ISSN: 2757-9255

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ DERGİSİ

CUKUROVA UNIVERSITY JOURNAL OF THE FACULTY OF ENGINEERING

MART
MARCH
2026

Cilt/Volume 41 Sayı/Issue 1

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

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 1 MART/MARCH 2026

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".**

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 1 MART/MARCH 2026

İÇİNDEKİLER

Dikdörtgen-Trapez Profile Sahip Hibrit Oluklu Bir Kanalda Farklı Kanatçık Tasarımlarının Akış ve Isı Transferine Etkisi 1
Effect of Different Winglet Designs on Flow and Heat Transfer in a Hybrid Corrugated Channel with Rectangular-Trapezoidal Profile
Doğukan UYSAL, Selma AKÇAY

Mersin- Anamur Karayolu T3 Tünelindeki Karstik Boşlukların İyileştirilmesinde Kullanılan Yöntemler 17
Methods for Repairing Karstic Voids in the T3 Tunnel on the Mersin-Anamur Highway
Yücel GÜÇ, Sedat TÜRKMEN

Binary and Multi-Class Chest X-Ray Classification for COVID-19 and Pneumonia Detection..... 29
COVID-19 ve Zatürre Tespiti için İkili ve Çok Sınıflı Göğüs Röntgeni Sınıflandırması
Çiğdem Gülüzar ALTINTOP, Tuğba ŞENTÜRK, Fatma LATİFOĞLU

Acoustic Response of Aerogel Fiber Nonwovens: The Contribution of Fiber Crimp..... 45
Aerogel Liflerinden Elde Edilen Dokusuz Yüzey Yapıların Akustik Tepkisi: Lif Kıvrımının Katkısı
Süreyya KOCATEPE

Frequency Selective Surface Used as a Band-Stop Filter in Microwave-Powered Combi System 55
Mikrodalga Kombi Sisteminde Bant Durduran Filtre Olarak Kullanılan Frekans Seçici Yüzey
Emin ÜNAL, Faruk ÖZYURT

Transfer Matrisi Metodu ile Helmholtz Rezonatörlü Periyodik Akustik Metamalzeme Yapısının Sayısal Modellemesi 65
Numerical Modeling of Periodic Acoustic Metamaterial Structure with Helmholtz Resonator Using Transfer Matrix Method
Sinem ÖZTÜRK

Terminal and Fast Terminal Sliding Mode Controls of a SISO Coupled Tank System: A Comparative Performance..... 75
SISO Bağlantılı Tank Sisteminin Terminal ve Hızlı Terminal Kayan Mod Kontrolleri: Karşılaştırmalı Bir Performans Çalışması
Özgür GEYLANİ, Barış ATA

Büyük Veri ile Türkiye'de Hane İnternet Erişim Durumunun Makine Öğrenmesi ve Açıklanabilir Yapay Zekâ ile Analizi 89
Analysis of Household Internet Access Status in Turkey with Big Data Using Machine Learning and Explainable Artificial Intelligence
Tolga TUNÇEL, Emre KILINÇ

Yüksek Binalarda Burkulması Önlenmiş Çaprazların Kullanımının Sismik Performansa Etkisi..... 101
The Effect of Using Buckling-Restrained Braces on the Seismic Performance of High-Rise Buildings
Arslan UÇAR, Seda ÖNCÜ-DAVAS

Optimization of Vertical Machining Parameters of DIN 1.0038 Steels Using Hybrid Taguchi Based Grey-Fuzzy Algorithm in CNC Pocket Milling Process..... 115
CNC Cep Frezeleme Prosesinde Hibrit Taguchi Tabanlı Gri-Bulanık Algoritma Kullanılarak DIN 1.0038 Çeliklerinin Dikey İşleme Parametrelerinin Optimizasyonu
Kaan Emre ENGİN, Uğur EŞME, Mustafa Kemal KÜLEKÇİ

Air Pollution from Transport Sector: Evaluation of Emissions in Yozgat Province 129
Ulaşım Sektöründen Kaynaklanan Hava Kirliliği: Yozgat İlinde Emisyonların Değerlendirilmesi
Nevfel Yunus COŞKUN, Zeki YILBAŞI, Murat Kadir YEŞİLYURT

Geleneksel Görüntü İşleme ve Derin Öğrenmenin Birleşimi Hibrid Model ile El Yazısı Rakam Sınıflandırma 145
Handwritten Digit Classification with a Hybrid Model Combining Traditional Image Processing and Deep Learning
Ethem Sefa KÜÇÜKYILMAZ, Erhan AKIN

Alkali Dayanımlı Cam Elyaf Kullanımının Beton Dayanımına Etkisi..... 155
Effect of Alkali-Resistant Glass Fiber Using on Concrete Strength
Mutlu KURBAN

Stenozlu Dallanmış Bir Damardaki Kan Akışının Newtonyen ve Casson Viskozite Modelleriyle Analizi 165
Analysis of Blood Flow in a Stenosed Branched Vessel Using Newtonian and Casson Viscosity Models
Arif ÇUTAY, Selim KASAPKARA, Özdeş ÇERMİK

Sıkılama Malzemesi Seçiminin Patlatma Performansına Etkisi: Taş Tozu ile Taş Tozu-Mıcır Karışımının Karşılaştırmalı Analizi 181
The Effect of Stemming Material Selection on Blasting Performance: A Comparative Analysis of Pure Stone Dust and Stone Dust-Gravel Mixture
Meriç Can ÖZYURT

Accurate Frequency Control of Energy Storage Systems with a Symbolic Game Theory Approach 195
Sembolik Oyun Teorisi Yaklaşımı ile Enerji Depolama Sistemlerinin Doğru Frekans Kontrolü
Mehmet KURUCAN

A Computational and Applied Approach to Determining the Pollution Load in Urban Wastewater Management in Van Province 213
Van İli Kentsel Atıksu Yönetiminde Kirlilik Yükü Tespitine Yönelik Hesaplamalı ve Uygulamalı Yaklaşım
Ayşegül DEMİR YETİŞ, Ayşe ÖZGÜVEN, Ahmet DURAK

Spectral Analysis of Electric Vehicle Dynamics for Battery Eccentricity Using a Full-Car Model under Random Road Excitation..... 227
Elektrikli Araç Dinamiğinin Rastgele Yol Uyarısı Altında Tam Araç Modeli Kullanılarak Batarya Eksantrikliği için Spektral Analizi
Hikmet BAL

Doğal Gaz Tesisat Firmalarının Gelecek İş Hacminin Tahmini: Mevsimsel ve Kısa Vadeli Dinamiklerin Mevsimsel Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (SARIMA) Modeli ile Analizi..... 241
Forecasting Future Business Volume of Natural Gas Installation Companies: Analysis of Seasonal and Short-Term Dynamics Using the Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (SARIMA) Model
Selin SARAÇ GÜLERYÜZ, Fikri EGE

Province-Level Efficiency Analysis of Public Hospitals in Turkey: A Data Envelopment Analysis and Self-Organizing Maps (SOMDEA) Approach..... 253
Türkiye'de Kamu Hastanelerinin İl Bazlı Verimlilik Analizi: Veri Zarflama Analizi ve Öz-Düzenleyen Haritalar (SOMDEA) Yaklaşımı
Metin ÖZŞAHİN

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 1 MART/MARCH 2026

Dikdörtgen-Trapez Profile Sahip Hibrit Oluklu Bir Kanalda Farklı Kanatçık Tasarımlarının Akış ve Isı Transferine Etkisi

Doğukan UYSAL [1,a], **Selma AKÇAY** [1,b]

[1]*Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Çankırı, Türkiye*

[a]***ORCID***: *0009-0007-1747-0024;* [b]***ORCID***: *0000-0003-2654-0702*

Makale Bilgileri
Geliş : 07.07.2025
Kabul : 25.11.2025
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1736559

Sorumlu Yazar
Selma AKÇAY
selmaakcay@karatekin.edu.tr

Anahtar Kelimeler
Hibrit dalgalı kanal
Isı transferi iyileştirme
Kanatçıklar

Atıf şekli: *UYSAL, D., AKÇAY, S., (2026). Dikdörtgen-Trapez Profile Sahip Hibrit Oluklu Bir Kanalda Farklı Kanatçık Tasarımlarının Akış ve Isı Transferine Etkisi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(1), 1-16.*

ÖZ

Bu çalışmada, dikdörtgen-trapez hibrit oluklu bir kanalda farklı kanatçık yapılarının akış ve ısı transferine etkileri sayısal olarak analiz edilmiştir. Analizler, ANSYS Fluent yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Hız ve basınç ilişkisi SIMPLE algoritması ile çözülmüştür. Çalışmada, dikdörtgen-trapez hibrit oluklu kanal içerisine V-tipi, Y-tipi ve V-Y tipi (hibrit tip) olmak üzere üç farklı kanatçık yerleştirilmiş ve $2000 \leq Re \leq 10000$ Reynolds sayılarında Nusselt sayısı, sürtünme faktörü ve performans faktörü hesaplanmıştır. Sonuçlar, kanatçıkların olmadığı hibrit oluklu kanal ve düz kanal ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre tüm kanatçıklar için artan Re ile ısı transferinin iyileştiği ve basınç düşüşünün arttığı tespit edilmiştir. Kanatçıkların olduğu kanallarda, Re = 10000'de en yüksek ısı transferinin V-tipi kanatçıkta (Nu = 73,90) elde edildiği ve en az basınç düşüşünün Y-tipi kanatçıkta (ΔP = 259,39 Pa) olduğu bulunmuştur. V-tipi kanatçıkların ısı transferini düz kanala göre 4,56 kat, kanatçıkların olmadığı hibrit kanal göre 1,15 kat iyileştirdiği gözlenmiştir.

Effect of Different Winglet Designs on Flow and Heat Transfer in a Hybrid Corrugated Channel with Rectangular-Trapezoidal Profile

Article Info
Received : 07.07.2025
Accepted : 25.11.2025
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1736559

Corresponding Author
Selma AKÇAY
selmaakcay@karatekin.edu.tr

Keywords
Hybrid corrugated channel
Heat transfer improvement
Winglets

How to cite: *UYSAL, D., AKÇAY, S., (2026). Effect of Different Winglet Designs on Flow and Heat Transfer in a Hybrid Corrugated Channel with Rectangular-Trapezoidal Profile. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(1), 1-16.*

ABSTRACT

In this study, the effect of different winglet structures on flow and heat transfer in a rectangular-trapezoidal hybrid corrugated channel was numerically analyzed. The analyses were performed with the ANSYS Fluent software. The velocity and pressure relationship was solved with the SIMPLE algorithm. In the study, three different winglets, namely V-type, Y-type, and V-Y type (hybrid type), were placed in a rectangular-trapezoidal hybrid corrugated channel, and the Nusselt number, friction factor, and performance factor were calculated at Reynolds numbers of $2000 \leq Re \leq 10000$. The results were compared with the hybrid corrugated channel without the winglet and the straight channel. According to the results, it was determined that heat transfer improved and pressure drop increased with increasing Re for all winglets. In the channels with winglet, it was found that the highest heat transfer at Re=10000 was obtained in the V-type winglet (Nu = 73.90) and the minimum pressure drop was obtained in the Y-type winglet (ΔP = 259.39 Pa). It was observed that the V-type winglet improved the heat transfer by 4.56 times compared to the straight channel and by 1.15 times compared to the hybrid channel without winglet.

1. GİRİŞ

Nüfusun artması, teknolojik gelişmelerin daha fazla enerji ihtiyacı doğurması ve yaşam standartlarının yükselmesi gibi faktörler, enerji ihtiyacının sürekli artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, enerji ve ekonomik büyüme arasında güçlü bir bağ bulunmaktadır. Ayrıca, geçtiğimiz yıllarda yaşanan pandemi ve enerji krizleri, enerji üretiminin yanı sıra enerjinin verimli kullanılmasının ve tasarruf edilmesinin ne kadar önemli olduğunu göstermiştir. Bu nedenle pek çok mühendislik uygulamalarında kullanılan termal cihazların etkinliği ve enerji verimliliği büyük önem arz etmektedir [1,2].

Isı transferi iyileştirme yöntemleri, enerji etkinliği ve tasarrufu açısından büyük önem taşımaktadır. Bu yöntemler pasif ve aktif yöntemler olarak ikiye ayrılır. Bazı uygulamalarda pasif ve aktif yöntemlerin birlikte kullanıldığı bileşik yöntemler de kullanılmıştır [3,4]. Pasif ısı transferi iyileştirme yöntemlerinin ilave dış bir enerjiye ihtiyaç duymamaları, bu yöntemin önemli bir avantajını oluşturmaktadır. Ayrıca bu yöntemler, dinamik parçalar içermediği için ekonomiktir, yapıları kolaydır, arıza gibi durumlar söz konusu olmadığından yatırım ve işletme maliyetleri de düşüktür [5,6]. Bu yöntem, ısı transfer yüzey alanını artırmak için dalgalı/oluklu kanalların kullanılmasını ve kanal yüzeylerine yapılan düzenlemeleri, kanal içine ilave edilen türbülatörleri ve vorteks üreteçleri gibi modifikasyonları içermektedir [1-3].

Dalgalı/oluklu yüzeyler, kanalın ısı transfer yüzey alanını genişletir ve akışkanın kanal yüzeyleri ile temasını artırır, böylece ısı transferinin iyileşmesine neden olurlar. Oluklu ve dalgalı kanallar aynı zamanda kendi kendine akış salınımları üretirler. Bu salınımlar, akış karışımının iyileşmesini sağlar. Homojen bir akış, kanal içindeki sıcaklık farklarını önleyerek ısı transferini artırır [7,8]. Farklı geometrilere sahip oluklu ve dalgalı yüzeylerin akış ve ısı transfer davranışı, pek çok deneysel ve sayısal çalışmalarla araştırılmıştır [7,8-12]. Yapılan çalışmalarda, oluk profilinin geometrisi, oluk sayısı, genliği ve oluklar arasındaki mesafenin akış ve ısı transferine etkileri araştırılmış ve oluklu kanallarda ısı transferinin, düz kanallara göre daha yüksek olduğu kanıtlanmıştır [13-16].

Pasif yöntemlerden bir diğeri ise kanala bölme, kanat/kanatçık gibi düzenlemelerin eklenmesidir. Kanala ilave edilen bu modifikasyonlar, kanal içerisinde ısı transferinin artırılması istenilen bir yöne veya bölgeye akışı yönlendirmektedir. Ayrıca bu bölme ve kanatçıklar, akışta türbülans etkilerini artırarak akış karışımını iyileştirmektedir [3,17,18]. Farklı geometrik tasarımlara sahip kanatçıkların akış ve ısı transferine etkileri pek çok araştırmalar ile incelenmiştir [19-21]. Kanatçık ilavesinin kanalda basınç düşüşünü bir miktar artırmakla birlikte termal performansta artış meydana getirdiği bildirilmiştir [3,4,22-24]. Ancak, ısı transferini iyileştiren bu düzenlemeler, akışa karşı bir direnç oluşturdukları için basınç düşüşünde bir artış kaçınılmaz olmaktadır. Basınç düşündeki artış pompalama maliyetini artırmaktadır. O nedenle basınç düşüşünü çok fazla artırmadan ısı transferini iyileştiren kanatçık tasarımları halen araştırılmaktadır.

