework provides engineers with a practical basis for optimizing mixture design. In addition, the findings establish a first-stage foundation for future research to validate and expand the sustainable applications of sand–rubber composites under realistic geotechnical conditions.

5. REFERENCES

1. Afrazi, M., Armaghani, D.J., Afrazi, H. & Rouhanifar, S. (2025). Geotechnical implications of sand–rubber mixture in transportation infrastructure: Assessing shear strength and compressibility characteristics. *Innovative Infrastructure Solutions*.
2. Keskin, M.S. & Laman, M. (2012). Shear strength behavior of sand–rubber mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(2), 287–298.
3. Cabalar, A.F. (2011). Direct shear tests on waste tires–sand mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(4), 411–418.
4. Bağrıaçık, B. ve Ok, B. (2022). Guar gum ile iyileştirilen kil zeminlerin donma çözülme etkisinde mukavemet ve şişme basınçlarının araştırılması. *Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(3), 589–600.
5. Yıldızhan, S., Yel, F., Akar, M.A. & Kumlu, U. (2022). Tensile and morphological properties of waste tire rubber granule/polyester polymer matrix composite. *Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(3), 773–779.
6. Anvari, S.M., Shooshpasha, I. & Kutanaei, S.S. (2017). Shear strength characteristics of sand–rubber chip mixtures: An experimental study. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(5), 954–962.
7. Ghazavi, M., & Amel-Sakhi, A. (2005). Experimental investigation of shear strength of sand–rubber mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering*, 23(5), 365–379.
8. Rouhanifar, S., Afrazi, M. & Fakhimi, A. (2021). Strength and deformation behaviour of sand–rubber mixture. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(5), 1078–1092.
9. Cabral, C. & Danziger, B.R. (2009). Shear strength of sand–rubber tire mixtures: Experimental results. *Soils and Rocks*, 32(2), 61–71.
10. Zhou, E. & Wang, Q. (2019). Experimental investigation on shear strength and liquefaction potential of rubber–sand mixtures. *Advances in Civil Engineering*, 5934961.
11. Tasalloti, A., Chiaro, G., Palermo, A. & Banasiak, L. (2020). Effect of rubber crumbs volumetric content on the shear strength of gravelly soil in direct shear apparatus. In *Geo-Congress 2020: Geotechnical Earthquake Engineering and Special Topics*, 281–290. American Society of Civil Engineers.
12. Dai, B.B., Liu, Q., Mao, X., Li, P. Y. & Liang, Z.Z. (2023). A reinterpretation of the mechanical behavior of rubber–sand mixtures in direct shear testing. *Construction and Building Materials*, 374, 130938.
13. Sun, Q., Hou, S., Cao, X., & Tsang, H. H. (2025). Direct shear tests on the effects of displacement rate and particle size ratio on the shear behavior of fine gravel–rubber mixtures. *Construction and Building Materials*, 429, 141874.
14. Wang, C., Deng, A., & Taheri, A. (2018). Three-dimensional discrete element modeling of direct shear test for granular rubber–sand. *Computers and Geotechnics*, 97, 204–216.
15. ASTM D3080/D3080M-12. (2012). Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. West Conshohocken, PA: ASTM International.
16. Oda, M. & Kazama, H. (1998). Microstructure of shear bands and its relation to the mechanisms of dilatancy and failure of dense granular soils. *Geotechnique*, 48(4), 465–481.
17. Arthur, J.R.F., Dunstan, T., Al-Ani, Q.A.J.L. & Assadi, A. (1977). Plastic deformation and failure in granular media. *Geotechnique*, 27(1), 53–74.
18. Bolton, M.D. (1986). The strength and dilatancy of sands. *Géotechnique*, 36(1), 65–78.
19. Manohar, D.R. & Anbazhagan, P. (2021). Shear strength characteristics of geosynthetic reinforced rubber-sand mixtures. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(3), 681–693.
20. Hunt, H., Indraratna, B. & Qi, Y. (2023). Ductility and energy absorbing behaviour of coal wash–rubber crumb mixtures. *Transportation Geotechnics*, 39, 100923.
21. Madhusudhan, B.R., Boominathan, A. & Banerjee, S. (2019). Engineering properties of sand–rubber tire shred mixtures. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(9), 1061–1077.
22. Liu, X., Tian, C. & Lan, H. (2020). Laboratory investigation of the mechanical properties of a rubber–calcareous sand mixture: The effect of rubber content. *Applied Sciences*, 10(18), 6583.

23. Anbazhagan, P. & Manohar, D.R. (2015). Energy absorption capacity and shear strength characteristics of waste tire crumbs and sand mixtures. *International Journal of Geotechnical Earthquake Engineering*, 6(1), 28-49
24. Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C. & Tawk, M. (2019). Compaction, degradation and deformation characteristics of an energy absorbing matrix. *Transportation Geotechnics*, 19, 18-29.
25. Safari, M., Rowshanzamir, M. & Hejazi, S.M. (2023). Combined effect of end-of-life rubber and a hydrophobic polymer on coastal saturated sand: A multiaspect investigation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(8), 04023271.
26. Ranjbar, E.G. & Hosseininia, E.S. (2024). Seismic performance of rubber-sand mixture as a geotechnical seismic isolation system using shaking table test. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 141, 105244.
27. Liu, F., Zeng, X., Wu, M., He, J. & Jie, Z. (2025). Seismic performance of thinner rubber-sand mixture cushion reinforced by geosynthetics. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*, 178(3), 223-236.
28. Mei, X., Sheng, Q., Cui, Z., Zhang, M. & Dias, D. (2023). Experimental investigation on the mechanical and damping properties of rubber-sand-concrete prepared with recycled waste tires for aseismic isolation layer. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 134, 104898.
29. Kuvat, A., Sadoglu, E. & Zardari, S. (2024). Experimental investigation of sand-rubber-bitumen mixtures as a geotechnical seismic isolation material. *International Journal of Geomechanics*, 24(6), 04024092.
30. AbdelRazek, A. & El-Sherbiny, R.M. (2018). Mechanical properties and time-dependent behaviour of sand-granulated rubber mixtures. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 12(6), 533-544.
31. Haddad, A. & Eidgahee, D.R. (2018). An investigation on the shear strength parameters of sand-rubber mixtures under the applied stress paths. In *Advances in Science, Technology & Innovation*, 173-184. Springer.
32. Madhusudhan, B.R. & Boominathan, A. (2017). Static and large-strain dynamic properties of sand-rubber tire shred mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(6), 04017024.
33. Ding, Y., Zhang, J., Chen, X. Wang, X., & Jia, Y. (2021). Experimental investigation on static and dynamic characteristics of granulated rubber-sand mixtures as a new railway subgrade filler. *Construction and Building Materials*, 273, 121955.
34. Keskin, S. & Laman, M. (2012). Atık lastik – kum karışımlarının kayma mukavemetinin laboratuvar deneyleriyle incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(2), 27-35.
35. Çabalar, A.F., Akbulut, N. & Aydın, A. (2016). Gaziantep'teki kil zeminlerin kırmataş ile iyileştirilmesi ve atık lastik-kırmataş karışımları üzerine bir çalışma. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(2), 1-14.



Kahramanmaraş Depremi'nin İnşaat Maliyetleri ve Faaliyet Hacmi Üzerine Etkileri: 2020–2024 Dönemi Karşılaştırmalı Analizi

Özge ALBOĞA^{1,a}

¹Çukurova Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Adana, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-2848-8373

Makale Bilgileri

Geliş : 24.11.2025

Kabul : 19.12.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1829266

Sorumlu Yazar

Özge ALBOĞA

albogaozge@gmail.com

Anahtar Kelimeler

İnşaat maliyet endeksi

Deprem

Çimento üretimi

İnşaat sektörü

Zaman serisi

Atf şekli: ALBOĞA, Ö., (2025). Kahramanmaraş Depremi'nin İnşaat Maliyetleri ve Faaliyet Hacmi Üzerine Etkileri: 2020–2024 Dönemi Karşılaştırmalı Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(4), 993-1006.

ÖZ

Bu çalışmada, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş merkezli depremin inşaat sektöründe maliyet baskısı, üretim davranışı ve faaliyet hacmi üzerindeki etkileri, 2020–2024 dönemine ait İnşaat Maliyet Endeksi (İME), çimento üretim miktarları, yapı ruhsatı verilen bina sayıları ve Tüketici Fiyat Endeksi (TÜFE) ile ilgili veriler kullanılarak analiz edilmiştir. Deprem öncesi ve sonrası farkı bağımsız örneklem t-testleri ve çoklu doğrusal regresyon ile değerlendirilmiş; maliyetlerin zamansal yapısını incelemek üzere SARIMA modeli uygulanmıştır. Bulgular, deprem sonrası İME'nin yaklaşık %225 oranında arttığını ve bu artışın istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. Regresyon sonuçları, deprem ve TÜFE'nin İME üzerinde anlamlı etkiler yarattığını; çimento üretimi ve ruhsat göstergelerinin ise kısa dönemde maliyet değişimini açıklamadığını ortaya koymuştur. SARIMA modeli, trend ve mevsimselliğin varlığını doğrulamış ve deprem sonrası maliyet rejiminin kalıcılığını göstermiştir. Sonuçlar, depremin sektörde yapısal maliyet artışlarına yol açtığını ve üretim–yatırım göstergelerinin daha gecikmeli uyum sağladığını göstermektedir.

The Effects of the Kahramanmaraş Earthquake on Construction Costs and Activity Volume: A Comparative Analysis of the 2020–2024 Period

Article Info

Received : 24.11.2025

Accepted : 19.12.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1829266

Corresponding Author

Özge ALBOĞA

albogaozge@gmail.com

Keywords

Construction cost index

Earthquake

Cement production

Construction industry

Time series

How to cite: ALBOĞA, Ö., (2025). The Effects of the Kahramanmaraş Earthquake on Construction Costs and Activity Volume: A Comparative Analysis of the 2020–2024 Period. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(4), 993-1006.

ABSTRACT

This study analyzes the impact of the February 6, 2023 earthquake in Kahramanmaraş on cost pressures, production dynamics, and activity levels within the construction sector, utilizing data from the Construction Cost Index (CCI) for the period 2020–2024, cement production amounts, the number of given building permits, and the Consumer Price Index (CPI). The disparity before and after the earthquake was assessed utilizing independent sample t-tests and multiple linear regression; the SARIMA model was employed to analyze the time course of costs. The results indicate that the CPI increased by almost 225% following the earthquake, and this rise is statistically significant. The regression analysis indicated that the earthquake and CPI significantly influenced the IME, however cement output and permit indicators did not account for short-term cost variations. The SARIMA model validated the existence of trends and seasonality, indicating that the post-earthquake cost regime has become permanent. The findings demonstrate that the earthquake resulted in heightened structural costs within the industry, but production-investment metrics adjusted with a significant delay.

1. GİRİŞ

Türkiye, deprem açısından yüksek riskli bir ülkedir ve tarih boyunca pek çok yıkıcı depreme maruz kalmıştır. Yıkıcı depremler yalnızca can ve mal kayıplarına yol açmakla kalmayıp, aynı zamanda ekonomik dengeleri, üretim kapasitesini ve sektörel faaliyetleri önemli ölçüde etkilemektedir [1]. Son altmış yılda deprem kaynaklı kayıpların, ülkedeki tüm afet türlerinden kaynaklanan toplam kayıpların yaklaşık %70'ine karşılık gelmesi [2], bu etkinin sürekliliğini ve kapsamını açık şekilde ortaya koymaktadır. Bu durum, depremlerin ülke ekonomisi ve sektörler üzerindeki etkisinin kapsamlı ve sürekli bir nitelik taşıdığını göstermektedir.

Bu çerçevede, 6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş merkezli olarak meydana gelen ve 11 ili etkileyen depremler hem doğrudan fiziksel yıkımın boyutu hem de ortaya çıkardığı geniş kapsamlı ekonomik sonuçlar itibarıyla yakın dönemin en büyük ölçekli afetlerinden biri olarak değerlendirilmektedir [3,4]. Dünya Bankası'nın değerlendirmelerine göre, bu depremlerin yol açtığı doğrudan fiziksel hasarın yaklaşık 34,2 milyar dolar, yeniden inşa ve iyileştirme maliyetlerinin ise bu rakamların çok daha üzerinde gerçekleşeceği tahmin edilmektedir [5]. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yapılan hasar tespit çalışmaları da afetin ölçeğini desteklemekte olup, acil yıkılacak, yıkık veya ağır hasarlı konut sayısı 518.009, orta hasarlı konut sayısı 131.577, az hasarlı konut sayısı ise 1.279.727 olarak raporlanmıştır [6]. Bu hasar tablosu, bölgenin yeniden inşa sürecinin uzun yıllara yayılacağını ve inşaat sektörünün afet sonrası ekonomik toparlanmanın merkezinde yer aldığını göstermektedir.

Depremin ardından inşaat sektörü hem talep hem arz yönlü baskıların aynı anda arttığı bir dönem yaşamıştır. Talep tarafında, konut yenileme ve yeniden inşa ihtiyacı, güçlendirme çalışmaları, hasarlı yapı stoğunun hızlı dönüşümü ve kamu destekli projelerin hızlanması sektörel faaliyet hacmini genişletmiştir. Arz tarafında ise, malzeme fiyatlarında dalgalanmalar, tedarik zinciri kesintileri, lojistik maliyetlerinde artış, çimento ve çelik gibi temel girdilerde kapasite baskıları, işçilik maliyetlerindeki yükseliş ve üretim süreçlerindeki kesintiler gibi unsurların maliyet artışları üzerinde baskı oluşturduğu değerlendirilmektedir. Nitekim Şubat 2023 döneminde İME'nin bir önceki yılın aynı ayına göre %72,37 oranında artması [7] sektördeki maliyet şokunun büyüklüğünü açık biçimde göstermektedir.

Uluslararası literatürde, büyük ölçekli depremlerin üretim kayıpları, maliyet artışları, tedarik zinciri kesintileri ve yatırım kararlarındaki belirsizlikler yoluyla ekonomiyi çok boyutlu biçimde etkilediği belirtilmektedir [8,9]. Afet sonrası dönemde özellikle inşaat sektörüne yönelik talebin arttığı, konut yenileme ve yeniden inşa ihtiyaçlarının malzeme piyasalarında kısa vadeli baskı oluşturduğu vurgulanmaktadır [9-12]. Türkiye'de de 6 Şubat depremleri sonrasında hem konut talebinde hem inşaat malzemesi talebinde güçlü artışlar gözlemlendiği ve bu durumun fiyat baskılarında belirgin bir artışa katkı sağladığı değerlendirilmektedir [13].

Literatürde deprem etkilerine ilişkin çalışmalar çoğunlukla konut fiyatları, finansal piyasalar ve firma performansları gibi makro göstergelere odaklanmakta; buna karşılık inşaat sektörünün maliyet yapısı, üretim süreçleri ve faaliyet hacmi üzerindeki etkiler daha sınırlı biçimde ele alınmaktadır [12–23]. Bu çalışmada, inşaat sektörünün temel göstergeleri olan İME, çimento üretimi, yapı ruhsatı verilen bina sayısı ile genel fiyat düzeyini temsil eden TÜFE değişkeni birlikte ele alınmıştır. Bu kapsam, maliyet davranışlarının sektörel arz–talep koşulları ve makroekonomik fiyat hareketleri çerçevesinde incelenmesine imkân tanımaktadır. Böylelikle depremin maliyet, üretim ve faaliyet hacmi üzerindeki olası etkilerinin daha bütüncül bir değerlendirme ile ele alınması amaçlanmıştır.

Bu çalışmanın temel amacı, 6 Şubat depremlerinin ardından inşaat sektöründe ortaya çıkan maliyet dinamiklerini ve ilgili sektörel göstergelerdeki değişimleri nesnel bir çerçevede incelemektir. İnşaat maliyetlerindeki değişimin üretim ve ruhsat göstergeleriyle birlikte ele alınması, deprem sonrası sektörün içinde bulunduğu ekonomik ve operasyonel koşulların daha sağlıklı bir şekilde anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Bu kapsamda maliyet davranışlarını açıklayan ilişkileri incelemek için çoklu doğrusal regresyon modeli; serinin zaman içindeki hareketlerini değerlendirebilmek için ise SARIMA yaklaşımı kullanılmıştır. Böylece depremin sektörel etkileri hem ekonomik belirleyiciler hem de zamansal dinamikler yönünden ele alınmış; elde edilen bulguların sektörün yeniden yapılanma sürecine ilişkin değerlendirmelere ışık tutması beklenmektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Depremlerin ekonomik etkileri üzerine yapılan çalışmalar, afetlerin yalnızca fiziksel hasarla sınırlı kalmadığını, makroekonomik göstergelerden sektörel faaliyetlere, maliyetlerden tedarik zincirlerine kadar geniş bir alanda etkiler yarattığını göstermektedir. İlgili literatür genel olarak üç ana eksenle şekillenmektedir: makroekonomik etkiler, konut ve gayrimenkul piyasaları ile inşaat sektörü ve girdi piyasalarına ilişkin bulgular.

Makroekonomik etkiler üzerine yapılan çalışmalarda, büyük ölçekli depremlerin üretim kapasitesinde geçici veya kalıcı düşüşlere yol açtığı; kamu harcamalarını artırdığı, ekonomik büyüme, istihdam ve yatırım kararlarını etkilediği belirtilmektedir. Antoniadou [14], afetlerin düşük gelirli ülkelerde ekonomik toparlanmayı yavaşlattığını, gelişmekte olan ekonomilerde ise maliyetleri artırarak kamu finansmanı üzerinde baskı yarattığını belirtmiştir. Aquino ve arkadaşları [8], büyük depremlerin tedarik zinciri kesintileri, altyapı hasarları ve üretim kayıpları yoluyla ekonomik sistemde çok boyutlu etkiler yarattığını göstermektedir. Benzer şekilde Dinçer ve arkadaşları [15] tarafından yapılan çalışmada da 6 Şubat depremlerinin işgücü, tedarik zinciri, pazarlama faaliyetleri ile işletmelerin finansal ihtiyaçları ve kırılganlık düzeyleri üzerinde çeşitli makroekonomik etkiler yarattığı belirtilmiştir.

Konut ve gayrimenkul piyasaları özelinde yapılan çalışmalar ise deprem sonrası fiyat dinamiklerini ortaya koymaktadır. Mikawa [16] tarafından yapılan çalışmada Japonya'da 2011 depreminin, zemin koşullarına bağlı olarak arazi ve konut fiyatlarını düşürdüğünü vurgulanmıştır. Cheung ve arkadaşları [17] ise Oklahoma'da orta ve yüksek şiddetteki depremlerin konut fiyatlarını düşürüp satış sürelerini uzattığını belirtmişlerdir. Buna karşılık, Toparlak [18] tarafından 6 Şubat depremlerinin etkilerini incelemek amacıyla yapılan çalışmada, depremden etkilenen bölgeler ve çevre şehirlerde artan konut talebinin fiyatlara anlamlı biçimde yansımadağı sonucuna ulaşılmıştır. Çalışmada bu durum, Türkiye'de konut fiyatlarının 2019 sonrasında enflasyon, yatırım amaçlı talep ve inşaat maliyetleri gibi faktörler nedeniyle zaten güçlü bir yükseliş eğiliminde olmasıyla açıklanmaktadır.

İnşaat sektörü ve girdi piyasaları üzerine yapılan çalışmalar ise daha çok maliyet yapıları, malzeme arz-talep dengesi, üretim süreçleri ve yeniden inşa faaliyetleri üzerine odaklanmaktadır. Chang ve arkadaşları [19], 2008 Wenchuan depreminde tuğla, agrega ve çimento gibi en çok ihtiyaç duyulan yapı malzemelerinde %30-127 oranında fiyat artışı yaşandığını vurgulamaktadır. Çimento üretimi, birçok ülkede yeniden inşa faaliyetlerinin en önemli göstergelerinden biri olarak kabul edilmekte; talep baskısı, üretim planlaması ve kapasite kullanım oranlarına ilişkin önemli bilgiler sunmaktadır [20]. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde betonarme yapılaşmanın yaygın olması, çimentoyu afet sonrası üretim ve maliyet dinamiklerinin en hızlı tepki veren bileşenlerinden biri hâline getirmektedir [21,22].