Sungur ve arkadaşları [25] boru içine yerleştirilen konik türbülatör sayısının ısı transferine etkisini sayısal bir çalışmada araştırmışlardır. Çalışmada kullanılan türbülatör sayısı $0 \leq N \leq 13$ ve Reynolds sayısı için $4500 \leq Re \leq 8000$ aralığını kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, türbülatör sayısındaki artışın basınç kaybının artışına neden olduğunu ve $N = 13$ durumunda Nusselt sayısında %10 artış görüldüğünü bildirmişlerdir. Boukhadia ve arkadaşları [26] plakalı kanatlı ısı eşanjöründe akışkan akışı ve ısı transfer özelliklerini $500 \leq Re \leq 1900$ aralığı için sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında, basınç düşüşünü azaltmak amacıyla kanatçıklarda farklı geometride (üçgen, dikdörtgen ve dairesel) delikler oluşturmuşlardır. Çalışma sonucunda, termal performans faktörünün dairesel delikler için 2,14, dikdörtgen delikler için 1,57 ve üçgen delikler için 1,46 olduğunu bulmuşlardır. Garelli ve arkadaşları [27] delta kanatlı girdap üreteçleri kullanarak panel tipi radyatörlerde ısı transferinin iyileştirilmesine yönelik sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, hücum açısı 30°, 40° ve 50°, giriş hızı 0,3–1,05 m/s, giriş sıcaklığı 303 K ve duvar taban sıcaklığı 340 K olarak almışlardır. En yüksek termal iyileşmeyi %10 olarak 30° hücum açısında elde ettiklerini belirtmişlerdir. Tian ve arkadaşları [28] silindirik bir alüminyum boru içerisine yerleştirilen üçgen kanatçıklı dikdörtgen plakaların termal performansını $4000 \leq Re \leq 12000$ aralığında sayısal olarak araştırmışlardır. Önceki çalışmaları ile kıyaslama yaptıklarında yeni tip tasarımın %11 daha yüksek ısı transferi sağladığını tespit etmişlerdir. Hassani ve arkadaşları [29] dikdörtgen bir kanal boyunca farklı düzenlemelerde kavisli türbülatörlerin deneysel ve sayısal analizini 3 farklı tipte kanatçık kullanarak araştırmışlardır. Düz kanala göre kanatçık kullanımının %43,5–%99,1 oranında ısı transferini artırdığını ve basınç düşüşünün 5,5–12 kat yükseldiğini tespit etmişlerdir. Dairesel olarak tasarlanmış kanatçığın diğer kanatçıklara göre daha yüksek performans gösterdiğini ifade etmişlerdir. Turgut [30] çalışmasında iç içe geçen eş eksenli iki borunun arasındaki ısı transferini dairesel kesitli türbülans üreticileri

kullanarak 10000 ≤ Re ≤ 42000 aralığı için sayısal olarak araştırmıştır. Kanatçıklardaki delik çaplarını ve türbülatörlerin arasındaki mesafeyi değiştirerek çalışmaları gerçekleştirmiştir. En yüksek ısıl performansı Re = 10000, kanatçık arası mesafe 15 cm, delik çapları 0,5 cm ve delik sayısı 2 olduğu durumda elde edildiğini bildirmiştir. Sun ve arkadaşları [31] çoklu dikdörtgen kanatçıklı girdap üreteçlerine sahip dairesel bir ısı eşanjöründe türbülanslı akışın termo-hidrolik performansını deneysel olarak çalışmışlardır. Çalışmalarında, kanatçık sayılarını N = 4, 6, 8; kanatçık yüksekliklerini H = 2,55 mm, 5,1 mm, 10,2 mm ve kanatçık aralıklarını 80 mm, 160 mm, 240 mm olarak almışlardır. Kanatçıkların sayısındaki artışın daha iyi akış karışımına neden olduğunu ve daha homojen sıcaklık dağılımı elde edildiğini belirtmişlerdir. Nusselt sayısı ve sürtünme faktörünün kanatçık yükseklikleri ile doğru orantılı olarak arttığını bildirmişlerdir. Yükseklik faktörü = 0,005, PR = 1,57, N = 8 ve Re = 6135 parametrelerinde maksimum termal iyileşme elde ettiklerini ifade etmişlerdir.

Ameur ve arkadaşları [32] bir ısı değiştiricisinde iki farklı geometride delikli kanatçıklar kullanarak 0 ≤ Re ≤ 300 aralığındaki Reynolds sayıları için ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. En yüksek ısı transferini elips delikli kanalda Re = 300'de elde etmişlerdir. Basınç düşüşünün ise dairesel delikli kanatçıkta daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Alnak [33] bölmeler içeren üçgen dalgalı bir kanalda 200 ≤ Re ≤ 1000 aralığı için bölme yüksekliklerinin ve bölme aralıklarının ısı transferine etkilerini sayısal olarak incelemiştir. Reynolds sayısındaki artışın ısı transferini arttırdığını ifade etmiş ve bölme aralıkları 20 mm ve bölme yükseklikleri 4 mm olduğunda en yüksek ısı transferine ulaşıldığını belirtmiştir. Tahmasebian ve arkadaşları [34] bir dizi vorteks üreteci ile dalgalı kanalın ısı transferini RANS modeli ile 1000 ≤ Re ≤ 4000 aralığında, 2 farklı kanatçık tipi (a ve b tip) için sayısal olarak analiz etmişlerdir. Isıl performansın, boş kanala göre, a tipi kanatçık tasarımında %28,5, b tipi kanatçık tasarımında %27 arttığını bulmuşlardır. Wu ve arkadaşları [35] sinüzoidal dalgalı kanatçık tipi girdap üreteçli kanatlı borulu ısı eşanjörünün termo-hidrolik performansını ve ekserji analizini 1057 ≤ Re ≤ 2054 aralığında ve 30°, 45°, 60° hücum açılarında sayısal olarak incelemişlerdir. Kanatçıkların konumlarının akışı belirgin şekilde etkilediğini ve en yüksek performansa 60° hücum açısında ulaşıldığını tespit etmişlerdir. Wang ve arkadaşları [36] Al_2O_3-su nanoakışkanın bir mikro kanalda üç farklı girdap üreteçlerinin (yuvarlak, elmas ve oval tip) 340 ≤ Re ≤ 640 aralığındaki akış hızlarında termal performans üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Düz kanala kıyasla Re = 340 için girdap üreteçli olan kanalların performans değerinde %30 iyileşme olduğunu ifade etmişlerdir. Brodnianská ve Kotšmíd [21] silindirik girdap üreteçleri ile dalgalı bir ısı eşanjöründe ısı transferi iyileşmesini 778 ≤ Re ≤ 7930 aralığını için sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır. Sonuçta tasarlanan girdap üreteçlerinin ısı transferini 2,48 kat artırdığını bulmuşlardır. Çelik ve Akçay [37] sinüzoidal dalgalı bir kanalda dairesel engellerin akış ve ısı transferini sayısal bir çalışmada incelemişler ve dairesel engellerin çapı arttıkça ısı transferinin ve basınç düşüşünün arttığını bildirmişlerdir.

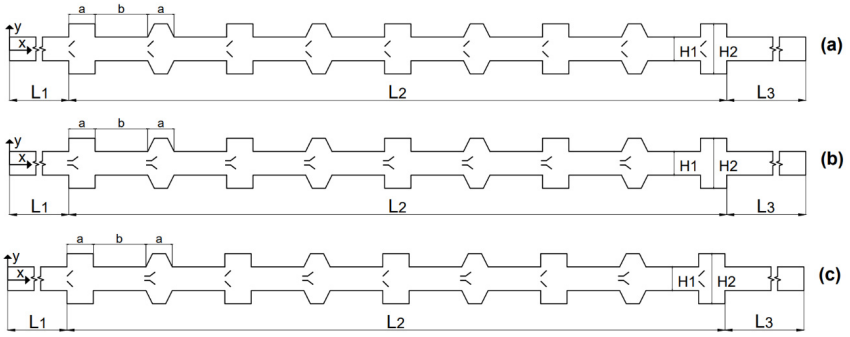
Önceki çalışmalarda, farklı geometrilere sahip dalgalı ve/veya oluklu kanallarda akış ve ısı transferinin incelendiği ancak bu kanallarda kullanılan oluk profillerinin üniform bir yapıda olduğu anlaşılmaktadır. Literatür çalışmalarında kanal geometrisi olarak genellikle klasik dalga profili olarak bilinen uniform yapıda tek tip dalga profilinin kullanıldığı ya da düzensiz sınırlara sahip dalga profil geometrilerinin incelendiği görülmektedir. Bu çalışmada, klasik tipte iki dalga profilinin aynı kanalda dönüşümlü olarak kullanıldığı hibrit dalgalı kanal tanımlanmıştır. Kanatçıkların olduğu kanallarda ise kanal geometrisinin genellikle dairesel kesit alanına sahip olduğu ve/veya tek bir tasarımdaki kanatçık profilinin incelendiği görülmektedir. Bu çalışmada dikdörtgen-trapez profilleri içeren hibrit oluklu bir kanalda üç farklı kanatçık -tasarımının (V-tipi, Y-tipi ve V-Y hibrit tip) sürekli ve türbülanslı akış şartlarında akış ve ısı transferi sayısal olarak analiz edilmiştir.

2. YÖNTEM

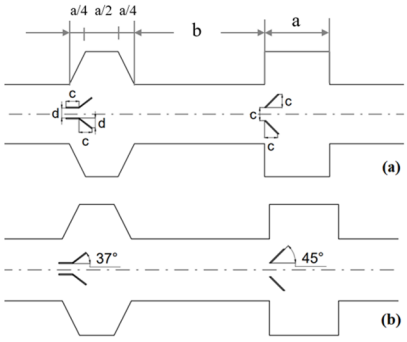
2.1. Sayısal Model

Şekil 1'de V-tipi kanatçık (a), Y-tipi kanatçık (b) ve V-Y tip hibrit kanatçık (c) tasarımlarını içeren dikdörtgen-trapez (DT) hibrit oluklu kanal geometrileri gösterilmiştir. Çalışmada kullanılan "hibrit dalgalı kanal", dikdörtgen ve trapez dalga profilinin aynı kanalda dönüşümlü olarak kullanılmasıyla oluşturulan dalgalı kanalı ifade etmektedir. Kanalın maksimum ve minimum yüksekliği sırasıyla H_2 = 38 mm ve H_1 = 18 mm'dir. Kanalların giriş ve çıkışında sırasıyla L_1 = 360 mm ve L_3 = 500 mm uzunluğunda ısıtılmamış düz bölümler bulunmaktadır. Dalgalı bölümün uzunluğu L_2 = 500 mm'dir. Dalga profilinin genişliği a = 20

mm ve dalgalı bölümler arasındaki mesafe b = 40 mm'dir. Trapez dalga profili, üst kenarı 10 mm olan ikiz kenar yamuktan oluşmaktadır. Kanalın ısıtılmış uzunluğu (L_2), toplamda 9 adet dalga profilini içermektedir.



Şekil 1. DT hibrit dalgalı kanalda kullanılan kanatçık tipleri (a) V-tipi kanatçık, (b) Y-tipi kanatçık, (c) V-Y tipi hibrit kanatçık



Semboller	Sayısal değer
a	20 mm
b	40 mm
c	4 mm
d	3 mm
H_1	18 mm
H_2	38 mm
L_1	360 mm
L_2	500 mm
L_3	500 mm

Şekil 2. Hibrit oluklu kanalda kanatçıkların yerleşimi ve geometrik özellikleri

Hibrit oluklu kanal içerisine her oluk profiline birer adet kanatçık yerleştirilmiştir. Kanatçıklar, kanalın merkezine ve olukların başlangıcından itibaren konumlandırılmıştır. Şekil 2'de kanatçıkların geometrik özellikleri ve kanal içerisindeki yerleşimleri detaylı olarak verilmiştir. Kanatçık geometrisinde d = 3 mm ve c = 4 mm olarak belirlenmiştir. Hibrit kanatçıklarda ise dikdörtgen oluk içerisine V-tipi kanatçık, trapez oluk içerisine ise Y-tipi kanatçık yerleştirilmiştir. V-tipi kanatçık x ekseni ile 45°, Y tipi kanatçık x ekseni ile 37° açı yapmaktadır.

2.2. Korunum Denklemleri

Çalışmada iş akışkanı olarak hava kullanılmıştır. Akışkan Newton tipi, sıkıştırılamaz özelliktedir ve türbülanslı olarak sürekli şartlarda akmaktadır. Akışkan özelliklerinin sıcaklıkla değişmediği varsayılmaktadır. Akışkanın termofiziksel özellikleri Çizelge1'de verilmiştir. Viskoz yayılım terimleri, yerçekimi ve ışınımla ısı transferi dikkate alınmamıştır. Bu varsayımlara göre süreklilik, momentum ve enerji denklemleri Eşitlik (1-4) ile verilmiştir [3, 12]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \mu_t)\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right)\right] - \rho\overline{u_i' u_j'} \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c \bar{T}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\Gamma + \Gamma_t)\left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j}\right)\right] \tag{3}$$

$$-\rho\overline{u_i' u_j'} = (\mu_t)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \tag{4}$$

Standart k-ε türbülans yaklaşımı kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu önceki çalışmalarla bildirilmiştir [12]. Bu nedenle çözümlerde viskoz model olarak

standart duvar fonksiyonu ile k–ε türbülans modeli kullanılmıştır. Türbülans modelindeki türbülans kinetik enerji (k) ve spesifik türbülans yayınımı (ε) parametrelerine ait denklemler ve kullanılan sabitler Uysal ve Akçay [3] çalışmalarında detaylı olarak paylaşılmıştır.

Çizelge 1. Akışkanın termofiziksel özellikleri (300K)

Materyal	Yoğunluk (kg/m^3)	Özgül ısı (kJ/kgK)	Isıl iletkenlik (W/mK)	Viskozite (kg/ms)
Hava	1,225	1006,43	0,0242	0,000017894

2.3. Sayısal Yöntem ve Sınır Şartları

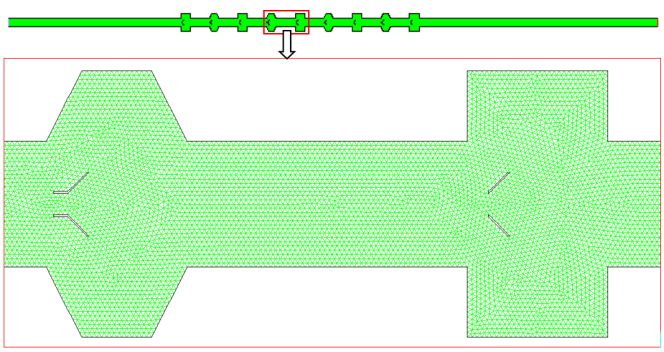
Çalışmada, modelin iki boyutlu geometrisi Gambit yazılımı ile oluşturulmuş ve ardından çözüm alanı küçük hücrelere ayrılmıştır. Sayısal modele yapılandırılmamış ağ yapısı uyarlanmış ve hücreler üçgen elemanlardan oluşmuştur. Eleman kalitesinin 0,89, çarpıklık (skewness) değerinin 0,18 ve hücrelerin en boy oranını temsil eden "aspect ratio" değerinin 2,37 olduğu belirlenmiştir. Bu değerler, sayısal modelin ağ metriklerinin kabul edilebilir değerlerde olduğunu göstermektedir. Çalışmada boyutsuz mesafenin $y^+ < 1$ olduğu tespit edilmiş ve ilk ağ tabakası sınır tabaka içinde kalmıştır. Hibrit kanatçıklar ile DT hibrit dalgalı kanal için oluşturulan ağ yapısı Şekil 3'te sunulmuştur. Sayısal çözümlerin ağ sayısından etkilenmediğini tespit etmek için ağ bağımsızlık testi uygulanmış ve ağ bağımsızlık testi sonucu kanallara uyarlanan eleman sayıları Çizelge 2'de gösterilmiştir. Böylece seçilen ağ yoğunluğunun hem hesaplama maliyeti hem de çözüm hassasiyeti açısından yeterli olduğuna ve yapılan analizlerin ağdan bağımsız güvenilir sonuçlar ürettiğine karar verilmiştir. Ağ bağımsızlık testi sonucuna ait detaylar ve akış ve ısı transferine ait eşitlikler, Uysal ve Akcay [3] tarafından yapılan çalışmada verilmiş ve tekrardan kaçınmak amacıyla bu çalışmada paylaşılmamıştır.

Düz kanalda Re ≤ 2300 değeri laminer akış şartlarını göstermektedir. Dalgalı kanallarda laminerden türbülansa geçiş büyük ölçüde kanalın geometrisine ve akış özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterir. Bu nedenle dalgalı kanallarda laminerden türbülansa geçiş bu değerden daha önce olmaktadır. Yapılan çalışmalarda, dalgalı kanallarda genel olarak laminerden türbülansa geçişin Re ≥ 1100 değerinden sonra başladığı ve tam türbülansın ise yaklaşık Re ≥ 1800 değerinde meydana geldiği bildirilmiştir [38-40]. Ayrıca çözümler, 2000 ≤ Re ≤ 6500 aralığındaki Reynolds sayıları için önceki çalışmalarla karşılaştırılmış (Şekil 5) ve sonuçların uyumlu çıkması da bu durumu desteklediğini göstermektedir. Bu nedenle mevcut çalışmanın türbülanslı akış koşullarında gerçekleştiği varsayılmıştır.

Zontul ve arkadaşları [12] tarafından yapılan deneysel ve sayısal çalışmada, dikdörtgen dalgalı bir kanalda, üç boyutlu çalışma sonuçları ile iki boyutlu sayısal çalışma sonuçları arasında kayda değer bir fark görülmediğini ve bu nedenle sayısal çalışmalarını 2D olarak gerçekleştirdiklerini bildirmişlerdir. Buna istinaden bu çalışmada da çözümler 2D olarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 2. Kanal profiline göre sayısal modele uyarlanan eleman sayıları

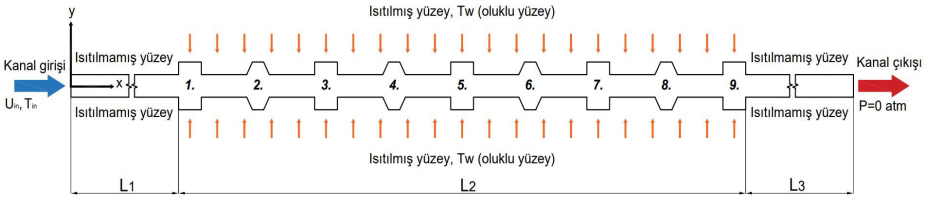
Kanal profili	**Kanatçık tipi**	**Eleman sayısı**
DT hibrit oluklu kanal	-	246293
DT hibrit oluklu kanal	Y tipi	246236
DT hibrit oluklu kanal	V-tipi	246014
DT hibrit oluklu kanal	Y-V-tipi (hibrit)	246524



Şekil 3. Hibrit kanatçıklar ile dikdörtgen trapez hibrit oluklu kanalın ağ yapısı

Sayısal çözümler, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) tabanlı ANSYS Fluent (versiyon 15.0) yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Denklemleri ayrıklaştırmak için ikinci dereceden ileri fark yaklaşımı kullanılmıştır. Hız ve basınç arasındaki ilişki SIMPLE algoritması ile değerlendirilmiştir Yakınsama kriteri, enerji denklemlerinde 10^{-8} ve diğer denklemlerde ise 10^{-5} olarak ayarlanmıştır.

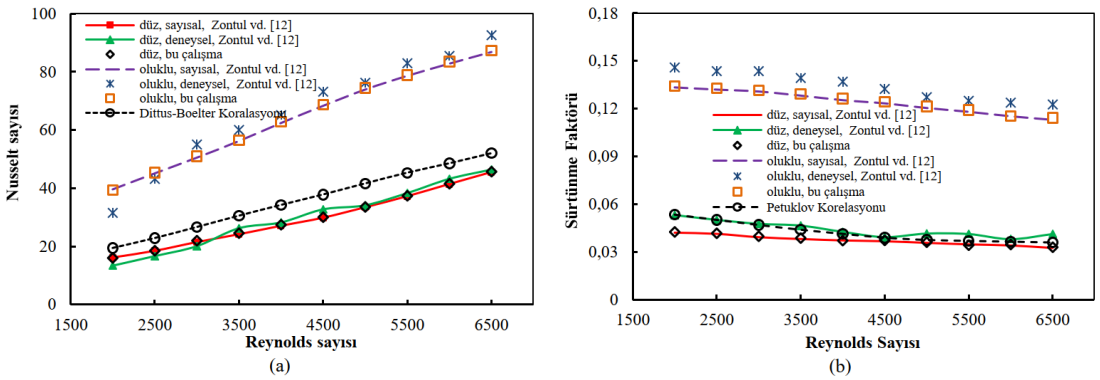
Çözümlerden önce sayısal modele bazı başlangıç ve sınır koşulları tariflenmiştir. Akışkan, ortalama bir hız (u_{in}) ve sabit bir sıcaklık (T_{in} = 300 K) ile kanala girmiştir. Akışkanın kanala giriş hızı, Reynolds sayısı ile belirlenmiş olup Reynolds sayısı 2000 ≤ Re ≤ 10000 aralığında değişmiştir. Kaymaz ve adyabatik koşullar, kanalın giriş ve çıkışındaki düz kesitler (L_1 ve L_3) için tanımlanmıştır. Önceki çalışmalarda, sabit sıcaklık sınır şartına sahip kanal duvarlarının genellikle 330 K-380 K aralığında korunduğu görülmektedir [3, 5, 7, 8, 12]. Bu çalışmada ise kanalın alt ve üst dalgalı yüzeyleri (L_2) T_w = 380 K sabit bir sıcaklıkta tutulmuştur [3]. Kanal çıkışında basınç çıkış koşulu kullanılmıştır. Kanatçıklar için adyabatik ve kaymaz sınır şartı tariflenmiştir. Sayısal modeldeki hesaplama alanına uygulanan sınır koşulları Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Çözüm alanına uygulanan sınır koşulları

2.4. Sayısal Çözümlerin Doğrulanması

Sayısal çözümlerin geçerliliğini belirlemek için çalışma sonuçları, önceki sayısal ve deneysel çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır. Doğrulama, Zontul ve arkadaşları [12] tarafından gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çalışma referans alınarak sağlanmış ve benzer akış şartları ve geometri için düz kanalda ve dikdörtgen dalgalı kanalda elde edilen Nusselt sayısı (Nu) ve sürtünme faktörü (f) değerleri üzerinden yapılmıştır. Düz kanal ve dikdörtgen dalgalı kanal için bu çalışmada elde edilen Nusselt sayıları ve sürtünme faktörü değerleri Reynolds sayısına bağlı olarak önceki çalışmaların sayısal ve deneysel sonuçlarıyla [12] karşılaştırılmıştır. Ayrıca çözümler düz kanal için literatürde yaygın olarak kullanılan korelasyonlar ile de karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5'te sunulmuştur. Böylece bu çalışmada elde edilen sonuçların literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırılması yapılarak model doğrulaması gerçekleştirilmiştir.



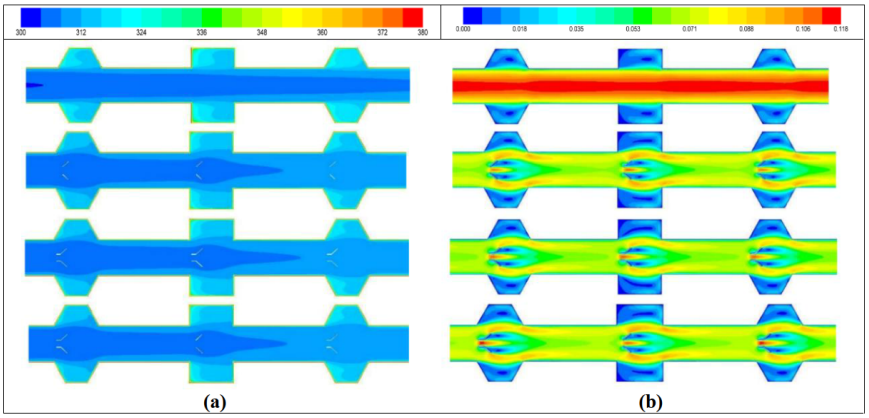
Şekil 5. Çözümlerin doğrulanması, a) Re ile Nu, b) Re ile f

3. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu bölümde, dikdörtgen-trapez hibrit oluklu kanala ilave edilmiş üç farklı kanatçık tasarımının akış ve ısı transferi üzerindeki etkileri 2000 ≤ Re ≤ 10000 aralığındaki Reynolds sayıları için araştırılmış ve tartışılmıştır. Kanatçıların etkisini gözlemlemek için hız ve sıcaklık kontur görüntüleri elde edilmiştir. Daha sonra her bir kanatçık tasarımı için ısı transferi, basınç düşüşü ve performans faktörü hesaplanmış ve sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur. Çalışmada, en az basınç düşüşü ve en fazla ısı transferi sağlayan kanatçık tasarımının belirlenmesine çalışılmıştır.

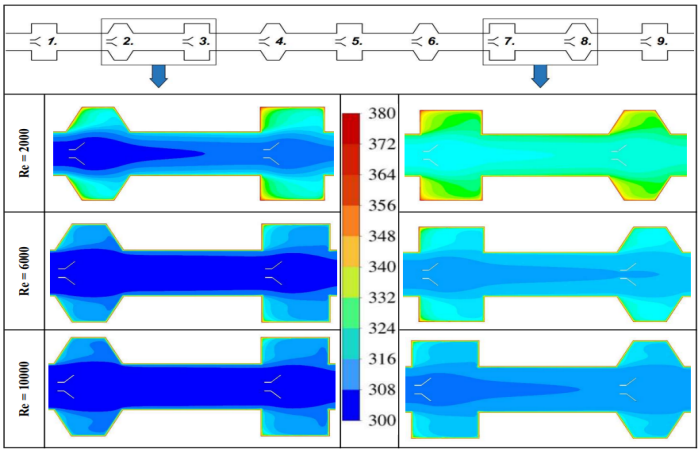
3.1. Kanatçıkların Isı Transferine Etkisi

Şekil 6'da Re = 10000 için DT hibrit dalgalı kanalda V-tipi, Y-tipi ve hibrit kanatçıkların sıcaklık (a) ve hız (b) konturları sunulmuştur. Kontur görüntüleri dalgalı kanalın ortasındaki 3 dalga profillerine (4., 5. ve 6. dalga profilleri) aittir. Hız konturlarında, kanatçıkların etkisiyle akışın üç kola ayrılarak oluk içlerine yönlendirildiği görülmektedir. Bu yönlendirme, soğuk olan akışkanın daha sıcak olan duvar yüzeyleriyle daha fazla temas etmesini sağlayarak ısı transferinin artmasına katkıda bulunmaktadır. Ayrıca akışın oluklu kaviteler içinde oluşturduğu ikincil akış yapıları dikkat çekmektedir. Bu döngüler, homojen bir akışa neden olduğu için önemli olgulardır. Ayrıca, hız konturlarında kanatçıkların ardında düşük basınç bölgelerinin varlığı dikkat çekmektedir (Şekil 6b). Sıcaklık konturlarında ise, dalgalı kaviteler içerisinde akış yönünde sıcaklık gradyanlarının arttığı gözlenmektedir. Her üç kanatçık yapısında da dalgalı yüzeylerin sıcaklığı kanatçıkların olmadığı hibrit kanala göre daha düşüktür. Dalgalı kavitelerde, kavitenin sol tarafında daha yüksek bir sıcaklık gradyanı varken, kavitenin sonunda (sağ tarafında) sıcaklık gradyanının azaldığı görülmektedir. İkincil akış yapıları kavitenin sonundan başlayıp kavitenin başına doğru ilerlediğinden bu bölgelerin sıcaklığı daha düşüktür (Şekil 6a).



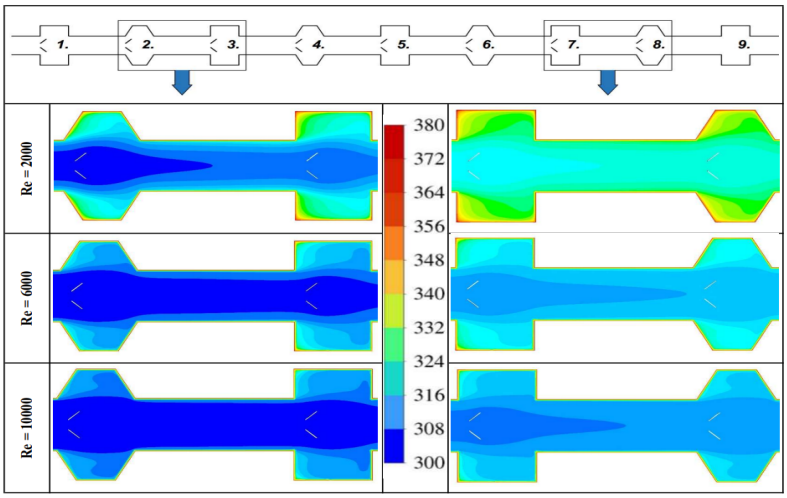
Şekil 6. Y-tipi, V-tipi ve hibrit kanatçıklar için (a) sıcaklık konturları, (b) hız konturları (Re = 10000)

Şekil 7'de farklı Reynolds sayıları için Y-tipi kanatçıklara sahip DT hibrit dalgalı kanalın 2. ve 3. oluklar ile 7. ve 8. oluklara ait sıcaklık konturları gösterilmiştir. Artan Reynolds sayısında kanal içindeki sıcaklık gradyanlarının düştüğü gözlenmiştir. Bunun temel nedeni, akış hızının artmasıyla birlikte olukların içlerine yönlendirilen akışkanın kütlesel debisinin artması, türbülans etkilerinin yükselmesi ve dolayısıyla daha homojen bir karışım sağlamasıdır. Bu süreç, daha düşük sıcaklıklara sahip bölgelerin oluşmasına katkıda bulunmuştur. Ayrıca ısıtılmış yüzeyler incelendiğinde, 2. ve 3. oluklu bölgelerin, 7. ve 8. oluklu bölgelere kıyasla daha düşük sıcaklık değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu farklılık, akışkanın akış yönünde ilerledikçe sıcak yüzeylerden ısıyı alarak kanal çıkışına taşıması ve sıcaklığının kademeli olarak artmasından kaynaklanmaktadır. Böylece, kanalın ilerleyen bölgelerinde sıcaklık gradyanlarının nispeten daha yüksek değerlere sahip olduğu gözlenmiştir.



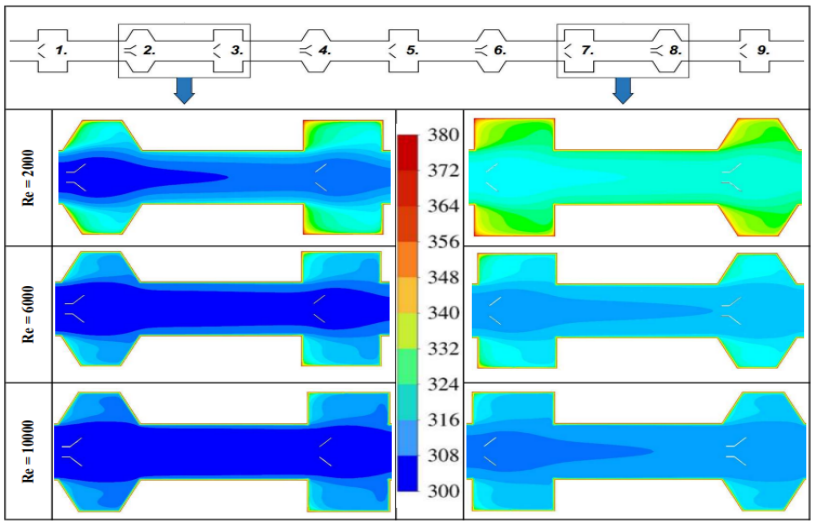
Şekil 7. Farklı Reynolds sayılarında Y-tipi kanatçıklar için sıcaklık konturları

Şekil 8'de, V-tipi kanatçıklara sahip DT hibrit dalgalı kanalın 2. ve 3. oluk ile 7. ve 8. oluklarına ait sıcaklık konturları farklı Reynolds sayılarında sunulmuştur. Şekil 7'de açıklandığı gibi, Reynolds sayısının artması dalgalı kavitelerde yüzey sıcaklığının düşmesine neden olmuştur. Aynı şekilde, 2. ve 3. oluklardaki yüzey sıcaklıkları 7. ve 8. oluklara göre daha düşüktür. Y-tipi kanatçıklara ait sıcaklık olguları V-tipi kanatçıklarda da görülmektedir. Ancak, Y-tipi kanatçık ile kıyaslandığında, V-tipi kanatçığın akışı dalgalı kavitelere yönlendirmesi daha iyidir. Çünkü V-tipi kanatçıklar daha yüksek bir açı ile (45°) akışı dalgalı boşluklara yönlendirirken, Y-tipi kanatçıklar daha düşük bir açı (37°) ile akışı sıcak yüzeylere yönlendirmektedir. Bu nedenle, V-tipi kanatçıkların kullanılması halinde dalgalı kavitelerdeki yüzey sıcaklıklarında daha belirgin bir düşüş gözlenmektedir. Y-tipi kanatçıklara sahip kanalda yüzey sıcaklık dağılımının V-tipi kanatçıklara göre nispeten daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Farklı Reynolds sayılarında V-tipi kanatçıklar için sıcaklık konturları

Şekil 9'da hibrit kanatçıklara sahip DT hibrit dalgalı kanalın 2. ve 3. oluk ile 7. ve 8. oluklarına ait sıcaklık konturları farklı Reynolds sayılarında verilmiştir. Şekil 7 ve 8'de olduğu gibi hibrit kanatçıklarda da akış yönlendirme ve türbülans etkilerinin yüzey sıcaklığını düşürdüğünü göstermektedir. Y-tipi kanatçıklar, trapez profile sahip oluk bölgelerine, V-tipi kanatçıklar ise dikdörtgen profile sahip oluk bölgelerine yerleştirilmiştir. Bu yerleşim, her iki kanatçığın kendi bölgesine özgü etkisini ortaya koymuştur. V-tipi kanatçıklar ile daha keskin yönlendirme etkisiyle oluk bölgelerinde güçlü türbülans yapılarının oluşturulması amaçlanmış, böylece daha düşük sıcaklık profilleri elde edilmesini sağlamıştır.