Yapı ruhsatları ise literatürde inşaat faaliyetlerinin öncü göstergesi olarak kullanılmaktadır. Ruhsat hareketliliği, yatırım kararlarının yönünü yansıtmakta ve inşaat faaliyet hacmine ilişkin önemli sinyaller üretmektedir [23]. Afet sonrası dönemlerde ruhsat sayılarında geçici düşüşler yaşanması, belirsizlik ortamı ve idari süreçlerdeki yavaşlamayla ilişkilendirilirken, yeniden inşa sürecinin başlamasıyla birlikte ruhsat hareketliliğinin artabileceği ortaya konmuştur [9,24].

Literatürde 6 Şubat depremleri sonrası yapılan çalışmalar genellikle firmaların ekonomik performansları, konut fiyatları, bölgesel hasar analizleri, demografik etkiler ve afet yönetimi süreçlerine odaklanmıştır [9,13,21,24,25]. Oysa deprem gibi büyük ölçekli bir şokun, sektörün üretim kapasitesi, maliyet yapısı ve yeni yapılaşma eğilimleri üzerindeki etkisinin bütüncül olarak değerlendirilmesi, hem yeniden inşa sürecinin dinamiklerini anlamak hem de politika yapıcılar için kanıta dayalı bir çerçeve oluşturmak açısından önem taşımaktadır [12].

Bu çalışmada, 6 Şubat 2023 depreminin inşaat maliyetleri ve sektörel faaliyet hacmi üzerindeki etkileri İME, çimento üretim hacmi, yapı ruhsatı verilen bina sayısı ve genel fiyat düzeyini temsil eden TÜFE kullanılarak incelenmektedir. Türkiye'de çimento üretiminin betonarme yapılaşmadaki merkezi rolü [26], bu göstergenin sektörel üretim dinamiklerini değerlendirmede önemli bir konuma sahip olmasını sağlamaktadır [20]. Türkiye Çimento Sanayicileri Birliği (TÜRKÇİMENTO) tarafından yayımlanan aylık üretim verileri, deprem öncesi ve sonrası dönemin karşılaştırılmasına olanak tanıyan uygun bir zaman serisi yapısı sunmaktadır. Ayrıca TÜFE'nin modelde yer alması maliyet artışlarının yalnızca sektörel dinamiklerden değil, aynı zamanda makroekonomik koşullardan etkilenip etkilenmediğini

değerlendirebilmeye olanak sağlayarak analiz çerçevesini güçlendirmektedir. Öte yandan zaman serisi yaklaşımının kullanılması ise deprem sonrası dönemde maliyetlerde gözlenen trend değişimleri ve mevsimsel döngülerin belirlenmesine imkân tanıyarak zamana bağlı etkilerin daha kapsamlı biçimde incelenmesini sağlamaktadır.

Sonuç olarak, maliyet, üretim ve faaliyet hacmi göstergelerinin birlikte ele alınması, afet sonrası inşaat sektöründe ortaya çıkan yapısal ve zamansal değişimlerin daha açık biçimde izlenmesine imkân vermiştir. Elde edilen bulgular, yeniden inşa sürecine yönelik ekonomik değerlendirmelerin yapılmasında yararlı olabilecek güncel bir analitik çerçeve sunmakta ve literatürdeki çalışmaları tamamlayıcı nitelikte katkılar sağlamaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Çalışmada Türkiye’de 6 Şubat 2023 depreminin inşaat sektörü üzerindeki etkisini incelemeye olanak tanımak amacıyla İME, çimento üretim miktarları, TÜFE ve yapı ruhsatları ile ilgili veriler deprem öncesi ve sonrası dönemleri (2020 Ocak – 2024 Aralık) kapsayacak şekilde toplanmıştır. İME ile yapı ruhsatlarına ilişkin aylık veriler Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından yayımlanan resmi istatistiklerden elde edilmiştir. Çimento üretim hacmine ilişkin aylık seri ise TÜRKÇİMENTO tarafından sağlanan sektör verilerinden oluşturulmuştur. Böylelikle maliyet, üretim ve yatırım göstergeleri aynı dönem aralığında ve karşılaştırılabilir nitelikte analiz edilebilmiştir.

3.2. Yöntem

Çalışmada, depremin inşaat sektörü üzerindeki etkilerini belirlemek için amacıyla tanımlayıcı istatistikler, t-testi, çoklu doğrusal regresyon modeli ve zaman serisi analizi bir arada kullanılmıştır. Analizler Microsoft Excel, Python 3.12 ve SPSS (v22) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

3.2.1. Tanımlayıcı İstatistikler

Tanımlayıcı istatistikler bir veri setinin istatistiksel olarak genel özelliklerini tanımlayan ölçülerdir. Bu çalışmada da veri setinin yapısını değerlendirmek amacıyla İME, çimento üretimi, yapı ruhsatları ve TÜFE değişkenlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler hesaplanmıştır. Ortalama, standart sapma ve minimum–maksimum değerleri kullanılarak değişkenlerin dağılımı analiz edilmiştir.

3.2.2. T-Testi

T-testi, iki ayrı olay grubunun ortalamalarını veya tek bir olay grubunun farklı zamanlardaki ortalamalarını karşılaştırmak için kullanılmaktadır [27]. Bu çalışmada da depremin göstergeler üzerindeki kısa dönemli etkisini ortaya koymak amacıyla deprem öncesi ve sonrası dönemler karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda İME, çimento üretimi, TÜFE ve yapı ruhsatlarının aylık ortalamaları hesaplanmış ve iki dönem arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı bağımsız örneklem t-testleri ile değerlendirilmiştir. Deprem öncesi ve sonrası dönemlerin karşılaştırılması, çalışmanın sonraki aşamalarında uygulanacak olan analizlerin yorumlanması açısından da temel bir çerçeve sunmaktadır.

3.2.3. Çoklu Doğrusal Regresyon

Çoklu doğrusal regresyon bir bağımlı değişkenin birden fazla bağımsız değişkenle sebep sonuç ilişkisini inceleyen matematiksel bir modeldir [28]. Bu çalışmada da İME’deki değişimlerin hangi faktörlerle ilişkili olduğunu ortaya koymak amacıyla çoklu doğrusal regresyon analizi uygulanmıştır. Modelde, İME bağımlı değişken olarak ele alınmış; çimento üretimi, yapı ruhsatı sayıları, TÜFE ve deprem dummy değişkeni bağımsız değişkenler olarak kullanılmıştır. Ayrıca deprem nedeniyle oluşan zaman kırılmasını temsil etmek amacıyla, literatürde yaygın olarak kullanılan bir ‘etki dönemi’ kukla değişkeni (deprem öncesi = 0, deprem sonrası=1) modele eklenmiştir [18,24]. Bu değişken, deprem sonrası dönemde ortaya çıkan genel makroekonomik koşulların (yeniden inşa faaliyetleri, arz-talep değişimleri, tedarik zinciri etkileri vb.) İME

üzerinde ortalama bir seviye etkisi oluşturup oluşturmadığını test etmeyi sağlamaktadır. Böylece model, maliyet değişiminin üretim kapasitesi ve yatırım eğilimlerini ne ölçüde ilişkili olduğunu değerlendirmeye imkân vermektedir. Regresyon analizinin varsayımlarını değerlendirmek amacıyla bağımsız değişkenler arasındaki çoklu doğrusal bağlantı Variance Inflation Factor (VIF) değerleri ile kontrol edilmiştir.

3.2.4. Zaman Serisi Analizi

İME'nin zamana bağlı yapısını değerlendirmek ve regresyon modeliyle elde edilen bulguları zaman serisi perspektifinden tamamlayıcı biçimde incelemek amacıyla, Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama'nın (ARIMA) mevsimsel uzantısı olan ve serinin trend ile mevsimsel bileşenlerini birlikte modelleyebilen Sezonsal Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (SARIMA) yaklaşımı uygulanmıştır. ARIMA modeli, bir zaman serisinin kendi geçmiş değerleri ve geçmiş hata terimleri kullanılarak geleceğe yönelik tahminler üretilmesine olanak sağlayan parametrik bir yöntemdir [29]. Modelin üç bileşeni bulunmaktadır: AR (p): Serinin geçmiş gözlemlerine dayalı otoregresif kısmı, I (d): Seriyi durağanlaştırmak için uygulanan fark alma derecesini, MA (q): Geçmiş hata terimlerinin modele dahil edildiği hareketli ortalama kısmını ifade eder [30]. Mevsimsel etkilerin bulunduğu serilerde ise SARIMA modeli tercih edilmektedir [31]. SARIMA, ARIMA'nın mevsimsel bir uzantısı olup serideki mevsimsel otoregresif, mevsimsel fark alma ve mevsimsel hareketli ortalama bileşenlerini ayrıca modele dahil eder. Böylece hem serinin genel trendi hem de tekrarlayan dönemsel hareketleri aynı model çerçevesinde tahmin edilebilir. Bu çalışmada İME serisinin aylık yapısı nedeniyle SARIMA yaklaşımı tercih edilmiştir. Model seçiminde önce auto_arima yöntemi kullanılmış; bu yöntemin bulunmadığı durumlarda ise farklı (p, d, q) ve mevsimsel (P, D, Q, m) parametre kombinasyonlarının denendiği bir grid-search yaklaşımı ile en düşük AIC değerine sahip model belirlenmiştir. Elde edilen optimal model, seriyi durağanlaştırmak için gerekli olan fark alma (d) ve mevsimsel fark alma (D) işlemlerini içermektedir. Deprem etkisini zaman serisi perspektifinden inceleyebilmek amacıyla model yalnızca deprem öncesi dönem verileriyle eğitilmiş ve deprem sonrası dönem için ileriye yönelik tahminler üretilmiştir.

3.2.5. Tahmin Performansının Değerlendirilmesi

Çalışmada, regresyon ve zaman serisi modellerinin tahmin performansını karşılaştırmak için literatürde yaygın kullanılan iki hata ölçütü olan Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error, MAE) ve Kök Ortalama Kare Hatası (Root Mean Square Error, RMSE) değerleri kullanılmıştır [32,33]. MAE, tahmin edilen değerler ile gerçekleşen değerler arasındaki farkların mutlak değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmakta ve hataların ortalama büyüklüğünü doğrudan yansıtmaktadır. RMSE ise hata terimlerinin kareleri üzerinden hesaplandığı için özellikle büyük sapmalara daha duyarlı bir ölçüt sunmaktadır. Her iki ölçüt de regresyon modeli tarafından üretilen tahminler ile SARIMA modeli tarafından oluşturulan ileriye dönük tahminler için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, Kahramanmaraş depreminin inşaat maliyetleri ile sektörün faaliyet hacmi üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen istatistiksel analizlerin bulguları sunulmaktadır. İlk olarak deprem öncesi ve sonrası dönemlerde temel göstergelerde ortaya çıkan düzey farklılıklarını inceleyen tanımlayıcı istatistikler incelenmiştir. İlk olarak çalışmada incelenen tüm değişkenlerin ortalama, standart sapma, minimum ve maksimum değerleri Çizelge 1'de özetlenmiştir.

Çizelge 1. Deprem öncesi ve sonrası dönemlere ilişkin tanımlayıcı istatistikler

Değişken	Dönem	Ortalama	Std. sapma	Minimum	Maksimum	Değişim (%)
İME	Deprem öncesi	390	195	202	829	230
	Deprem sonrası	1.288	282	847	1.616	
Çimento üretimi	Deprem öncesi	6.181.918	1.146.460	3.621.857	7.939.482	11
	Deprem sonrası	6.887.093	1.045.000	3.886.281	8.403.672	
Yapı ruhsatları	Deprem öncesi	10.902	4.098	4.736	23.375	14
	Deprem sonrası	12.473	4.723	6.815	27.293	
TÜFE	Deprem öncesi	681	245	446	1.203	187
	Deprem sonrası	1.956	488	1.241	2.685	

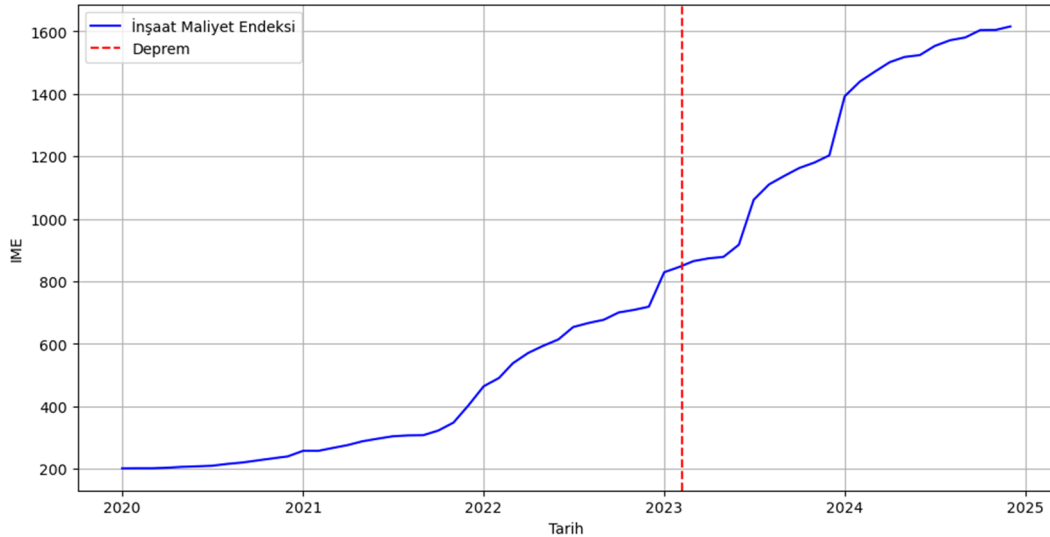
Çizelge 1 incelendiğinde deprem öncesi ve sonrası dönemler arasında tüm temel göstergelerde belirgin düzey farklılıkları olduğunu göstermektedir. İME, deprem öncesi ortalama 390 seviyesinden deprem sonrası 1.288'e yükselmiş ve bu artış yaklaşık %230 oranına karşılık gelmiştir. Çimento üretimi 6.181.918 tondan 6.887.093 tona çıkarak yaklaşık %11, yapı ruhsatı sayıları ise 10.902'den 12.473'e yükselerek %14 oranında artış göstermiştir. TÜFE göstergesi de 681'den 1.956'ya yükselerek yaklaşık %187'lik bir artış sergilemiştir. Bu bulgular, ele alınan tüm değişkenlerin deprem sonrası dönemde anlamlı bir farklılaşma gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Söz konusu farklılıkların istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını değerlendirmek amacıyla bağımsız örneklem t-testi uygulanmıştır. Analizlerde istatistiksel anlamlılık değerlendirmesi %95 güven düzeyi esas alınarak yapılmıştır. Buna göre $p < 0,05$ düzeyinde elde edilen bulguların istatistiksel olarak anlamlı olduğu kabul edilmiştir [13,34]. Analiz sonucunda dört göstergeden üçünde deprem sonrası dönemde istatistiksel olarak anlamlı düzeyde değişim meydana geldiğini, bir göstergede ise artışın yön olarak tutarlı olmakla birlikte anlamlılık düzeyine ulaşmadığını göstermektedir (Çizelge 2).

Çizelge 2. T-testi sonuçları

Değişken	t	p
İME	-14,551	<0,001
Çimento üretimi (ton)	-2,395	0,020
Yapı ruhsatı verilen bina sayısı	-1,362	0,179
TÜFE	-13,440	<0,001

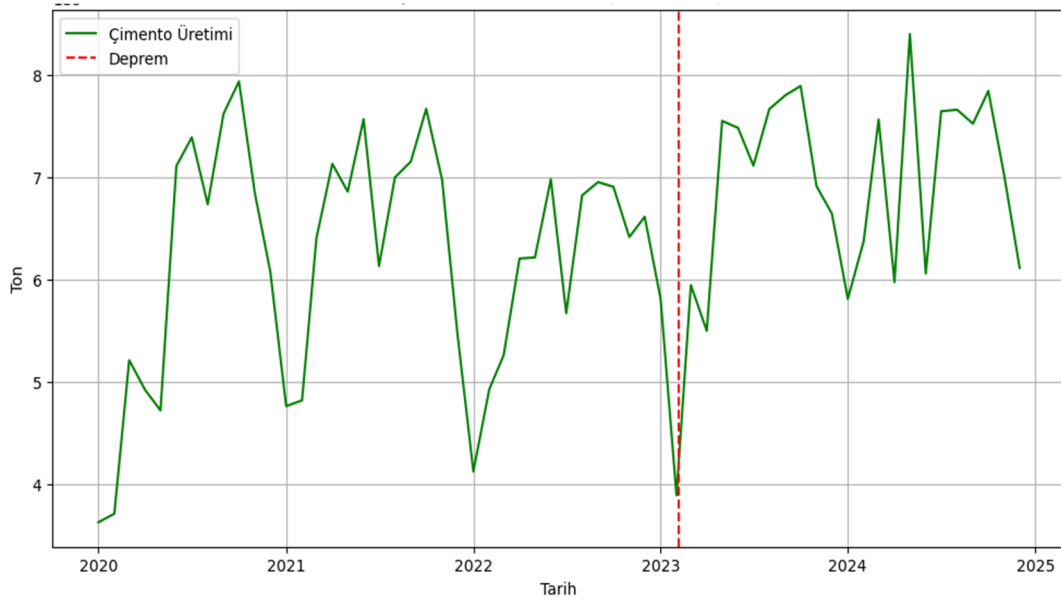
Çizelge 2'de sunulan t-testi sonuçları, İME'nin deprem öncesi ve sonrası dönemler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir artış gösterdiğini ortaya koymaktadır ($t = -14,551$; $p < 0,001$). Tanımlayıcı istatistiklerde hesaplanan yaklaşık %225'lik düzey farkı, bu istatistiksel bulguyu desteklemektedir. Bu sonuç, deprem sonrası dönemde inşaat maliyetlerinin belirgin bir sıçrama yaşadığını ve İME'nin yeni bir seviyeye taşındığını göstermektedir. Literatürde büyük ölçekli afetlerin maliyet dinamikleri üzerinde benzer etkiler yarattığı bulguları da bu durumu desteklemektedir [8,15,35–37]. Bu çerçevede Şekil 1'de İME'nin deprem sonrası dönemde deprem öncesi döneme göre daha dik bir artış eğilimine girdiği açıkça görülmektedir.



Şekil 1. 2020-2024 arası inşaat maliyet endeksinde yaşanan değişimler

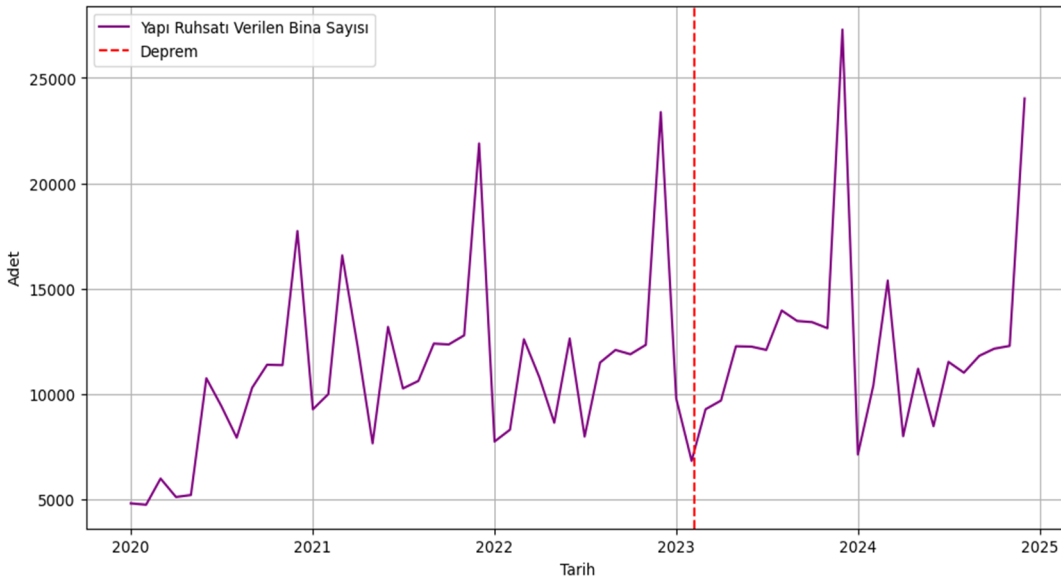
Çimento üretimindeki değişim de deprem sonrası belirgin bir artış göstermekte olup t-testi sonuçlarına göre bu fark istatistiksel olarak anlamlıdır ($p = 0,020$). Şekil 2'de görüldüğü üzere üretim ilk aşamada kısa süreli bir düşüş yaşamıştır. Deprem bölgesinde faaliyet gösteren 10 fabrikanın çimento üretme kapasitesi Türkiye toplam kapasitesinin %16,4'ünü oluşturmaktadır [38]. Depremi ilk aşamasında bu tesislerin bir kısmında enerji iletim hatlarındaki hasarlar, ulaşım altyapısındaki kesintiler ve güvenlik amaçlı geçici durdurular yaşanmış olması, başlangıçtaki üretim düşüşünü açıklamaktadır. Ancak acil barınma ve yeniden inşaat ihtiyacının hızla ortaya çıkmasıyla birlikte bölgedeki çimento talebi artmış; bu talep baskısı üretimin çok kısa sürede toparlanmasına ve deprem sonrası dönemde belirgin bir artış eğilimine girmesine yol açmıştır.