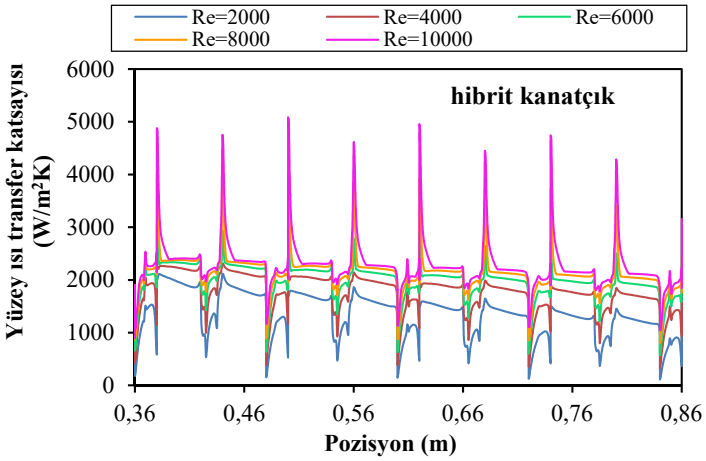


Şekil 9. Farklı Reynolds sayılarında hibrit kanatçıklar için sıcaklık konturları

Y-tipi kanatçıklar ise akışı yumuşak bir şekilde yönlendirerek daha düşük sürtünme ile yine de belirli düzeyde türbülans etkisi oluşturmuştur. Bu farklı kanatçık tiplerinin kombine kullanımı ile kanal içinde

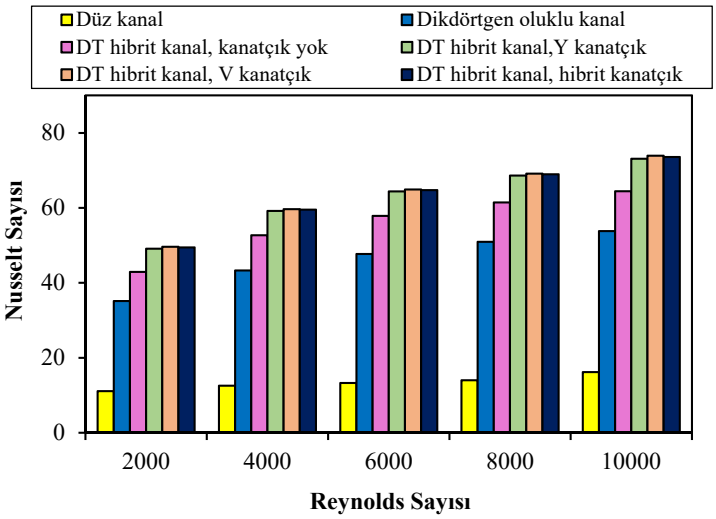
hem ısı transferi hem de akış yapısı açısından dengeli ve etkili bir performans ortaya konması amaçlanmıştır. Kanatçıklar içermeyen DT hibrit dalgalı kanalın sıcaklık konturları ile karşılaştırıldığında (Şekil 6), kanatçıkların olmadığı DT hibrit kanalda yüksek Reynolds sayısında dahi dalgalı kavitelerde oldukça yüksek sıcaklık gradyanı görülürken, kanatçıklara sahip DT hibrit kanalda sıcaklık gradyanının oldukça azaldığı görülmektedir. Bu durum kanatçıkların kullanılmasının ısı transferine önemli katkı sağladığını göstermektedir.

Şekil 10'da DT hibrit dalgalı kanal içerisine yerleştirilen V-tipi ve Y-tipi kanatçıkların kombinasyonundan oluşan hibrit kanatçıklar için, farklı Reynolds sayılarında alt dalgalı yüzey boyunca elde edilen yüzey ısı transfer katsayılarının değişimi verilmektedir. Her üç kanatçık konfigürasyonu için oluklu kavitelerin bitimine doğru belirgin ısı transfer zirveleri dikkat çekmektedir. Yüzey ısı transfer katsayısının Reynolds sayısındaki artışla birlikte yükseldiği açıkça görülmektedir. Ancak bu artış her Reynolds sayısında aynı oranda gerçekleşmemiştir. Özellikle $Re \leq 6000$ durumunda ısı transfer katsayısında daha belirgin bir artış gözlenirken; $Re \geq 6000$ değerlerinde bu artış oranının azaldığı ve ısı transfer katsayısı değerlerinin birbirine yaklaştığı gözlenmiştir.



Şekil 10. Hibrit kanatçıklar için yerel ısı transfer katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi

Şekil 11'de, tüm kanal geometrileri ve kanatçık yapılarında Reynolds sayısı ile Nusselt sayısının değişimi gösterilmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlar, düz kanal, dikdörtgen dalgalı kanal ve DT hibrit dalgalı kanal ile de karşılaştırılmıştır. Tüm kanal akışlarında Reynolds sayısı arttıkça Nusselt sayısının arttığı görülmektedir. Tüm Reynolds sayılarında dalgalı kanallar ve kanatçıklara sahip kanallarda ısı transferinin düz kanala göre oldukça yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yine kanatçıklara sahip hibrit kanallarda ısı transferi, dikdörtgen dalgalı kanaldan ve DT hibrit dalgalı kanaldan daha yüksek bulunmuştur.



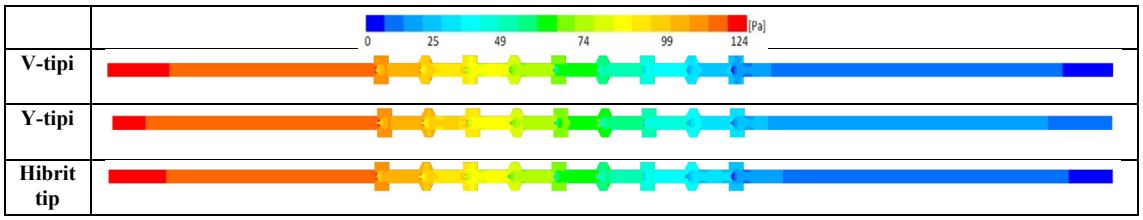
Şekil 11. Reynolds sayısı ile Nusselt sayısının değişimi

Re = 10000 için Nusselt sayıları incelendiğinde, en düşük ısı transferi Nu = 16,19 olarak düz kanalda elde edilmiştir. Bu durum, kanallarda dalgalı yüzey geometrilerinin ısı transferi üzerindeki etkisini net biçimde ortaya koymaktadır. Dalgalı profile sahip kanallar arasında ise en düşük Nusselt sayısı dikdörtgen dalgalı kanalda (Nu = 53,80) elde edilmiştir. DT hibrit dalgalı kanalda ise dikdörtgen dalgalı kanallara göre daha yüksek Nusselt sayısı (Nu = 64,42) elde edilmiştir. Kanatçık eklenmesiyle birlikte ısı transfer performansında belirgin bir iyileşme elde edilmiştir. Hibrit kanala Y-tipi kanatçık eklendiğinde, ısı transferi Nu = 73,10'a yükselmiştir. V-tipi kanatçık kullanıldığında, Nu = 73,90 olarak en yüksek değerine ulaşırken hibrit kanatçıklarda ise Nu = 73,58 olduğu tespit edilmiştir. Kanatçıklar arasında en yüksek ısı transferi V-tipi kanatçıkta elde edilmiş, bunu hibrit kanatçık ve Y-tipi kanatçık takip etmiştir. V-tipi kanatçık kullanılan hibrit dalgalı kanalda ısı transferi düz kanala göre 4,56 kat iyileşme göstermiştir. Yine V-tipi kanatçıklara sahip hibrit dalgalı kanalda Nusselt sayısı, kanatçıkların olmadığı hibrit dalgalı kanal göre yaklaşık 1,15 kat daha yüksek bulunmuştur. Sonuç olarak, kanal geometrisinin optimize edilmesiyle birlikte kanatçık kullanımı, ısı transferinde ciddi bir iyileşme sağlamaktadır. Özellikle kanatçıklar ilave edilen kanallarda, diğer kanallara göre daha yüksek Nusselt sayısı elde edilerek, ısı transferi açısından etkili tasarım alternatifi olduğunu kanıtlamıştır.

3.2. Kanatçıların Sürtünme Faktörüne ve Basınç Düşüşüne Etkisi

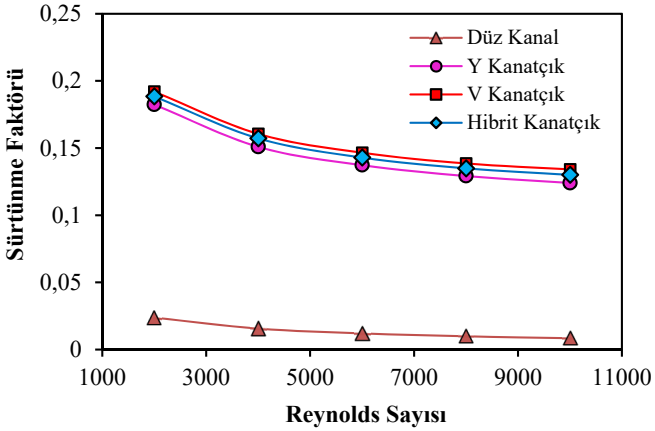
Kanalın dalgalı yapısı ve kanala eklenen kanatçıklar, ısı transferinde önemli iyileşmeler sağlamasına rağmen, basınç düşüşü ve sürtünme faktöründe artışa neden olmaktadır. Çünkü kanatçıklar akışa engel teşkil ederek bir direnç oluşturmaktadır. Basınç düşüşündeki artış pompalama gücünü artıracaktır, bu durum daha fazla enerji tüketimi ve pompalama maliyetlerinin artması anlamına gelmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, pompalama gücünü makul bir seviyede tutarak ısı transferinin iyileştirilmesi amaçlanır.

Şekil 12'de Re = 10000 için V-tipi, Y-tipi ve hibrit kanatçıklara sahip hibrit dalgalı kanallarda oluşan basınç düşüşü konturları gösterilmektedir. En yüksek basınç düşüşünün V-tipi kanatçıklara sahip kanalda oluştuğu gözlenmektedir. Bu durum, V-tipi kanatçığın akışı daha agresif şekilde bölerek daha yüksek düzeyde türbülans ve dolayısıyla daha fazla akış direnci oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Y-tipi kanatçık bulunan kanalda, basınç düşüşünün daha düşük seviyede gerçekleştiği ve renk skalasından daha yumuşak bir renk geçişi olduğu görülmektedir. Hibrit kanatçık durumunda ise, V-tipi ve Y-tipi yapıların birleşiminden oluşmasına rağmen, basınç düşüşünün Y-tipi kanatçığa göre daha yüksek, ancak V-tipi kanatçığa göre daha düşük kaldığı anlaşılmaktadır. Bu da hibrit kanatçıkların, ısı transferi için bir avantaj sunarken, akış direncini kontrollü bir seviyede tuttuğunu göstermektedir.



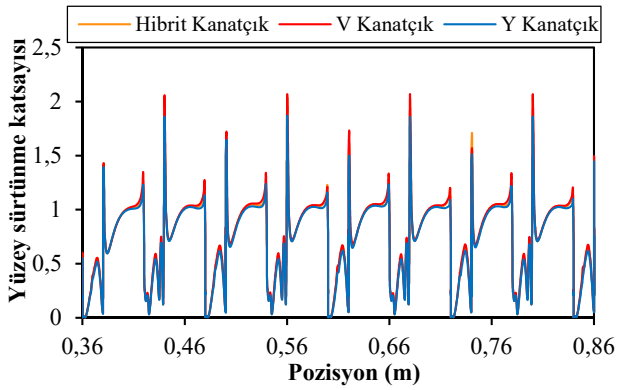
Şekil 12 Hibrit dalgalı kanalda kanatçık tiplerinin basınç alanlarına etkileri (Re=10000)

Şekil 13'te, DT hibrit dalgalı kanalda her üç kanatçık tasarımları için Reynolds sayısına bağlı olarak sürtünme faktöründeki değişimler, düz kanalla karşılaştırılarak gösterilmektedir. Genel eğilim olarak, tüm konfigürasyonlarda Reynolds sayısının artmasıyla birlikte sürtünme faktörünün azaldığı gözlenmektedir. Bu durum, yüksek Reynolds sayılarında akışın daha türbülanslı ve dolayısıyla sınır tabakanın daha ince olmasıyla ilişkilidir. Düz kanal, tüm konfigürasyonlar arasında en düşük sürtünme faktörüne sahiptir. Çünkü düz kanalda akışı engelleyen herhangi bir durum bulunmamaktadır ve akış minimum dirençle ilerlemektedir. Kanatçıklara sahip kanallar karşılaştırıldığında ise en düşük sürtünme faktörü Y-tipi kanatçığa sahip kanalda gözlenmiştir. Bu, Y-tipi kanatçığın akışı daha yumuşak yönlendirmesi ve nispeten daha az akış direnci oluşturmasından kaynaklanmaktadır. V-tipi kanatçık, en yüksek sürtünme faktörüne sahip konfigürasyon olarak öne çıkmaktadır. Bu kanatçık yapısı, daha keskin akış bölünmeleri ve daha geniş düşük hızlı alanlar oluşturarak akışa karşı daha fazla direnç göstermektedir. Hibrit kanatçıklar ise Y-tipi ve V-tipi kanatçıkların birleşiminden oluşan yapısıyla sürtünme faktörü bakımından ara bir değer sergilemektedir. V-tipi kanatçığa göre daha düşük, Y-tipi kanatçığa göre ise bir miktar daha yüksek sürtünme üretmektedir. Bu durum, hibrit kanatçık yapısının hem yüksek ısı transferi sağlarken hem de akışa olan direnci makul seviyede tutabildiğini göstermektedir.



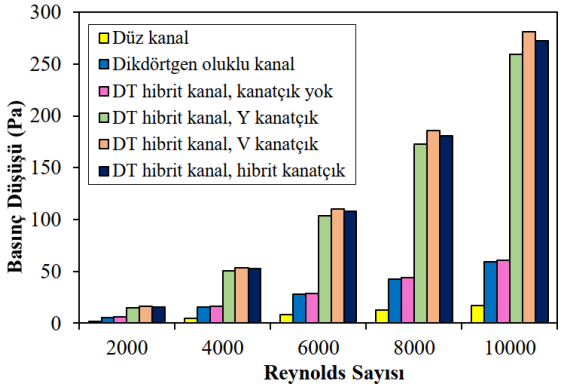
Şekil 13. Farklı kanatçık tipleri için Reynolds sayısı ile sürtünme faktörünün değişimi

Şekil 14'te Re = 8000 için Y-tipi, V-tipi ve hibrit kanatçıklarda elde edilen yüzey sürtünme katsayısı sunulmuştur. Her üç kanatçık tasarımı için oluk bölgelerinde sürtünme katsayısında ani yükselmeler gözlemlenmektedir. Bu tepe noktaları, akışın kanatçıklarla etkileşime girip yön değiştirmesi sonucu meydana gelen yüksek duvar kayma gerilmelerinden kaynaklanmaktadır. Y-tipi kanatçık en düşük sürtünme katsayısı değerlerini sergilerken, V-tipi kanatçık daha yüksek değerlere sahiptir. Hibrit kanatçık konfigürasyonu ise her iki yapının etkisini birleştirdiği için V-tipi kanatçıktan biraz düşük, Y-tipi kanatçıktan ise daha yüksek bir profil göstermektedir. Genel olarak her üç kanatçık tasarımının sürtünme katsayısı açısından benzer eğilim gösterdiği ve elde edilen değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu gözlenmektedir.