Bu durum, afetlerin üretim kapasitesinde geçici kesintilere yol açsa da yeniden inşa talebinin üretimi hızla yukarı çektiğine işaret eden literatürle tutarlıdır [39-41].



Şekil 2. 2020-2024 arası çimento üretiminde yaşanan değişimler

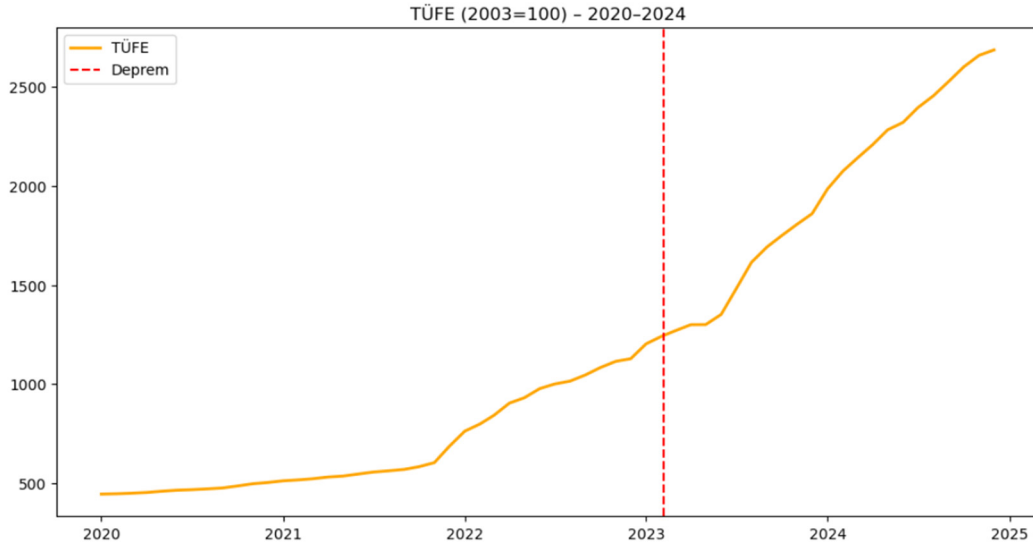
Yapı ruhsatı verilen bina sayısı ise deprem sonrası dönemde artış göstermesine rağmen bu fark istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p = 0,179$). Şekil 3'te yer alan zaman serisi grafiği, ruhsat hareketliliğinin deprem ayı civarında belirgin bir düşüş yaşadığını, toparlanmanın ise birkaç ay gecikmeyle başladığını göstermektedir. Bu durum yatırımcı belirsizliği, hasar tespit ve planlama süreçlerinin zaman alması ve bürokratik izin mekanizmalarının gecikmesiyle açıklanabilir. Nitekim literatürde de afet sonrası yatırım kararlarının üretim ve maliyet göstergelerine kıyasla daha geç tepki verdiği belirtilmektedir [9,18,42].



Şekil 3. 2020-2024 arası yapı ruhsatı verilen bina sayısında yaşanan değişimler

Çizelge 2'de yer alan t-testi sonuçları, TÜFE'nin deprem sonrası dönemde istatistiksel olarak anlamlı bir artış gösterdiğini ortaya koymaktadır ($p < 0,001$). Tanımlayıcı istatistiklerde hesaplanan yaklaşık %187'lik düzey farkı, deprem sonrasında genel fiyat seviyesinin belirgin biçimde yükseldiğini ve maliyet baskılarının sektörel göstergelere paralel şekilde arttığını göstermektedir. Şekil 4'te görüldüğü üzere TÜFE, deprem ayı sonrasında keskin bir yukarı yönlü kırılma sergilemiş ve takip eden aylarda daha yüksek bir bandta kalmıştır.

Bu eğilim, afetlerin ardından ortaya çıkan arz kısıtları, enerji maliyetlerindeki hareketlilik ve yeniden inşa sürecinin yarattığı talep baskısının fiyat dinamiklerine hızla yansıdığına işaret eden literatürle uyumludur [43,44].



Şekil 4. 2020-2024 arası yapı ruhsatı verilen bina sayısında yaşanan değişimler

Çalışmanın bir diğer aşamasında İME' nin belirleyicilerini incelemek amacıyla çoklu doğrusal regresyon analizi yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 3 ve Çizelge 4'te sunulmuştur.

Çizelge 3. Regresyon modeli uyum istatistikleri

R	R ²	Düzeltilmiş R ²	Tahmin std. hatası	p	F
0,995	0,990	0,990	50,260	<0,001	1425,360

Çizelge 3'te sunulan model uyum istatistikleri, kurulan çoklu doğrusal regresyon modelinin İME değişimlerini açıklamada oldukça yüksek bir performansa sahip olduğunu göstermektedir. Modelin R² ve düzeltilmiş R² değeri 0,990 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler bağımsız değişkenlerin İME'deki toplam varyansın yaklaşık %99'unu açıkladığını ortaya koymaktadır. ANOVA sonuçları da modelin genel anlamda istatistiksel olarak anlamlı olduğunu doğrulamaktadır (F = 1425,360; p < 0,001).

Model artıklarına ilişkin inceleme, hata değerlerinin bazı dönemlerde kümelenme eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, aylık verinin trend ve şok unsurlarına duyarlı yapısından kaynaklanmakta olup, doğrusal modellerin zaman içi dalgalanmaları tam olarak temsil etmekte sınırlı kalabileceğini düşündürmektedir.

Çizelge 4. İnşaat maliyet endeksi (İME) için çoklu doğrusal regresyon analizi sonuçları

Değişken	B	Std. hata	Beta	t	p
Sabit	-34,533	38,314	–	-0,901	0,371
Çimento üretimi (ton)	0,000	0,000	0,001	0,050	0,960
Yapı ruhsatları (adet)	-0,001	0,002	-0,009	-0,629	0,532
TÜFE	0,638	0,019	0,923	33,413	<0,001
Deprem kukla değişkeni	85,220	27,263	0,084	3,126	0,003

Çizelge 4'te sunulan katsayılar, İME'nin deprem sonrası dönemde hangi değişkenlerden etkilendiğine ilişkin önemli sonuçlar ortaya koymaktadır. İlk olarak, TÜFE'nin katsayısı pozitif ve yüksek düzeyde anlamlıdır (p<0,001). Bu bulgu, deprem sonrası dönemde maliyet baskısının yalnızca sektörel gelişmelerden değil, makroekonomik fiyat hareketlerinden de etkilendiğini göstermektedir [45]. Deprem kukla değişkeni de istatistiksel olarak anlamlıdır (p = 0,003) ve depremin İME üzerinde ek bir düzey artışı

yarattığını göstermektedir. Bu sonuç, afet sonrası dönemde arz darboğazları, lojistik güçlükler ve yeniden inşa faaliyetleriyle artan talebin maliyetlere doğrudan yansıdığını düşündürmektedir [8,37]. Ayrıca literatüre paralel şekilde deprem sonrası dönemde inşaat sektöründe fiyat baskılarının belirgin biçimde arttığını göstermektedir [44,46].

Buna karşılık, çimento üretimi ($p = 0,960$) ve yapı ruhsatları ($p = 0,532$) modelde anlamlı değildir. Çimento üretimine ilişkin katsayının son derece düşük bir değere sahip olması, üretim hacmindeki değişimlerin kısa dönemli maliyet baskılarını açıklamada sınırlı bir rol oynadığını göstermektedir. Yapı ruhsatlarının etkisinin anlamsız çıkması ise, yatırım kararlarının maliyet hareketlerine kıyasla daha gecikmeli bir dinamikle tepki verdiğini düşündürmektedir. Bu iki değişkenin anlamsızlığı, sektör göstergelerinin deprem sonrası farklı hızlarda uyum sağladığını işaret etmekte olup, t-testi sonuçlarıyla da uyumludur. Literatürde de bazı çalışmalarda büyük ölçekli depremlerin tüm sektörel göstergeler üzerinde anlık ve istatistiksel olarak anlamlı bir etki yaratmadığı rapor edilmiştir. Örneğin 2024 yılında yapılan bir çalışma [18], deprem kukla değişkeninin konut fiyatları üzerinde anlamlı bir etkisinin bulunmadığını belirtmiş ve depremin bazı ekonomik göstergelerde gecikmeli etkiler oluşturduğunu vurgulamıştır.

Bu bulgular, bağımsız değişkenlerin İME üzerindeki etkilerini ortaya koymakla birlikte, modelin güvenilir biçimde yorumlanabilmesi için değişkenler arasındaki olası çoklu bağlantı sorunlarının da değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, Çizelge 5'te regresyonda kullanılan değişkenlere ilişkin Tolerance ve VIF değerleri sunulmuştur.

Çizelge 5. Çoklu bağlantı (multicollinearity) tablosu

Değişken	Tolerance	VIF
Çimento üretimi	0,792	1,262
Yapı ruhsatları	0,826	1,210
TÜFE	0,228	4,394
Deprem	0,240	4,173

Tolerance ve VIF değerleri, modelde ciddi bir çoklu bağlantı sorunu bulunmadığını göstermektedir. Tüm VIF değerlerinin kritik eşik olarak kabul edilen 10'un oldukça altında olması, regresyon katsayılarının güvenilir biçimde yorumlanabileceğini ortaya koymaktadır [47]. TÜFE ve deprem değişkenlerinde VIF değerlerinin diğer değişkenlere kıyasla daha yüksek olması (≈ 4) beklenen bir durumdur; zira deprem sonrası dönemde enflasyonist baskıların hızlanması bu iki değişken arasında doğal bir eş hareketlilik yaratmaktadır. Nitekim afetlerin maliyet bileşenleri üzerinde yarattığı ortak baskıların literatürde de vurgulandığı görülmektedir [15,21].