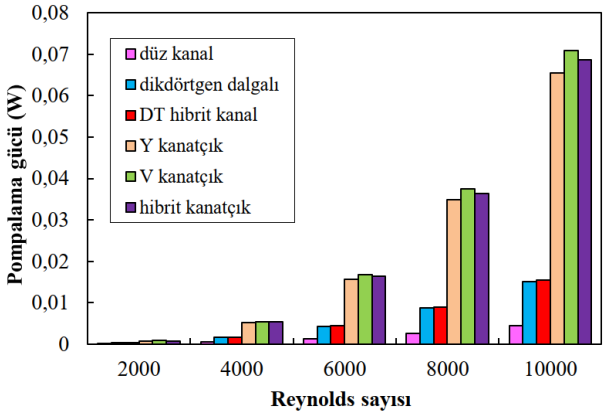
Şekil 14. Farklı kanatçık tiplerinde yüzey sürtünme katsayısının değişimi (Re = 8000)

Şekil 15, tüm kanatçık tasarımları için hibrit dalgalı kanallarda Reynolds sayısı ile değişen basınç düşüşü (ΔP) değerlerini göstermektedir. Sonuçlar, düz kanal, dikdörtgen dalgalı kanal ve DT hibrit dalgalı kanal ile karşılaştırılmaktadır. Çalışılan tüm kanallarda, Reynolds sayısındaki artışla birlikte ΔP değerinin yükseldiği açıkça görülmektedir. Ancak bu artış her konfigürasyonda aynı düzeyde olmamış, kanal geometrisi ve kanatçık tipi bu değişimi belirgin şekilde etkilemiştir. Düz kanal en düşük basınç kaybına sahiptir, Re = 10000 için ΔP değeri 17,20 Pa olarak bulunmuştur. Bu değer, kanalın minimum akış direncine sahip olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, sadece yüzey şekillendirmesi uygulanmış oluklu kanallarda basınç kaybı belirgin şekilde artmıştır. Dikdörtgen dalgalı kanalda ΔP = 59,42 Pa ve DT hibrit dalgalı kanalda ΔP = 61,06 Pa olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, düz kanala göre yaklaşık 3,45–3,55 kat daha fazla basınç kaybı oluştuğunu göstermektedir. Bu fark, yalnızca yüzey geometrisinin değiştirilmesiyle meydana gelmiştir. Kanatçıklara sahip kanallarda ise ΔP değerlerindeki artış çok daha belirgindir. Y-tipi kanatçık için ΔP = 259,39 Pa, V-tipi kanatçık için ΔP = 280,66 Pa, hibrit kanatçık için ΔP = 272,06 Pa olarak bulunmuştur. Bu değerler, düz kanal ile karşılaştırıldığında; Y-tipi kanatçık yaklaşık 15,08 kat, V-tipi kanatçık yaklaşık 16,31 kat, hibrit kanatçık ise yaklaşık 15,81 kat daha fazla basınç düşüşüne neden olmuştur. Y-tipi kanatçık, V-tipi kanatçığa göre daha düşük ΔP üretmiş ve bu da daha az akış direnci oluşturduğunu göstermektedir. Hibrit kanatçığın ΔP değeri, V-tipi kanatçığa göre yaklaşık %3,16 daha düşük, Y-tipi kanatçığa göre ise %4,88 daha yüksek olmuştur.



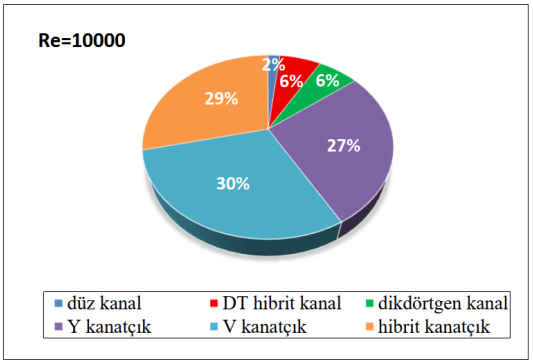
Şekil 15. Tüm kanal akışlarında Reynolds sayısı ile basınç düşüşünün karşılaştırılması

Şekil 16'da tüm kanal akışları için Reynolds sayısı ile pompalama gücü ($\dot{W}_{pompa}$) karşılaştırılmıştır. Beklendiği gibi düz kanalda pompalama gücü oldukça düşüktür. Reynolds sayısının artması ile pompalama gücü de artmaktadır. Kanatçıkların olmadığı dikdörtgen dalgalı kanal ve DT hibrit kanalda pompalama gücü birbirine yakın elde edilmiştir. Kanatçıkların pompalama gücünü kayda değer şekilde arttırdığı görülmektedir. Kanatçıkların olduğu kanallarda pompalama gücü kanatçıkların olmadığı diğer kanallardan daha yüksek bulunmuştur. Re = 10000 değerinde en yüksek pompalama gücü $\dot{W}_{pompa}$ = 0,07 W olarak V-tipi kanatçık tasarımında elde edilmiştir.



Şekil 16. Tüm kanal akışlarında Reynolds sayısı ile pompalama gücünün değişimi

Şekil 17'de Re = 10000 için tüm kanal akışlarında pompalama gücünün ($\dot{W}_{pompa}$) karşılaştırılması yüzdelik dilimlerle gösterilmiştir. Pompalama gücü düz kanalda en düşük yüzdelik dilime sahip (%2) iken V-tipi kanatçıklar için en yüksek (%30) değere ulaşmıştır. Kanatçıkların olduğu kanallarda ise yüzdelik dilimlerinin diğer kanallardan daha fazla olduğu görülmektedir. V-tipi kanatçık, Y-tipi kanatçık ve hibrit kanatçıklar için pompalama gücünün yüzdelik dağılımı sırasıyla %30, %27 ve %29 olarak elde edilmiştir. Kanatçık tasarımları arasında, en az pompalama gücü Y-tipi kanatçıkta elde edilmiştir. Dikdörtgen dalgalı ve DT hibrit dalgalı kanallarda pompalama gücünün yüzdelik dağılımı %6 olarak eşit bulunmuştur.



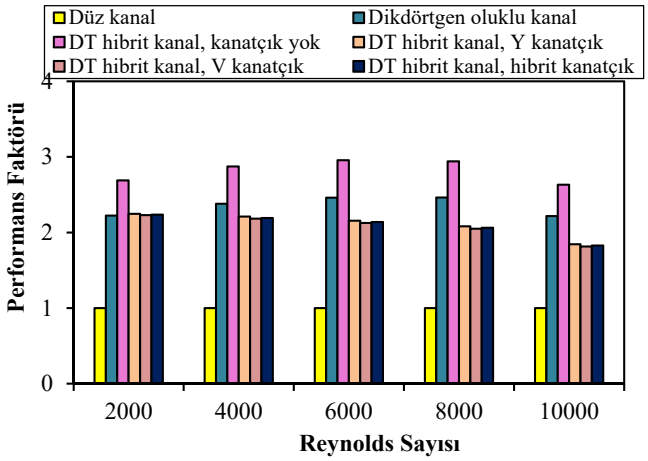
Şekil 17. Re=10000 için tüm kanal akışlarında pompalama gücünün karşılaştırılması

Sonuç olarak, kanatçık eklenmesiyle ısı transfer iyileşmesi ciddi şekilde artarken, beraberinde önemli ölçüde basınç kaybı (ΔP) ve pompalama gücünde ($\dot{W}_{pompa}$) artış görülmektedir. Bu nedenle, tasarımda sadece termal iyileşme değil, aynı zamanda hidrolik kayıplar ve pompalama gücü de dikkate alınmalıdır. Özellikle hibrit kanatçık tipi, yüksek ısı transferi avantajını sürtünme artışıyla dengeleyerek termo-hidrolik açıdan daha optimize bir performans sunmaktadır.

3.3. Kanatçıların Performans Faktörüne Etkisi

Şekil 18, farklı kanal tiplerinde ve kanatçık konfigürasyonlarında Reynolds sayısına bağlı olarak performans faktöründeki (PF) değişimi göstermektedir. PF değeri hem ısı transferi hem de sürtünme kaybını birlikte değerlendirdiği için, sistemlerin termo-hidrolik etkinliğini karşılaştırmak açısından önemli bir kriterdir. Tüm kanallar arasında, test edilen tüm Reynolds sayılarında en yüksek performans faktörünün kanatçıkların olmadığı DT hibrit dalgalı kanalda elde edildiği dikkat çekmektedir. DT hibrit kanalda en yüksek performans faktörünün Re = 6000'de PF = 2,96 olduğu belirlenmiştir. Kanatçıklara sahip kanallarda ise performans faktörü, kanatçıkların olmadığı dalgalı kanallardan daha düşük bulunmuştur. Bunun nedeni kanatçıkların akışa direnç oluşturması ve basınç düşüşünü artırmasıdır. Kanatçıklara sahip hibrit kanallar arasında en yüksek PF, Y-tipi kanatçıkta elde edilmiştir, bunu hibrit kanatçık ve V-tipi kanatçık izlemiştir.

Kanatçıkların olduğu hibrit kanallarda PF değerlerinin birbirlerine yakın olduğu gözlenmiştir. Re = 10000 durumunda tüm kanallarda PF, diğer Reynolds sayılarına göre bir düşüş göstermiştir. Bu durum, yüksek Reynolds sayılarında kanatçıkların oluşturduğu sürtünmenin ısı transferi üzerindeki etkisini bastırarak performans faktörünü düşürdüğünü göstermektedir. Re = 10000'de, kanatçık tipleri arasında, Y-tipi kanatçığın performans faktörü PF = 1,84, V-tipi kanatçığın PF = 1,81, ve hibrit kanatçığın ise PF = 1,83 değerine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 18. Farklı kanal ve kanatçık tipleri için Reynolds sayısı ile performans faktörünün değişimi

Genel olarak değerlendirildiğinde, PF değerleri tüm kanatçık tasarımlarında 1'in üzerinde kalarak düz kanala göre hâlâ avantajlı bir performans sergilemiş olsa da kanatçıklar yerine sadece oluk geometrisiyle optimize edilen dikdörtgen dalgalı ve DT hibrit kanallar, termohidrolik performans açısından daha etkin sonuçlar vermiştir. Özellikle Y-tipi kanatçıklar, kanatçık konfigürasyonları arasında optimum PF değerine sahip kanal tasarımı olarak öne çıkmaktadır.

Çizelge 3'te literatürde yapılan çalışmalardan elde edilen ısı transfer iyileşmesi ve performans faktörleri bu çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Wu ve arkadaşları [35] sinüzoidal geometriye sahip kanatçıkların farklı açılarının akış ve ısı transferine etkilerini incelemişler ve Re=2000'de kanat açısı α = 60° olduğunda ısı transfer iyileşmesinin (Nu/Nu_o) 1,29, performans faktörünün (PF) ise 1,16 olduğunu bildirmişlerdir. Sayısal bir çalışmada, Çelik ve Akçay [37] sinüzoidal bir kanalda dalga genliğinin (s) ve dairesel türbülatör çapının (d) akış ve ısı transferine etkilerini araştırmışlardır. Re=8000 için s=40mm ve d=8mm parametrelerinde ısı transferinin 1,82 oranında iyileştiğini ve PF = 1,07 olduğunu bildirmişlerdir. Bu çalışmada ise Re=10000'de Y-tipi kanatçıkların düz kanala göre ısı transfer iyileşmesinin Nu/Nu_o = 4,51 ve PF = 1,84 olduğu tespit edilmiştir. Wang ve ark. [43] kanatçık sayılarının (N) etkilerini araştırmışlar ve Re = 7454 değeri için N = 6 kanatçık sayısında Nu/Nu_o = 3,90 ve PF = 1,40 olarak elde etmişlerdir.

Bu çalışmada elde edilen ısı transferi iyileşmesinin Çizelge 3'teki diğer çalışmalardan daha yüksek olduğu, performans faktörünün ise diğer çalışmaların PF değerleri arasında yer aldığı görülmektedir. Bu sonuçlar, önerilen kanatçık tasarımının ısı transferi iyileştirmede ve performans faktörü açısından önemli bir avantaj sağladığını göstermektedir.

Çizelge 3. Literatür çalışmaları ile karşılaştırma

Referans	Parametreler	Reynolds sayısı	Nu/Nu_o	PF
Wu ve arkadaşları [35]	Sinüzoidal kanatçık Kanat açısı α = 60°	Re = 2000	1,29	1,16
Çelik ve Akçay [37]	Kanal genliği, s = 40 mm Türbülatör çapı, d = 8 mm	Re = 8000	1,82	1,07
Wang ve arkadaşları [45]	Kanatçık sayısı N = 6	Re = 7454	3,90	1,40
Bu çalışma	Y-tipi kanatçık	Re = 10000	4,51	1,84

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, dikdörtgen-trapez hibrit dalgalı bir kanala ilave edilmiş üç farklı tasarımdaki kanatçıkların akış ve ısı transferi üzerindeki etkisi $2000 \leq Re \leq 10000$ aralığındaki Reynolds sayılarında sayısal olarak incelenmiştir. Kanatçıklar, V-tipi, Y-tipi ve V-Y hibrit tip olmak üzere dikdörtgen-trapez profilden oluşan hibrit dalgalı bir kanala yerleştirilmiştir. Ayrıca sonuçlar düz kanal ve üniform dikdörtgen dalgalı kanal ile karşılaştırılmıştır. Kanatçık eklenmesiyle birlikte ısı transferinde belirgin bir iyileşme elde edilmiştir. Kanatçıklar arasında en yüksek ısı transferi V-tipi kanatçıkta (Nu = 73,90) elde edilmiş, bunu hibrit kanatçık (Nu = 73,58) ve Y-tipi kanatçık (Nu = 73,10) takip etmiştir. V-tipi kanatçıklar, ısı transferi açısından düz kanala göre 4,56 kat iyileşme göstermiştir. Ayrıca V-tipi kanatçıklarda Nusselt sayısı, kanatçıkların olmadığı hibrit dalgalı kanal göre yaklaşık 1,15 kat daha yüksek bulunmuştur. Re = 10000'de, V-tipi kanatçıklara sahip hibrit dalgalı kanal ΔP = 280,66 Pa ile yüksek basınç düşüşü göstermiştir. Reynolds sayısının artması ile pompalama gücü artmıştır. En yüksek pompalama gücü Re = 10000 değerinde $\dot{W}_{pompa}$ = 0,07 W olarak V-tipi kanatçık tasarımında elde edilmiştir. V-tipi kanatçık, Y-tipi kanatçık ve hibrit kanatçıklar için pompalama gücünün yüzdelik dağılımı sırasıyla %30, %27 ve %29 olarak elde edilmiştir. Tüm kanatçık tasarımlarında, Re arttıkça PF değeri azalmış, Re = 2000 için hibrit kanatçıkta PF = 2,23 iken, Re = 10000'de PF = 1,82'ye düşmüştür. Re = 10000'de Y-tipi kanatçıklar, tüm kanatçık konfigürasyonları içinde optimum termo-hidrolik performans sunmuş ve PF = 1,84 ile V-tipi ve hibrit kanatçıklardan daha iyi sonuç vermiştir.

Yapılan çalışma, uygun kanal geometrisi, kanatçık yapısı ve akış şartları sağlandığında ısı transferinde ve performans faktöründe önemli iyileşmeler elde edilebileceğini göstermektedir. Bu çalışmada önerilen kanal geometrisinin ve kanatçık tasarımının, ısı değiştiricileri başta olmak üzere pek çok ısıtma ve soğutma uygulamaları, nükleer reaktörlerin soğutulması, elektronik devre elemanlarının soğutulması gibi uygulamalarda kullanılması halinde ısı transferinin kayda değer şekilde iyileşebileceğini göstermektedir. Böylelikle bu ve benzer konularda çalışan araştırmacılara ve kanal tasarımcılarına yol gösterici olacaktır.

5. KAYNAKLAR

1. Ajarostaghi, S.S.M., Zaboli, M., Javadi, H., Badenes, B. & Urchueguia, J.F. (2022). A review of recent passive heat transfer enhancement methods. *Energies*, *15*, 986.
2. Alam, T. & Kim, M.H. (2018). A comprehensive review on single phase heat transfer enhancement techniques in heat exchanger applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *81*, 813-839.
3. Uysal, D. & Akçay, S. (2024). Numerical study of thermal and hydrodynamic characteristics of turbulent flow in hybrid corrugated channels with different wave profiles. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, *18*(2), 10026-10045.
4. Nitturi, L.K., Kapu, V.K.S., Gugulothu, R., Kaleru, A., Vuyyuri, V. & Farid, A. (2023). Augmentation of heat transfer through passive techniques. *Heat Transfer*, *52*(6), 4422-4449.
5. Akçay, S. (2022). Numerical analysis of heat transfer improvement for pulsating flow in a periodic corrugated channel with discrete V-type winglets. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *134*, 105991.
6. Akçay, S. (2023). Heat transfer analysis of pulsating nanofluid flow in a semicircular wavy channel with baffles. *Sādhanā*, *48*, 57.

7. Alfellag, M.A., Ahmed, H.E., Jehad, M.G. & Farhan, A.A. (2022). The hydrothermal performance enhancement techniques of corrugated channels: A review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *147*, 10177-10206.

8. Kurtulmus, N. & Sahin, B. (2019). A review of hydrodynamics and heat transfer through corrugated channels. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *108*, 104307.

9. Ahmad, F., Mahmud, S., Ehsan, M.M. & Salehin, M. (2023). Numerical assessment of nanofluids in corrugated minichannels: Flow phenomenon and advanced thermo-hydrodynamic analysis. *International Journal of Thermofluids*, *20*, 100449.

10. Haridas, D., Singh, V. & Srivastava, A. (2020). An experimental investigation of heat transfer performance of wavy channels under laminar flow conditions: An interferometric study. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, *27*(6), 561-576.

11. Akçay, S. (2021). Investigation of thermo-hydraulic performance of nanofluids in zigzag channel with baffles. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *15*, 525-534.

12. Zontul, H., Hamzah, H., Kurtulmuş, N. & Şahin, B. (2021). Investigation of convective heat transfer and flow hydrodynamics in rectangular grooved channels. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *126*, 105366.

13. Kumar, K., Kumar, R.S. & Bharl, R.S. (2022). Thermohydraulic performance enhancement using novel hybrid corrugation configuration channels in thermal systems. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *134*, 105999.

14. Khan, M., Shuja, S.Z., Yilbas, B.S. & Al-Qahtani, H. (2022). A case study on innovative design and assessment of a microchannel heat sink with various turbulators arrangements. *Case Studies in Thermal Engineering*, *31*, 101816.

15. Togun, H., Homod, R.Z., Yaseen, Z.M., Abed, A.M., Dhabab, J.M., Ibrahem, R.K., Dhahbi, S., Rashidi, M.M., Yaïci, G.W.A. & Mahdi, J.M. (2022). Efficient heat transfer augmentation in channels with semicircle ribs and hybrid Al_2O_3–Cu/water nanofluids. *Nanomaterials*, *12*(15), 2720.

16. Saleh, B. & Sundar, L.S. (2021). Experimental study on heat transfer, friction factor, entropy and exergy efficiency analyses of a corrugated plate heat exchanger using Ni/water nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, *165*, 106935.

17. Akçay, S. (2022). İçerisinde dik bölmeler bulunan trapez bir kanalda bölme yüksekliğinin akış ve ısı transferine etkisinin incelenmesi. *Bitlis Eren University Journal of Science*, *11*(2), 478-489.

18. Adıgüzel, N. & Gunduz, A. (2022). Theoretical analysis of new propeller type turbulator design in parallel flow double tube heat exchanger. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, *12*(1), 204-228.

19. Feng, C.-N., Liang, C.-H. & Li, Z.-X. (2022). Friction factor and heat transfer evaluation of cross-corrugated triangular flow channels with trapezoidal baffles. *Energy & Buildings*, *257*, 111816.

20. Zhang, J., Zhu, X., Mondejar, M.E. & Haglind, F. (2019). A review of heat transfer enhancement techniques in plate heat exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *101*, 305-328.

21. Brodnianská, Z. & Kotšmíd, S. (2023). Heat transfer enhancement in the novel wavy shaped heat exchanger channel with cylindrical vortex generators. *Applied Thermal Engineering*, *220*, 119720.

22. Nfawa, S.R., Talib, A.R.A., Masuri, S.U., Basri, A.A. & Hasini, H. (2019). Heat transfer enhancement in a corrugated-trapezoidal channel using winglet vortex generators. *CFD Letters*, *11*(10), 69-80.

23. Promvonge, P., Promthaisong, P. & Skullong, S. (2020). Experimental and numerical heat transfer study of turbulent tube flow through discrete V-winglets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *151*, 119351.

24. Zheng, Y., Yang, H., Mazaheri, H., Aghaei, A., Mokhtari, N. & Afrand, M. (2021). An investigation on the influence of the shape of the vortex generator on fluid flow and turbulent heat transfer of hybrid nanofluid in a channel. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *143*, 1425-1438.

25. Sungur, B. ve Topaloğlu, B. (2018). Boru içine yerleştirilen konik türbülatör sayısının nümerik optimizasyonu. *Technological Applied Sciences NWSATAS*, *13*(3), 208-218.

26. Boukhadia, K., Ameur, H., Sahel, D. & Bozit, M. (2018). Effect of the perforation design on the fluid flow and heat transfer characteristics of a plate fin heat exchanger. *International Journal of Thermal Sciences*, *126*, 172-180.

27. Garelli, L., Rodriguez, G.R., Dorella, J.J. & Storti, M.A. (2019). Heat transfer enhancement in panel type radiators using delta-wing vortex generators. *International Journal of Thermal Sciences*, *137*, 360-369.

28. Tian, M.W., Khorasani, S., Moria, H., Pourhedayat, S. & Dizaji, H.S. (2020). Profit and efficiency boost of triangular vortex-generators by novel techniques. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *156*, 119842.

29. Hassani, S.M., Khoshvaght-Aliabadi, M., Feizabadi, A., Rehman, S. & Alimoradi, A. (2020). Experimental and numerical analysis of curved turbulators in different arrangements through a rectangular channel. *Experimental Heat Transfer*, *35*(1), 22-44.
30. Turgut, E. (2020). Dairesel kesitli türbülans üreticilerinin ısıl performansının araştırılması. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *11*(2), 481-490.
31. Sun, Z., Zhang, K., Li, W., Chen, Q. & Zheng, N. (2020). Investigations of the turbulent thermal-hydraulic performance in circular heat exchanger tubes with multiple rectangular winglet vortex generators. *Applied Thermal Engineering*, *168*, 114838.
32. Ameur, H., Sahel, D. & Menni, Y. (2021). Numerical investigation of the performance of perforated baffles in a plate-fin heat exchanger. *Thermal Science*, *25*(5B), 3629-3641.
33. Alnak, Y. (2022). Üçgen biçimli kanatçık yüzeylerde ısı geçişinin nümerik olarak incelenmesi. *Muş Alparslan Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *3*(1), 37-49.
34. Tahmasebian, I., Ghafouri, A., Assareh, E. & Moravej, M. (2022). Intensification of heat transfer of a wavy channel with a series of detachable vortex generators: Numerical analysis with RANS model modification. *The European Physical Journal Plus*, *137*, 718.
35. Wu, J., Liu, P., Liu, M., Liu, Z. & Liu, W. (2022). Thermo-hydraulic performance and exergy analysis of a fin-and-tube heat exchanger with sinusoidal wavy winglet type vortex generators. *International Journal of Thermal Sciences*, *172*, 107279.
36. Wang, J., Yu, K., Ye, M., Wang, E., Wang, W. & Sunden, B. (2022). Effects of pin fins and vortex generators on thermal performance in a microchannel with Al_2O_3 nanofluids. *Energy*, *239,* 122606.
37. Çelik, E. ve Akçay, S. (2025). Sinüzoidal dalgalı bir kanalda akış ve ısı transferi üzerinde dalga genliğinin ve dairesel engellerin etkisinin incelenmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, *15*(1), 36-50.
38. Rush, T.A., Newell, T.A. & Jacobi, A.M. (1999). An experimental study of flow and heat transfer in sinusoidal wavy passages. *Int. J. Heat Mass Transfer*, *42* (9), 1541-1553.
39. Saniei, N. & Dini, S. (1993). Heat transfer characteristics in a wavy walled channel. *J. Heat Transfer*, *115*(3), 788-792.
40. Wang, S.P. & Vanka, S.P. (1995). Convective heat transfer in periodic wavy passages. *Int. J. Heat Mass Transfer, 38*(17), 3219-3230.
41. Cengel, Y.A. (2010). *Fluid Mechanics*. Tata McGraw-Hill Education, New York, USA.
42. Kılıç, M. ve Şahin, M. (2023). Nanoakışkan hacimsel oranının ve parçacık boyutunun gövde borulu ısı değiştiricisindeki ısı transferine etkisinin deneysel ve sayısal incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *38*(2), 531-543.
43. Özbolat, V. & Şahin, B. (2022). Flow characteristics and heat transfer enhancement of sinusoidal corrugated channels with different configurations. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *37*(1), 93-107.
44. Jia, L., Cui, P., Lu, L., Chen, J. & Cao, Z. (2024). Parametric analysis and potential evaluation of an all-day radiative sky cooling radiator-assisted ground source heat pump system. *Applied Thermal Engineering*, *240*, 122285.
45. Wang J., Li C., Zeng, L., Fu, T. & Liu, K. (2025). Thermal performance analysis of a heat exchanger with a novel turbulator insert by using machine learning method. *Case Studies in Thermal Engineering*, *72*, 106412.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 1 MART/MARCH 2026

Mersin- Anamur Karayolu T3 Tünelindeki Karstik Boşlukların İyileştirilmesinde Kullanılan Yöntemler

Yücel GÜÇ [1,a], **Sedat TÜRKMEN** [1,b]

[1]*Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye*

[a]***ORCID***: *0009-0000-1497-9676;* [b]***ORCID***: *0000-0002-9867-5545*

Makale Bilgileri
Geliş : 23.05.2025
Kabul : 25.11.2025
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1704326

Sorumlu Yazar
Sedat TÜRKMEN
sturkmen@yahoo.com

Anahtar Kelimeler
Sipahili T3 tüneli
Kazı sınıflaması
Karstik boşluk
İyileştirme

Atıf şekli: *GÜÇ, Y., TÜRKMEN, S., (2026). Mersin- Anamur Karayolu T3 Tünelindeki Karstik Boşlukların İyileştirilmesinde Kullanılan Yöntemler. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(1), 17-28.*

ÖZ

Çalışma alanı, Mersin-Anamur Devlet Karayolu Projesi, km:142+300-148+875 arasındaki T3 Tüneli kesimini kapsamakta olup tünelin toplam uzunluğu 6575 metredir. Tünel çift tüp olarak tasarlanmış olup yol ise 2 x 2 ve 23-26 m platform genişliğine sahiptir. Tünel güzergahında İnfra-Kambriyen yaşlı Sipahili formasyonu geçilmiş olup başlıca düşük dereceli metamorfizma izleri taşıyan meta-konglomera, çakıllı kalkşist, fillat, klorit şist ve kristalize kireçtaşı ardalanmasından oluşmaktadır. Tünel kazı desteklemeleri, kaya kütlesi sınıflandırma sistemleri tarafından önerilen ampirik ve analitik yöntemler ve arazi verileri değerlendirilerek yapılmıştır. Tünel güzergahında kireçtaşı geçilen km:148+159,81–148+167,31 ile km:148+283,81–148+286,31 arasında karstik boşluklar gözlenmiştir. Karstik boşlukların iyileştirilmesi, reçine esaslı organik köpük ajanı ile oluşturulan hafif dolgu betonu yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

Methods for Repairing Karstic Voids in the T3 Tunnel on the Mersin-Anamur Highway

Article Info
Received : 23.05.2025
Accepted : 25.11.2025
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1704326

Corresponding Author
Sedat TÜRKMEN
sturkmen@yahoo.com

Keywords
Sipahili T3 tunnel
Excavation classification
Karstic cavity
Improvement

How to cite: *GÜÇ, Y., TÜRKMEN, S., (2026). Methods for Repairing Karstic Voids in the T3 Tunnel on the Mersin-Anamur Highway. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(1), 17-28.*

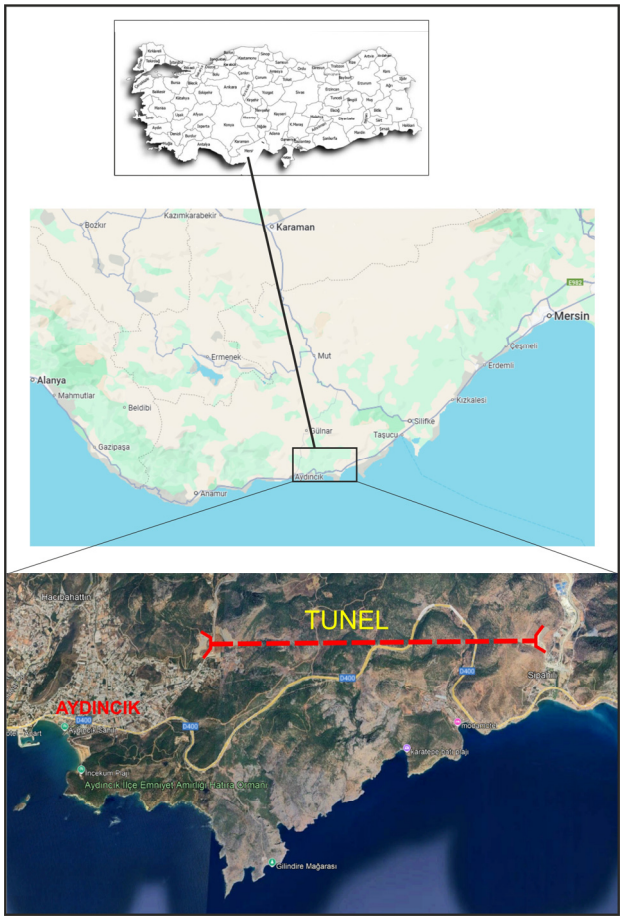
ABSTRACT

The study area covers the T3 Tunnel section between the Mersin-Anamur State Motorway Project, km: 142+300-148+875, and the total length of the tunnel is 6575 meters. The maximum overburden thickness along the tunnel alignment is 377 meters. The tunnel is designed as a double tube, and the road has a 2 x 2 and 23-26 m platform width. The tunnel route passes through lithologies consisting of karstic crystallized limestone belonging to the The Infra-Cambrian-aged Sipahili Formation mainly consists of an alternation of meta-conglomerate, pebbly calc-schist, phyllite, chlorite schist, and crystalline limestone that exhibit traces of low-grade metamorphism. Tunnel excavation and support systems were designed with empirical and analytical methods suggested by rock mass classification systems and by evaluating field data. Along the tunnel alignment, karstic cavities were encountered within the limestone sections between km: 148+159.81–148+167.31 and km: 148+283.81–148+286.31.The repairing of karstic cavities was carried out by the lightweight filling concrete method formed with resin-based organic foaming agent.

1. GİRİŞ

Tüneller yer altı mühendisliği açısından son derece önemli yapılardır. Günümüzde ulaşım ihtiyaçlarının daha hızlı ve verimli karşılanabilmesi amacıyla tünel inşaatları yaygın olarak uygulanmaktadır. Tünelcilikle ilgili kaya sınıflamaları ilk defa Terzaghi'nin [1] ortaya koyduğu kaya yükü esasına dayalı olarak yapılmış, daha sonra Bieniawski [2] tarafından geliştirilen RMR kaya kütlesi sınıflama sistemi ve Jeomekanik Sınıflama sistemi ve Norveç Jeoteknik Enstitüsü (NGI) araştırmacılarının [3] geliştirdiği Q sistemi yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde ise tünel mühendisliğinde Yeni Avusturya Tünel Açma Metoduna (NATM) dayalı olarak kazı ve destekleme sistemleri uygulanmaktadır. Bu tür projelerin güvenli ve başarılı bir şekilde tamamlanabilmesi için, kazının gerçekleştirileceği zemin veya kaya ortamının mühendislik, jeolojik ve yapısal özelliklerinin ayrıntılı olarak incelenmesi gerekmektedir. Bu incelemeler doğrultusunda, jeomekanik parametreler belirlenmeli ve uygun kaya/zemin sınıflaması yapılmalıdır. Tünel kazısı sürecinde; kazı ve destekleme yöntemleri, tünel geometrisi, kazı sırasında karşılaşılabilecek zemin problemleri, meydana gelen deformasyonlar ve uygulanacak destek sistemleri bir bütün olarak ele alınmalı ve proje koşullarına en uygun çözümler geliştirilmelidir. Kazı esnasında, çevreleyen kaya kütlesinde aşırı sökülmeler yaşanabilmekte ya da doğal olarak oluşmuş karstik boşluklara rastlanabilmektedir. Bu tür boşluklar, zamanla destekleme elemanlarına doğru hareket etme eğilimindedir. Bu nedenle, zemin ile destek elemanları arasında bulunan veya oluşan boşlukların uygun yöntemlerle doldurulması ve sistemin ana kayaya sabitlenmesi büyük önem taşımaktadır.