Regresyon katsayılarının ve çoklu bağlantı analizinin ardından, modelin hata yapısını değerlendirmek amacıyla artık değerlerin dağılımı incelenmiştir. Çizelge 6'da sunulan özet istatistikler, tahmin hatalarının büyüklüğü ve olası aykırı gözlemlerin varlığına ilişkin önemli bilgiler sağlamaktadır.

Çizelge 6. Artık (residual) istatistikleri tablosu

İstatistik	Minimum	Maksimum	Ortalama	Std. sapma
Artık değer	-130,61	104,53	≈ 0	48,53
Std. artık değer	-2,599	2,080	-0,007	0,966

Çizelge 6'da sunulan artık istatistikleri, modelin tahmin performansının genel olarak tutarlı olduğunu göstermektedir. Artık değerlerin ortalamasının sıfıra yakın olması, sistematik bir yönlü hata bulunmadığını; artık değerlerin hem pozitif hem negatif yönde dağılması ise modelin belirli bir yöne eğilimli olmadığını göstermektedir. Standartlaştırılmış artık değerlerin tamamının ± 3 aralığında kalması, literatürde önerilen eşiklere göre modelde aşırı uç ya da sapan gözlem bulunmadığını göstermektedir [48]. Hata değerlerinde deprem sonrasına denk gelen aylarda nispeten daha yüksek oynaklık gözlenmesi, afet sonrası maliyet dinamiklerinde görülen ani kırılmaların model hata yapısına yansıdığını ortaya koymaktadır [6,23,28].

Genel olarak değerlendirildiğinde, model sonuçları İME' deki en güçlü ve belirgin kırılmanın deprem etkisinden kaynaklandığını göstermektedir. Deprem kukla değişkeninin anlamlı ve pozitif katsayısı, afetin maliyet seviyesini yapısal biçimde yukarı taşıdığını ortaya koymaktadır. Buna karşılık çimento üretimi ve yapı ruhsatı sayıları, kısa dönemli maliyet dinamikleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etki oluşturmamıştır. TÜFE'nin güçlü etkisi ise, deprem sonrası maliyet artışının yalnızca sektörel koşullarla değil, aynı zamanda makroekonomik baskılarla şekillendiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, literatürde afetlerin malzeme fiyatları, işçilik maliyetleri, lojistik süreçler ve tedarik zincirlerinde ani baskı yaratarak üretim maliyetlerini hızla artırdığına yönelik bulgularla uyumludur [8,15,21]. Ayrıca bulgular, deprem sonrası politika tasarımlarında maliyet baskılarının dikkatle izlenmesi, yeniden inşa sürecinin planlanmasında fiyat dinamiklerinin gözetilmesi, özellikle malzeme arz kapasitesine yönelik kırılganlıkların azaltılması ve ruhsat süreçlerinin bütüncül bir yeniden yapılanma çerçevesinde ele alınması gerektiğine işaret etmektedir.

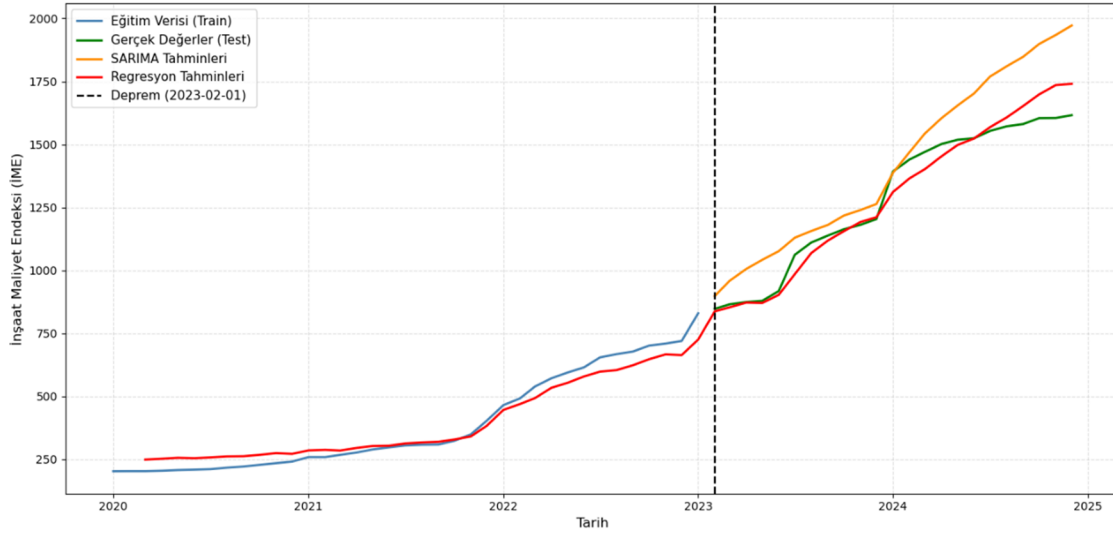
Zaman serisi ve regresyon modellerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi, İME'nin hem ekonomik göstergelerden hem de serinin kendi zamansal bileşenlerinden etkilendiğini göstermektedir. SARIMA (0,2,2)(0,1,0)[12] modelinin AIC değeri 210.92 olup, alternatif yapılandırmalar arasında en uygun model olarak belirlenmiştir. Regresyon modeli, İME'nin ekonomik belirleyicilerini güçlü biçimde açıklamakta ve düşük tahmin hataları üretmektedir (MAE = 38,41; RMSE = 48,12). SARIMA modeli, trend, mevsimsellik ve deprem sonrası dönemde gözlenen ani değişimleri dikkate alan yapısıyla serinin zamana bağlı davranışını daha yakından izleyebilmektedir. Zaman serisi ayrıştırması ve SARIMA sonuçları, İME'nin yıllık döngüsel bir mevsimsellik içerdiğini ve bu yapının maliyet seviyesinde kısa dönemli oynaklıkları belirgin biçimde etkilediğini göstermektedir. Test dönemindeki hata düzeyleri daha yüksek olmakla birlikte (MAE = 137,0; RMSE = 169,7), model tahminlerinin deprem sonrasında oluşan yeni maliyet seviyesine kısa sürede uyum sağladığı gözlenmektedir. Öte yandan İME serisinin mevsimsel fark içermesi, endekste yıl içinde tekrar eden dalgalanmaların bulunduğuna işaret etmektedir. Türkiye'de inşaat faaliyetlerinin iklim koşullarına bağlı olarak dönemsel olarak değişmesi, bazı aylarda maliyet bileşenleri üzerinde nispeten daha belirgin hareketlerin görülmesine neden olabilmektedir. Özellikle üretim ve şantiye faaliyetlerinin daha yoğun olduğu dönemlerde talep yönlü baskılar artabilirken, daha durgun dönemlerde maliyetlerde görece bir normalleşme oluşabilmektedir. SARIMA modelinin mevsimsel bileşeni de bu düzenli dalgalanmaları yansıtarak endeksin dönemsel yapısını daha tutarlı biçimde temsil etmektedir.

Çizelge 7. Modellerin tahmin performansı

Model	MAE	RMSE
SARIMA	137,01	169,73
Regresyon modeli	38,41	48,12

Model sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi, İME'ye ilişkin tahmin başarısının dönemsel olarak model türüne göre değiştiğini ortaya koymaktadır. Çok değişkenli regresyon modeli yapısal ekonomik ilişkilere duyarlı olduğu için deprem öncesinde daha tutarlı tahminler üretmiş; buna karşın SARIMA modeli trend ve mevsimsellik bileşenleri sayesinde hem yıllık döngüsel hareketleri hem de deprem sonrası dönemde oluşan yeni eğilim seviyesini daha doğru bir biçimde takip edebilmiştir. Test döneminde SARIMA'nın daha yüksek hata seviyelerine ulaşması, serideki ani düzey değişiminin tek değişkenli zamansal yapı tarafından sınırlı ölçüde yakalanabilmesinden kaynaklanmaktadır.

Bu çerçevede Şekil 5, gerçek İME değerlerini her iki modelin tahminleriyle birlikte sunarak eğilim farklarını görsel olarak ortaya koymaktadır. Şekil, deprem öncesinde regresyon tahminlerinin gerçek değerlere daha yakın seyrettiğini; deprem sonrasında ise SARIMA modelinin trend hızlanmasını daha güçlü yansıttığını göstermektedir. Bu durumun, afet sonrası maliyetlerde ortaya çıkan ani değişimlerin kısa vadede modeller tarafından sınırlı ölçüde yansıtılmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir [8,9]. Ayrıca mevsimsel dalgalanmaların belirgin olması, bu yapının regresyon tarafından sınırlı ölçüde temsil edilmesine; SARIMA modelinde ise daha net biçimde ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla iki yaklaşımın birlikte ele alınması, deprem sonrası maliyet dinamiklerinin hem ekonomik göstergelerle ilişkili yapısal bileşenlerden hem de serinin trend ve mevsimsellik özelliklerinden etkilendiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 5. İME için SARIMA modeli tahmin sonuçları

Sonuç olarak, çalışmada elde edilen bulgular İME'nin belirleyicilerini açıklama açısından çok değişkenli regresyon yaklaşımının güçlü bir performans sergilediğini ve ekonomik göstergeler ile maliyet dinamikleri arasındaki ilişkileri ayırtma konusunda daha yüksek açıklayıcılık sunduğunu göstermektedir. Model, içsel ve dışsal faktörlerin İME üzerindeki etkilerini birlikte değerlendirerek maliyet hareketlerinin hangi bileşenlerden beslendiğine dair kapsamlı bir çerçeve sunmuştur. Buna karşılık SARIMA modeli, tek değişkenli yapısı gereği serinin trend ve mevsimsellik özelliklerini temsil etme konusunda daha başarılı olmuş, özellikle deprem sonrası dönemde oluşan yeni eğilim düzeyini zaman içindeki değişimlere duyarlı yapısıyla yakalayabilmiştir. Sonuç olarak, İME'nin ekonomik belirleyicilerinin değerlendirilmesinde regresyon modeli daha işlevsel bir araç sunarken, SARIMA modeli serinin içsel dinamiklerini tamamlama niteliği taşımaktadır. Her iki yaklaşımın birlikte kullanılması, maliyet endeksinin hem yapısal faktörlere dayalı dışsal etkilerini hem de zaman içindeki içsel hareketlerini anlamada daha bütüncül bir değerlendirme imkânı sağlamaktadır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş merkezli depremin Türkiye'de inşaat sektörüne yansıyan etkileri, 2020–2024 dönemine ait aylık veriler üzerinden çok boyutlu biçimde incelenmiştir. Analiz kapsamında inşaat maliyetleri, çimento üretimi, yapı ruhsatı verilen bina sayısı ve TÜFE birlikte değerlendirilerek, depremin maliyet baskısı, üretim davranışı ve faaliyet hacmi üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Elde edilen bulgular, depremin sektörde kısa dönemde hem arz hem de talep kanalı üzerinden belirgin etkiler yarattığını ortaya koymaktadır.

Deprem sonrası dönemde inşaat maliyetlerinin önceki döneme kıyasla belirgin şekilde yükseldiği görülmektedir. Grafiksel incelemeler de maliyet seviyesinin depremi izleyen aylarda kalıcı biçimde daha yüksek bir düzeye yerleştiğini ortaya koymaktadır. İnceleme sonuçları, bu artışın dönemsel bir dalgalanmadan ziyade daha yapısal bir nitelik taşıdığını göstermektedir. Regresyon sonuçları, maliyet artışlarının en güçlü belirleyicilerinin deprem etkisi ve genel fiyat düzeyindeki yükseliş olduğunu göstermekte; TÜFE değişkeni yüksek ve anlamlı katsayısıyla bu sonucu desteklemektedir. Buna karşılık çimento üretimi ve yapı ruhsatı sayıları maliyet seviyesindeki değişimleri açıklama gücüne sahip değildir. Modelin düşük hata düzeyleri (MAE = 38,41; RMSE = 48,12) maliyet dinamiklerinin makroekonomik koşullar ve deprem sonrası oluşan arz yönlü baskılarla güçlü şekilde ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Üretim göstergeleri incelendiğinde, çimento üretiminin deprem ayında sert bir düşüş göstermesine rağmen sonraki aylarda hızlı bir toparlanma eğilimi sergilediği görülmektedir. Ruhsat verilerinde ise deprem sonrası kısa süreli bir durgunluğun ardından belirgin bir artış yaşanmıştır. Bu eğilim, deprem sonrasında ortaya çıkan onarım ve yeniden inşa gereksinimlerinin yanı sıra ertelenen yatırımların kademeli olarak devreye girmesiyle açıklanabilir.

Zaman serisi analizi, maliyet dinamiklerinin zamana bağlı davranışına ilişkin ek bir değerlendirme sunmaktadır. SARIMA modeli, deprem sonrasında yalnızca ani bir seviyesel sıçrama değil, aynı zamanda trend hızında kalıcı bir yükseliş gerçekleştiğini göstermiştir. Seride düzenli bir mevsimsel yapı bulunduğu ve kısa dönemli dalgalanmaların bu döngüyle uyumlu biçimde tekrarlandığı görülmektedir. Test döneminde elde edilen hatalar (MAE = 137,0; RMSE = 169,7), özellikle depremi izleyen ilk aylarda maliyetlerdeki olağan dışı oynaklığın modele yansımaları göstermektedir. Buna rağmen modelin genel eğilimi başarılı biçimde izlediği anlaşılmaktadır.

Genel olarak çalışma, depremin inşaat maliyetleri üzerinde güçlü ve ani bir etkisi bulunduğunu; buna karşın sektörün üretim ve ruhsat göstergelerinin duruma daha kademeli bir tepki verdiğini ortaya koymuştur. Bu yönüyle bulgular, Kahramanmaraş depremi benzeri büyük ölçekli yıkımla sonuçlanan afetlerin inşaat sektöründe hem kısa dönemli arz daralmaları hem de yeniden inşa kaynaklı talep artışları yoluyla çok yönlü sonuçlar ürettiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, afet sonrası politika tasarımlarında maliyet baskılarının yakından izlenmesi, tedarik zinciri sorunlarının azaltılması, üretim kapasitesinin korunması ve yeniden inşa sürecinin planlı biçimde yürütülmesinin önemine işaret etmektedir.

Öte yandan bu çalışma bazı sınırlılıklara sahiptir. Analizler ulusal düzeyde aylık verilerle gerçekleştirilmiş olup, bölgesel farklılıklara veya il bazında yeniden inşa dinamiklerine ilişkin ayrıntılı bir değerlendirme yapılamamıştır. Kullanılan göstergeler sektördeki tüm maliyet bileşenlerini tam olarak temsil etmemekte; özellikle işçilik, enerji ve lojistik maliyetlerine ilişkin mikro verilerin bulunmaması model sonuçlarının kapsamını sınırlandırmaktadır. Ayrıca çalışma doğrusal regresyon ve SARIMA modelleri üzerine kurulmuş olup, doğrusal olmayan yapısal kırılmaların etkisini test edebilecek daha gelişmiş yöntemler kapsam dışında bırakılmıştır. Bu çerçevede gelecekte yapılacak araştırmalarda daha ayrıntılı bölgesel veri setlerinin, alternatif zaman serisi yaklaşımlarının ve destek vektör makineleri, rastgele ormanlar veya gradyan artırma yöntemleri gibi makine öğrenmesi modellerinin kullanılması, maliyet dinamiklerinin hem zamansal hem de yapısal bileşenlerinin daha kapsamlı biçimde anlaşılmasına katkı sağlayacaktır.

6. KAYNAKLAR

1. Artantaş, E. ve Gürsoy, H. (2024). Depremin yıkıcı ve ekonomik etkilerini azaltmaya yönelik stratejiler ve Türkiye'nin deprem deneyimlerinden çıkarılacak dersler, Kahramanmaraş ve Gölcük depremleri örneği. *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 17(1), 192-214.
2. Yanılmaz, Ş. ve Gökler Alkan, L. (2025). Deprem riskini azaltmaya yönelik tasarım ilkeleri üzerine bir değerlendirme. *III. International Scientific Review Studies Congress*, Ankara, 63-94.
3. Arslan, H.M. (2025). Deprem sonrası hasar tespit yöntemlerinin irdelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 40(1), 403-414.
4. Akıncı, A.C. ve Ünlüenç, U.C. (2023). 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri: Sahadan jeolojik veriler, değerlendirme ve Adana için etkileri. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(2), 553-569.
5. World Bank Group, (2023). *Earthquake damage in Türkiye estimated to exceed 34 billion USD: World Bank disaster assessment report*.
6. Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, (2023). *Kahramanmaraş ve Hatay depremleri raporu*.
7. Türkiye İstatistik Kurumu. (2025). *İnşaat maliyet endeksi*.
8. Aquino, D.H.M., Domingo, N. & Atapattu, C. (2025). Evaluating the impacts of earthquake disasters on the building construction sector: A SARIMA-based counterfactual analysis. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 127(1), 105695.
9. Sapeciay, Z., Wilkinson, S. & Costello, S.B. (2017). Building organisational resilience for the construction industry. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 8(1), 98-108.
10. Chang, Y., Wilkinson, S., Brunsdon, D., Seville, E. & Potangaroa, R. (2011). An integrated approach: Managing resources for post-disaster reconstruction. *Disasters*, 35(4), 739-765.
11. Chang-Richards, Y., Wilkinson, S., Seville, E., Brunsdon, D. & Potangaroa, R. (2017). Effects of a major disaster on skills shortages in the construction industry. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 24(1), 2-20.
12. Bilau, A.A., Witt, E. & Lill, I. (2015). A framework for managing post-disaster housing reconstruction. *Procedia Economics and Finance*, 21(1), 313-320.