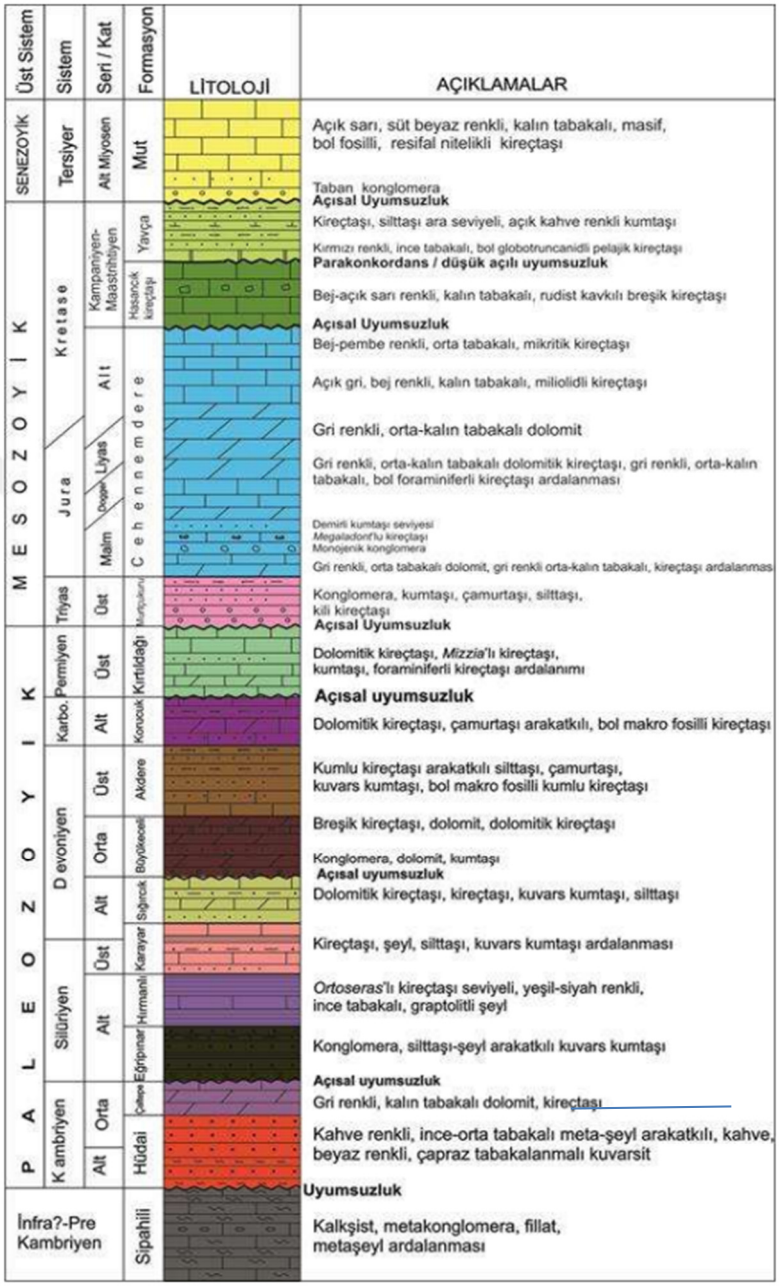
Bu çalışma kapsamında, Mersin–Anamur Karayolu üzerinde yer alan 6.575 m uzunluğundaki T3 Tüneli'nin mühendislik jeolojisi ve jeoteknik özellikleri belirlenmiş; arazi verileri değerlendirilerek kazı ve destekleme yöntemleri saptanmıştır (Şekil 1). Tünel kazısı sırasında, km:148+159,81–148+167,31 ile km:148+283,81–148+286,31 kesimleri arasında, sağ tüpün tavan ve sağ omuz bölgelerinde karstik boşluklara rastlanmıştır [4]. Bu kesimlerdeki karstik boşlukların iyileştirme yöntemlerinin belirlenmesi ve uygun alternatif çözüm önerilerinin sunulması amaçlanmıştır.



Şekil 1. T3 Tüneli yer bulduru haritası ve uydu görüntüsü

2. BÖLGESEL JEOLOJİ

Proje alanının jeolojik özellikleri MTA ve çeşitli kurumlar tarafından farklı dönemlerde gerçekleştirilen genel jeoloji çalışmalarıyla ortaya konulmuştur [5-9]. Bu çalışmalar doğrultusunda, bölgenin jeolojisi ve litostratigrafik birimleri tanımlanmıştır. İnceleme alanı, Toros Kuşağı'nın Silifke ile Anamur arasında kalan orta kesiminin en güneyinde yer almaktadır. Çalışma sahasında, Geyikdağı Tektonik Birliği'nin taban kesimlerini oluşturan ve düşük derecede bölgesel metamorfizma geçirmiş birimler ilk kez Demirtaşlı [7] tarafından "Sipahili formasyonu" olarak adlandırılmıştır. Formasyon, Geç Devoniyen–Erken Triyas zaman aralığında çökelmiş olan Aladağ Birliği istifinin, Triyas döneminde gelişen bir bindirme sonucu tanımlanan ve İnfra-Kambriyen - Geç Permiyen zaman aralığında çökelmiş Geyikdağı Birliği istifinin üzerine itildiği belirlenmiştir [8]. Bu iki birimin, tektonik dokanak oluşturacak şekilde birbirleri ile temas halinde oldukları yorumlanmaktadır (Şekil 2). Mühendislik çalışmaları olarak inceleme alanını yakın çevresinde Anamur - Kaledran arasında karayolu çalışmalarında açılan T5 tünelinin mühendislik jeolojisi özellikleri ve kaya kütle sınıflaması ile ilgili çalışmalar yapılmıştır [10].

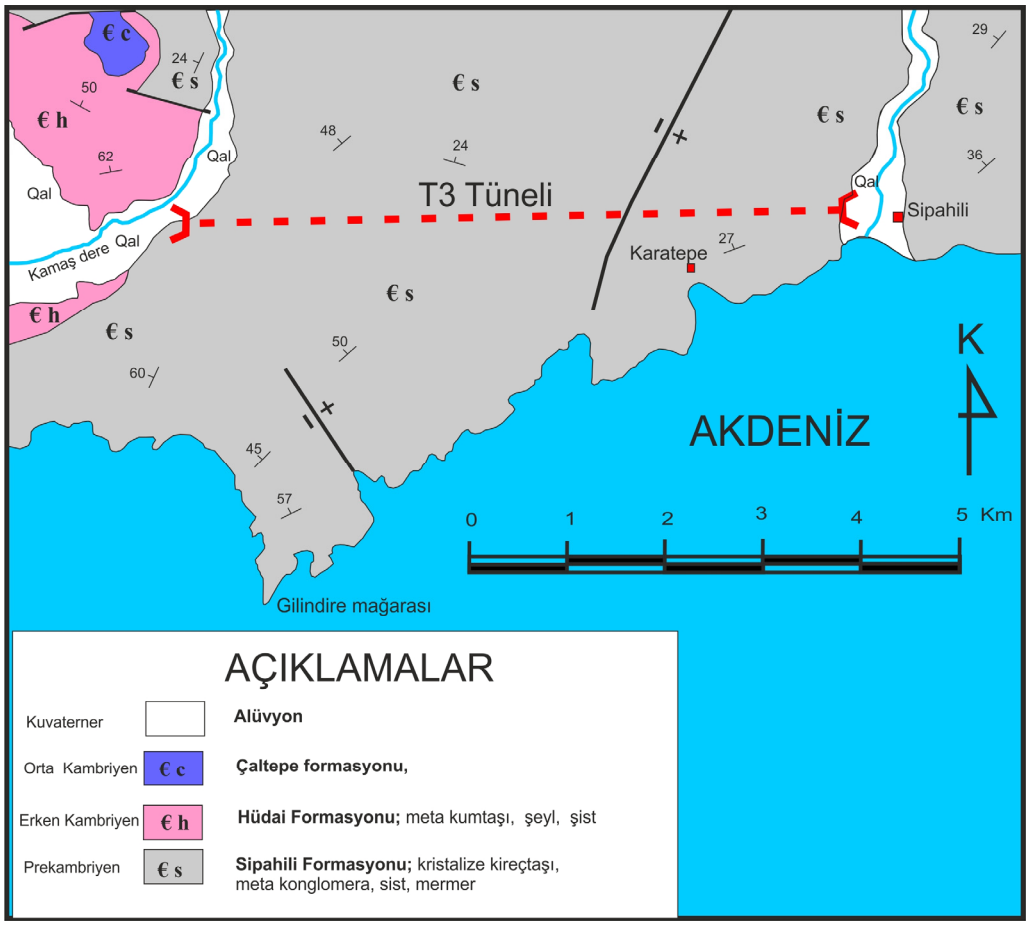


Şekil 2. Aydıncık bölgesinin genelleştirilmiş stratigrafi kesiti [8]

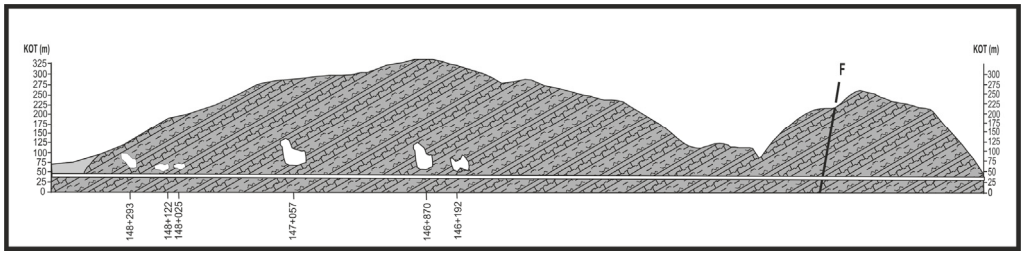
3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Tünel Güzergâhının Jeolojisi

Tünel güzergahında İnfra-Kambriyen yaşlı Sipahili formasyonuna ait başlıca düşük dereceli metamorfizma izleri taşıyan meta-konglomera, çakıllı kalkşist, fillat, klorit şist, şist ve kristalize kireçtaşı ardalanmasından oluşan birimler izlenir. Önceki çalışmalarda Sipahili formasyonu olarak adlandırılan birim; tünel güzergahında açık kahve-gri renkli ve orta tabakalı kireçtaşı, kalk şist, mermer, yer yer şist ve meta konglomera düzeyleri içerir (Şekil 3 ve 4). Arazinin çok engebeli bir morfoloji sunmasından dolayı tünel güzergahında toplam iki adet 69,5 m derinliğinde sondaj açılabilmiştir (Şekil 5). Kireçtaşları gri renkli, ince-orta kalınlıkta tabakalı olup çatlaklı ve yer yer metamorfik bir yapı sunar. Yapılan sondaj çalışmaları sonucunda, tünelin altı farklı bölüme ayrılarak incelenmesi düşünülmüştür. Tünel güzergahını, Sipahili formasyonunun daha çok üst kesimlerini temsil eden çoğunlukla gri renkli, düzgün, orta-kalın tabakalı, sert yapılı kristalize kireçtaşları oluşturmakta olup yer yer karstlaşma yaygındır. Sipahili formasyonunun alt seviyelerinin biraz üzerinde ise kristalize dolomitler ve merceksel mermer seviyeleri gözlenmiştir (Çizelge 1).



Şekil 3. Tünel güzergahının genel jeoloji haritası [8]



Şekil 4. T3 tünelinin jeolojik enine kesiti



Şekil 5. Tünel giriş portalında açılan araştırma sondajından bir görünüm

Çizelge 1. Altı bölüme ayrılan tünel güzergahında kireçtaşı geçilen kısımlar

Proje kesim	Km aralığı	Jeolojik birim
Giriş portalı	142+300-142+460	Çatlaklı kireçtaşı
I Kesimi	142+460-143+600	Kristalize kireçtaşı
II Kesimi	143+600-144+710	Kireçtaşı
III Kesimi	144+710-147+860	Kireçtaşı
IV Kesimi	147+860-148+600	Karstik kireçtaşı
Çıkış portalı	148+600-148+875	Yamaç molozu (killi)

Proje alanı ile ilgili yapılan jeolojik çalışmalar ve laboratuvar deney sonuçlarından elde edilen sayısal verilere göre tünel güzergahında kazı aşamasında karşılaşılacak kaya birimleri, uluslararası kabul görmüş kaya sınıflama sistemlerinden Hoek ve Brown [11,12], kaya dayanım tahmini, Q kaya kütle sınıflaması Barton, Lien ve Lunde [13,14], RMR Jeomekanik sınıflama sistemi [3] ve ÖNORM B 2203, [15] (NATM) ile yapılmıştır.

3.2. Tünel Güzergahı Kaya Sınıflaması ve Jeolojik Parametreler

Proje alanı ile ilgili yapılan jeoloji çalışmaları ve laboratuvar deney sonuçlarından elde edilen sayısal verilere göre tünel güzergahında kazı aşamasında karşılaşılacak kaya formasyonları, RMR [2], Q [3], ve ÖNORM B 2203, [15] (NATM) kaya sınıflama sistemleri kullanılarak değerlendirilmiştir (Çizelge 2 ve 3).

Çizelge 2. Sondajlardan alınan örnekler üzerinde yapılan deney sonuçları ve belirlenen parametreler

Kesit	Giriş ve çıkış portalı	Eksen I ve Eksen III kesimi	Eksen II ve Eksen IV kesimi
Km aralığı	142+300-142+460 148+600-148+440	142+460-143+600 144+710-147+860	143+600-144+710 147+860-148+600
Kaya birim hacim Ağırlığı, (kN/m^3)	2,63	2,63	2,63
Tek eksenli basınç dayanımı, (MPa)	14	14	14
GSI değeri	37	41	41
mi değeri	9	12	12
Örselenme faktörü, D	0-0,5	0-0,5	0-0,5

Çizelge 3. Tünelin farklı kesimlerinde uygulanan destekleme sistemleri

Kesim	Giriş portalı	Eksen II ve Eksen IV kesimi, Sığınma cebi ve araç geçişi	Eksen I ve Eksen III kesimi, Sığınma cebi ve araç geçişi	Eksen kesimi	Çıkış portalı
Km	142+300-142+460	143+600-144+710 147+860-148+600	143+600-144+710 147+860-148+600	Sağ 142+370-142+888 Sol 142+406-142+913	142+300-142+460
Kaya sınıfı	B3 Invert	B3	B2	B2	B3 Invert
Kaya bulonu (m)	6*1,5-1,0-1,5 PG/IBO	4-6 (1,00-1,50) L=4 m (Alt Yarıda) L=6 m (Üst yarıda) (PG Bulon)	4-6 (1,00-2,00) L=4 m (Alt Yarıda) L=6 m (Omuzlarda) (PG Bulon)	4-6 (1,00-2,00) L=4 m (Alt Yarıda) L=6 m (Omuzlarda) (PG Bulon)	6*1,5-1,0-1,5 PG/IBO
Püskürtme betonu	25 cm	25 cm	20 cm	20 cm	25 cm
Hasır çelik	2 sıra (Q221x221) Üst 120°de, 30 cm ara ile (L=6m) 2"	2 sıra (Q221x221) Üst 120°de, 20-30 cm ara ile (L=6m) 2"	2 sıra (Q221x221) Üst 120°de, 20-25 cm ara ile (L=6m) 2"	2 sıra (Q221x221) Üst 120°de, 20-25 cm ara ile (L=6m) 2"	2 sıra (Q221x221) Üst 120°de, 30 cm ara ile (L=6m) 2"
Çelik iksa	I 160 1,0-1,5 m ara ile	I 160 1,0-1,5 m ara ile	I 120 1,5-2 m ara ile	I 120 1,5-2 m ara ile	I 160 1,0-1,5 m ara ile
İlerleme adımı (m)	Üst yarı: 1,0-1,5 m Alt yarı: 3,0 m	Üst yarı: 1,0-1,5 m Alt yarı: 3,0 m	Üst yarı: 1,5-2,0 m Alt yarı: 3,0 m	Üst yarı: 1,5-2,0 m Altyarı: 3.0 m	Üst yarı: 1,0-1,5 m Altyarı: 3.0 m
Nihai kaplama	Donatısız (C25/30)	Donatısız (C25/30)	Donatısız (C25/30)	Donatısız (C25/30)	Donatısız (C25/30)
Kesit	Taban kemerli	Taban kemersiz	Taban kemersiz	Taban kemersiz	Taban kemerli