13. Akgemci, A. (2023). Kahramanmaraş merkezli depremlerin firmaların finansal performansları üzerindeki etkisi: İnşaat sektöründe bir uygulama. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 13(2), 47-60.
14. Antoniadou, A. (2025). Breaking the cycle: Financial stress, unsustainable growth, and the transition to sustainability. *Sustainability*, 17(14), 7830.
15. Dinçer, A.E., Dincer, N.N., Tekin-Koru, A., Yaşar, B. & Yılmaz, Z. (2024). The impact of Kahramanmaraş (2023) earthquakes: A comparative case study for Adıyaman and Malatya. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 110(1), 104647.
16. Mikawa, N. (2025). Impact of the 2011 earthquake on the real estate market in Tokyo. *Japan and the World Economy*, 73(1), 101298.
17. Cheung, R., Wetherell, D. & Whitaker, S. (2018). Induced earthquakes and housing markets: Evidence from Oklahoma. *Regional Science and Urban Economics*, 69(1), 153-166.
18. Toparlak, E. (2024). 6 Şubat 2023 depremi Türkiye’de konut fiyatlarını etkiledi mi? TR71 bölgesi örneği. *3rd International Symposium on Insurance, Banking and Finance*, 21-27.
19. Chang, Y., Wilkinson, S., Seville, E. & Potangaroa, R. (2012). Changes in resource need for post-disaster reconstruction: A longitudinal study in China. *Building Research & Information*, 40(3), 327-336.
20. Akpınar, Y. ve Güngör Karyağdı, N. (2025). 6 Şubat 2023 depremi sonrasında inşaat ve çimento sektörlerinde performans analizi: CRITIC-TOPSIS yöntemiyle bir araştırma. *Iğdır Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 38(1), 19-38.
21. Liu, K., Chang-Richards, A., Costello, S.B., L’Hermitte, C. & Li, N. (2024). What factors influence building material supply for post-disaster reconstruction and recovery? A systematic review applying systems thinking. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 114(1), 104981.
22. Singh, B. & Wilkinson, S. (2008). Post-disaster resource availability following a Wellington earthquake: Aggregates, concrete and cement. *Building Resilience: Achieving Effective Post-Disaster Reconstruction*, 33(1), 3-14.
23. Eurostat, (2025). *Building permit index overview*.
24. Baydemir, M. (2025). Deprem ve konut piyasası: Zaman, mekân ve aracı regresyon analizleri. *Uluslararası Akademik Birikim Dergisi*, 8(4), 1017-1027.
25. Acharya, P., Sharma, K. & Liu, F. (2024). Türkiye’s road to recovery after the 2023 Kahramanmaraş earthquake: Lessons from Chile, Japan, and Nepal. *Natural Hazards Review*, 25(1), 1-13.
26. Anagnostou, J., Schlorke, S., Stec, M., Tu, L. & Villar Mallagray, M. (2022). Strengthening sustainability in the cement industry. *FC Sustainability Notes: Manufacturing*, 1(1), 1-16.
27. Aydın, M. ve Karahasanoğlu, H. (2022). Ülke kredi notu görünümünün pay getirileri üzerindeki etkileri: BIST30 endeksi üzerine bir olay analizi. *Bilgi Ekonomisi ve Yönetimi Dergisi*, 17(2), 59-73.
28. Zeydan, İ. (2025). Zonguldak merkez ilçedeki satılık konut fiyatlarına etki eden unsurların çoklu regresyon modelleri ile incelenmesi. *İstanbul Gelişim Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 12(1), 170-189.
29. Aydın, S. (2022). Time series analysis of building construction cost index in Türkiye. *Journal of Construction Engineering, Management & Innovation*, 5(4), 218-227.
30. Aydın, S. (2024). Impact of unexpected conditions on construction cost forecasting performance: Evidence from Europe. *Construction Management and Economics*, 42(6), 787-801.
31. Pongdatu, G.A.N. & Putra, Y.H. (2018). Seasonal time series forecasting using SARIMA and Holt Winter’s exponential smoothing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 407(1), 1-8.
32. Akusta, A. (2024). Konut piyasası trendlerinin çözülmesi: Türkiye’de toplam konut satışlarının tahmini. *Journal of Faculty of Political Science*, 6(1), 113-127.
33. Demircan Keskin, F. ve Soyuer, H. (2022). Bir çimento firmasında istatistiksel zaman serileri yöntemleri ve derin öğrenme ile talep tahminleme. *European Journal of Science and Technology*, 36, 15-20.
34. Yayla, T. & Şahinöz, U. (2020). Preparedness for earthquake: Knowledge and behavior. *Journal of International Health Sciences and Management*, 6(1), 46-59.
35. Kılıçarslan, A. & Uçar, M. (2023). Performance analysis of Borsa Istanbul companies based on periodic financial ratios. *International Journal of Economic Administrative and Academic Research*, 3(1), 1-23.
36. Doğan, Ö. ve Doğan, Ö. (2023). İnşaat sektörü finansal performansının Entropi tabanlı TOPSIS yöntemi ile değerlendirilmesi. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 2023(1), 1-18.

37. Alam, I. & Ali, Y. (2023). Studying the effects of Türkiye earthquake disaster and its impact on real estate industry: A risk analysis based on input–output and non-linear optimization models. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 96(1), 103920.
38. Türkiye Çimento Üreticileri, (2024). *Dünyada ve Türkiye’de çimento sektörü*.
39. Bozdoğan, T., Odabaş, A. & Çetin, Ö.O. (2023). Financial performance of BIST-cement companies: Analysis by TOPSIS and ELECTRE methods. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 2023(1), 491-510.
40. T.C. Sanayi ve Ticaret Bakanlığı, (2023). *Çimento sektör raporu 2023*.
41. Türkiye İMSAD Derneği, (2023). *Türkiye İMSAD aylık sektör raporu*.
42. Saylam Coşkun, A. ve Narin, M. (2025). Afet yönetimi ve ekonomik etkileri. *Bölgesel Kalkınma Dergisi*, 3(1), 49-66.
43. Apostolaki, S., Riga, E. & Pitilakis, D. (2024). Rapid damage assessment effectiveness for the 2023 Kahramanmaraş Türkiye earthquake sequence. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 111(1), 104691.
44. Geylani, Ö. (2025). Analyzing cost efficiency and project scope in post-disaster housing: Reconstruction cases of TOKİ in Türkiye. *Buildings*, 15(1), 1-23.
45. Çatalbaş Karpat, G. (2007). Türkiye’de para arzı ile enflasyon arasındaki ilişkinin parametrik olmayan regresyon analizi ile incelenmesi. *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 9(1), 197-212.
46. Opabola, E.A. & Galasso, C. (2024). A probabilistic framework for post-disaster recovery modeling of buildings and electric power networks in developing countries. *Reliability Engineering and System Safety*, 242(1), 109679.
47. Büyükuysal, M.Ç. ve Öz, İ.İ. (2016). Çoklu doğrusal bağıntı varlığında en küçük karelere alternatif yaklaşım: Ridge regresyon. *Düzce Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(2), 110-114.
48. Field, A. (2018). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics*. Sage Publications.



Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi Yazım Kuralları

Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi mühendislik bilimlerindeki güncel bilimsel ve teknik gelişmeleri araştırmacılara ve mühendislere ulaştırmayı hedeflemektedir. Tüm mühendislik alanları ile ilgili teorik/deneysel ve uygulamaya yönelik çalışmalar Dergi'nin ilgi alanındadır. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi daha önce başka hiçbir yerde yayımlanmamış, özgün ve güncel bilimsel araştırma ve uygulamaları içeren makale ve kısa bildirileri ile Dergi'de daha önce yayımlanmış makalelerle ilgili tartışmaları kabul etmektedir. Çeviri ve derleme makaleler kabul edilmemektedir. Makaleler Türkçe veya İngilizce olabilir. Dergi'ye gönderilen yazılar yayımlansın veya yayımlanmasın iade edilmez. Makaleleri yayımlama yetkisi dergi yayın kuruluna aittir.

Makalenin tamamı bilgisayar ortamında hazırlanmalı baskıya hazır biçimde iki adet (birisinde yazar adları ve adresleri olmamak üzere) **Dergi web sayfasında verilen örnek şablona uygun hazırlanmış olarak elektronik ortamda veya e-posta ekinde gönderilmelidir.**

Makale, A4 (210x297 mm) boyutlu kağıda, Windows uyumlu Word ortamında, Times New Roman font kullanılarak, birer aralıkla yazılmalı, ana başlıklar 12 Punto (koyu), yazar adları 12 Punto (koyu), alt başlıklar ve metin 10 punto olmalıdır.

Çizimler ve çizelgelerle birlikte, makaleler 15 sayfadan, kısa bildiriler 4 sayfadan daha uzun olmamalıdır. **Makale Türkçe ise: Türkçe Başlık, İngilizce Başlık, Öz, Anahtar Kelimeler, Abstract** (İngilizce öz), **Keywords, Metin, Semboller** (gerekliyse), **Teşekkür** (gerekliyse) ve **Kaynaklar**,

Makale İngilizce ise: İngilizce Başlık, Türkçe Başlık, Abstract, Keywords, Öz (Türkçe öz), **Anahtar Kelimeler, Text, Notations** (gerekliyse), **Acknowledgments** (gerekliyse) ve **References** sırası içinde düzenlenmelidir.

Başlık kısa ve açık olmalı, içeriği yansıtabilmelidir. **Öz** (ve **Abstract**) çalışmanın amacını, kapsamını, yöntemini ve ulaşılan sonuçları kısaca tanımlamalı ve 150 kelimeyi aşmamalıdır. En az üç, en fazla beş tane anahtar kelime verilmelidir. Başlık, Öz ve İngilizce başlıklı Abstract birinci sayfaya sığdırılmalı ve ana metin ikinci sayfadan başlatılmalıdır. **Metin** yalın bir dil ve anlatımla yazılmalı, makale Türkçe ise Türkçe, makale İngilizce ise İngilizce yazım kurallarına uygun olmalıdır.

Bölüm ve alt bölüm başlıkları numaralanmalıdır. Eşitlikler (denklemler) numaralanmalı ve bu numaralar satır sonunda parantez içinde gösterilmelidir. Yazılarda yalnızca SI birimleri kullanılmalıdır. Semboller uluslararası kullanıma uygun seçilmeli; her bir sembol ilk kullanıldığı yerde tanımlanmalıdır. Teşekkür olabildiğince kısa olmalı, çalışmaya katkısı ve desteği bulunan kişi ve kuruluşlar belirtilmelidir. Çizelgeler, çizimler ve fotoğraflar metin içine yerleştirilmeli, her birine numara ve başlık verilmeli ve başlıklar çizim ve fotoğrafların altına, çizelgelerin üstüne yazılmalıdır.

Kaynaklar metinde köşeli parantez içinde numaralanmalı ve kaynaklar listesinde metin içinde veriliş sırasına uygun biçimde belirtilmelidir. Etik kuralları gereğince, alıntılar tırnak içinde verilmeli ve bir referans numarası ile kaynak belirtilmelidir. Kaynaklarda şu bilgiler verilmelidir:

Makale ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., yıl. makalenin tam başlığı. derginin adı, cilt, sayı, başlama ve bitiş sayfaları.

Kitap ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., yıl. kitabın tam adı. cilt numarası, varsa editörü, yayınlandığı yer, son sayfa no.

Bildiri ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., yıl. bildirinin tam başlığı. konferansın adı, yapıldığı yer.

Elektronik ortamdan alınmış ise: Bildiri sadece CD/DVD'de yayınlanış ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar, yıl, bildirinin adı. konferansın adı (CD/DVD), yapıldığı yer, yıl. "Konferansın adından hemen sonra parantez içerisinde CD/DVD olduğu belirtilecektir."

Tez ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi., yıl. tezin adı. derecesi, sunulduğu kurum, son sayfa no.

Rapor ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar, yıl. raporun adı. türü, numarası, kuruluşun adı, yayınlandığı yer.

Web Sitesi ise: Yazar(lar) belli ise; yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar, varsa yayınlandığı yıl. yazının başlığı, web adresi (<http://www.xxxxx.xxxx.xxx>), Erişim Tarihi: gün.ay.yıl.

Kurum/Kuruluşlara ait ise: Kurum adı, varsa yayınlandığı yıl. yazının başlığı, web adresi (<http://www.xxxxx.xxxx.xxx>), Erişim Tarihi: gün.ay.yıl.

Elektronik kitap/rapor ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi veya kitap/raporu yayımlayan kurum veya kuruluşun adı, varsa yayınlandığı yıl, konunun tam adı, Erişim Tarihi: gün.ay.yıl.