3.3. Tünel Güzergahındaki Karstlaşma

Karst, özellikle karbonatlı kayaçların erimesi ve yüzeysel akarsuların yer altına sızması sonucunda oluşan boşluklu alanların tümünü ifade eden morfolojik bir terimdir. Karstlaşma sonucunda yeraltında oluşan boşluklu yapıya "karstik boşluk" adı verilir. Karstik yapıların oluşumunda başta kayaçların özellikleri olmak üzere; yükselti, sıcaklık, nemlilik, iklim ve vejetasyon koşulları önemli rol oynar. Kireçtaşlarında karstlaşma oldukça yaygın bir süreçtir. Kırık ve çatlaklardan sızan suların etkisiyle, kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) gibi eriyebilen kayaçlar çözünerek boşluklu yapılar oluşturur. Karbondioksit (CO_2) açısından zengin asidik yağmur sularıyla başlayan bu süreç yüzeyden derinlere doğru ilerleyerek zamanla büyük mağaraların oluşumuna yol açar. Karstlaşma, yeraltı sularının dolaşımı ve depolanması açısından da büyük öneme sahiptir. Bu süreçte, suda çözünmüş haldeki CO_2, su ile reaksiyona girerek karbonik asit (H_2CO_3) oluşturur:

$$H_2O + CO_2 \rightleftharpoons H_2CO_3 \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^- \quad (1)$$

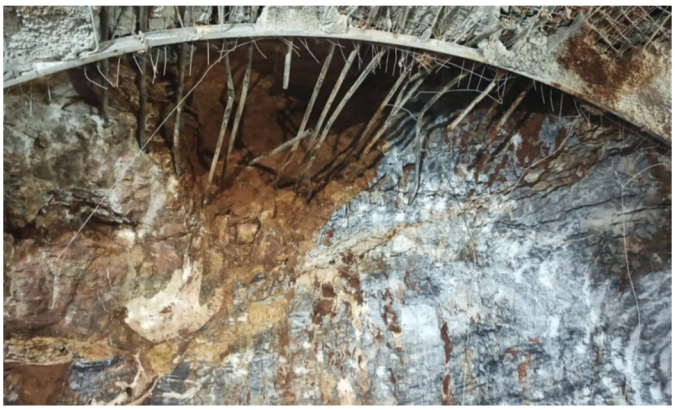
Karbonik asidin, sudaki kalsiyum iyonları ile etkileşmesi sonucunda ise geri dönüşümlü bir kimyasal reaksiyon meydana gelir. Bu reaksiyonlar, zaman zaman kalsiyum karbonatın çökelmesiyle sonuçlanır.

$$2HCO_3^- + Ca^{2+} \rightleftharpoons Ca(HCO_3)_2 \rightleftharpoons H_2O + CO_2 + CaCO_3 \quad (2)$$

Bu denge süreçleri karstik boşlukların genişlemesine, mağara ve diğer yer altı yapılarının şekillenmesine neden olur. T3 Tüneli sol tüpte km:148+122,08- 148+129,08 arasında geçilen karstik boşluklar Şekil 6 ve 7 de verilmiştir.



Şekil 6. T3 Tüneli sol tüpte (km:148+122,08- 148+129,08 arası) geçilen karstik boşluklar



Şekil 7. Tünel sol tüp tavan kesimindeki karstik boşluktan bir görünüm

3.4. Karstik Boşluk Geçişleri ve Çözüm Önerileri

Tünel kazısında kireçtaşı birimleri içerisinde geçilen kesimlerde yer yer karstik boşluklarla karşılaşılmıştır. Karşılaşılan karstik boşlukların bazıları dolgulu, bazıları sulu olup tünel açımında zorluk yaratmıştır. Bu kesimlerin iyileştirilmesi ve nihai olarak sağlamlaştırılması için geliştirilen iyileştirme yöntemleri, boşlukların dolgulu ve sulu olmaları durumuna göre farklılıklar göstermektedir. Bu birimler, boşluk bulundurma, boyutları, boşluklar arası ilişkiler ve bu ilişkilerin derecesi gibi yeraltı suyu barındırabilme ve iletebilme kapasiteleri göz önüne alınarak irdelenmişlerdir. Önerilen iyileştirme yöntemleri; tünelde karşılaşılan karstik boşlukların özelliğine göre "Kil Dolgulu Karstik Boşluk" ve "Dolgusuz ve Su Taşıyan Karstik Boşluklar" olarak iki başlık altında ele alınmıştır.

3.4.1. Kil Dolgulu Karstik Boşluk

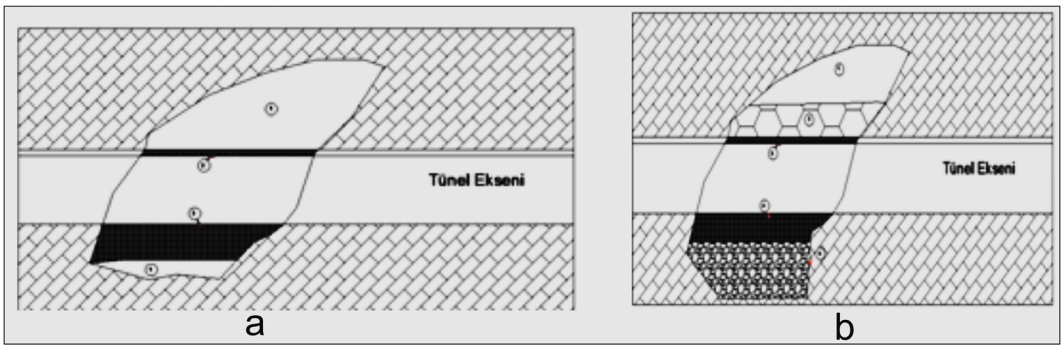
Bu tür karstik boşluklar su taşımayan ve killerle dolu boşluklardır (Şekil 8). Bu tür boşluklar ile karşılaşılması durumunda önerilen yöntem aşağıda belirtilmiştir. Tünel imalatlarında bu türlü bir karstik boşlukla karşılaşılması durumunda;

1. Ön iksa (çelik kuşak, hasır çelik, püskürtme betonu ve süren)
2. Grobeton (2-3 m kalınlığında) gibi yöntemler önerilmiştir.

3.4.2. Dolgusuz ve Su Taşıyan Karstik Boşluklar

Bu tür boşluklar yeraltı suyunu barındıran ve taşıyan güncel karstlardır. Tünel kazısı sırasında bu tip yapılar ile karşılaşılması durumunda çözüm önerisi olarak boşluklarda aşağıdaki sırayla iyileştirme uygulanması öngörülmüştür.

1. Köpük (Çabuk priz alan düşük yoğunluklu malzeme ile yaklaşık 3,0 m dolgu)
2. Köpükten önce ön iksa (Çelik kuşak, hasır çelik, püskürtme beton, süren)
3. Grobeton
4. Serbest drenaj malzemesi (kırmataş malzeme).



Şekil 8. (a) Tünel tabanında kil dolgulu karstik boşluk kesiti **ve (b)** Tünel tavan ve tabanındaki dolgulu tünel kesiti

Tünelde geçilen karstik boşluklu kesimler için ÖNORM B 2203'[15]e göre yapılan kazı ve destekleme sınıflaması Çizelge 4 ve 5'te verilmiştir.

Çizelge 4. T3 Tüneli karstik bölgelerin kazı sınıfı (ÖNORM B 2203) ve geçilen birimler

	Km başlangıcı	Km sonu	Ayna km	Boşluk bölgesi	Kazı sınıfı ve geçirilen birim	Karstik boşluk türü
Sağ tüp	148+283,81	148+286,31	148+283,81	Tavan-eksen kesimi	B2-Kireçtaşı	Dolgusuz ve su taşıyan karstik boşluklar
Sağ tüp	148+159,81	148+167,31	148+159,81	Sağ omuz	B2 -Kireçtaşı	Dolgusuz ve su taşıyan karstik boşluklar
Sağ tüp	147+054,80	147+060,80	147+058,81	Tavan-eksen kesimi	B3 -Kireçtaşı	Dolgusuz ve su taşıyan karstik boşluklar
Sağ tüp	146+868,80	146+872,90	146+868,81	Tavan ve sağ omuz	B2 -Kireçtaşı	Dolgusuz ve su taşıyan karstik boşluklar
Sağ tüp	146+182,00	146+200,00	146+196,00	Tavan	B2 -Kireçtaşı	Dolgusuz ve su taşıyan karstik boşluklar
Sol tüp	148+122,08	148+129,08	148+122,08	Sağ omuz	B2 -Kireçtaşı	Dolgusuz ve su taşıyan karstik boşluklar
Sağ tüp	148+288,25	148+293,00	148+291,81	Sağ omuz	B2 -Kireçtaşı	Dolgusuz ve su taşıyan karstik boşluklar

Çizelge 5. T3 Tüneli karstik bölgelerin kaya sınıfı ve kazı destekleme tablosu

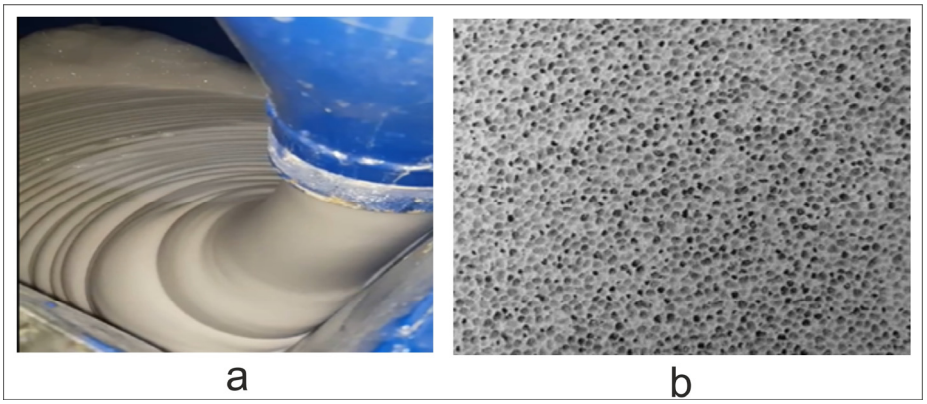
	Kaya Sınıfı (ÖNORM B 2203)	
	B2-Karstik	**B3-Karstik**
Kaya bulonu (m)	4-6*1,5*(1,5-2,0) L=4 m (Alt yarıda) L=6 m (Omuzlarda) (PG Bulon) Karstik kesim L:12 IBO bulon 1x1m ara ile	4-6*1,5*(1,0-1,5) L=4 m (Alt yarıda) L=6 m (Omuzlarda) (PG Bulon) Karstik kesim L:12 IBO bulon 1x1m ara ile
Püskürtme betonu	20 cm (C25/30)	25 cm (C25/30)
Hasır çelik	2 sıra (Q221x221)	2 sıra (Q221x221)
Süren (m)	Üst 120°de, 20-25 cm ara ile (L=6 m) 2"	Üst 120°de, 20-30 cm ara ile (L=6 m) 2"
Çelik iksa	I 120 1,5-2,0 m ara ile	I 160 1,0-1,5 m ara ile
İlerleme adımı (m)	Üstyarı 1,5-2,0 m Altyarı; 3,0 m	Üstyarı 1,0-1,5 m Altyarı; 3,0 m
Nihai beton	Donatısız (C30/37)	Donatısız (C30/37)
Kesit	Taban kemersiz	Taban kemersiz

3.5. Karstik Boşluklarda Kullanılan Hafif (Köpük) Betonun Özellikleri

T3 tünelinde karşılaşılan karstik boşlukların iyileştirilmesi için gerekli değerlendirmeler yapılarak boşlukların hafif betonla doldurulması öngörülmüştür.

Beton içerisinde çeşitli yollarla boşluklar oluşturularak veya birim hacim ağırlığı normal agregaya kıyasla daha düşük olan agregalar kullanılarak betonun birim hacim ağırlığı düşürülebilmektedir. Bu yollardan herhangi biri ile üretilen yoğunluğu 2200 kg/m^3'ten düşük olan betonlara hafif beton denilmektedir.

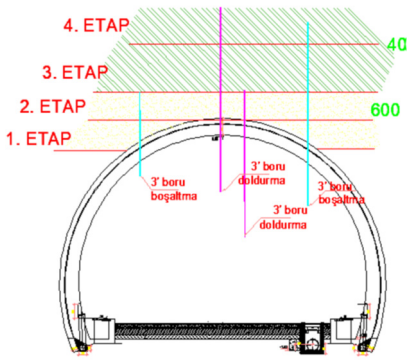
Yapısal hafif beton üretiminde dikkate alınması gereken ilk husus, "dayanım" özeliğinden ziyade "düşük birim hacim ağırlık" özelliğidir. Amaç, maksimum yoğunluk limitlerini aşmadan, minimum dayanım limitlerinin altına düşmeyen beton üretmektir. Hafif betonların birim hacim ağırlığı genellikle 250-1600 kg/m^3 arasında değişir. Yoğunluğu 800 kg/m^3'ten düşük olan betonlar çok hafif beton olarak adlandırılır (Şekil 9). Hafif beton kulanım alanları arasında, geçirimsizliğin sağlanması, tünel, maden, petrol kuyusu, vb. açıklıkların doldurulması ve stabil olmayan zeminlerin sağlamlaştırılması sayılabilir.



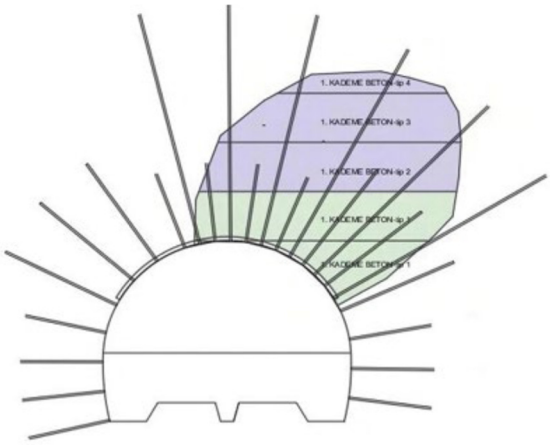
Şekil 9. (a) Hafif köpük beton harcı ve (b) Hava kabarcıklı beton

3.6. Tünel Karstik Boşluklarında Hafif Beton Uygulaması

Karstik boşlukların tünel sağ tüp eksen tavan bölgesinden başladığı, sağ omuz bölgesine doğru genişlediği ve boşlukların 3-8 metre derinliklere ulaştığı görülmüştür. Karstik boşlukların dolgusu kademeler şeklinde uygulanmıştır (Şekil 10 ve 11). Öncelikle alt kademe dolgusu olarak tünelin tavanından itibaren boşluğa doğru en az 2,5 metre kalınlığında varsa yan boşlukları da içine alacak şekilde yoğunluğu 600 kg/m^3 beton enjeksiyonu ile alt kademe oluşturulmuştur. Bu kademenin üzerinde yoğunluğu 400 kg/m^3 olan hafif beton ile boşluğun tamamını dolduracak şekilde üst kademe oluşturulmuştur. Uygulanan hafif betonun tek eksenli basınç değeri alt kademede 3 MPa, üst kademede 1.6 MPa dır (ACI 318-19 Code, [16]. Uygulamada önceden hazırlanan hafif beton karışımı transmikserlerle tünel içerisine getirilmekte ve pompa vasıtasıyla tünel kaplaması içerisinde önceden açılmış delikler vasıtasıyla karstik boşluklara enjekte edilmektedir (Şekil 12). Karstik boşlukların olduğu kesimlerde yapılan destekleme sistemi ve bu kesimlerde uygulanan hafif beton dolgu iyileştirme sistemleri tünel kesitleri üzerinde belirtilmiştir (Şekil 13).



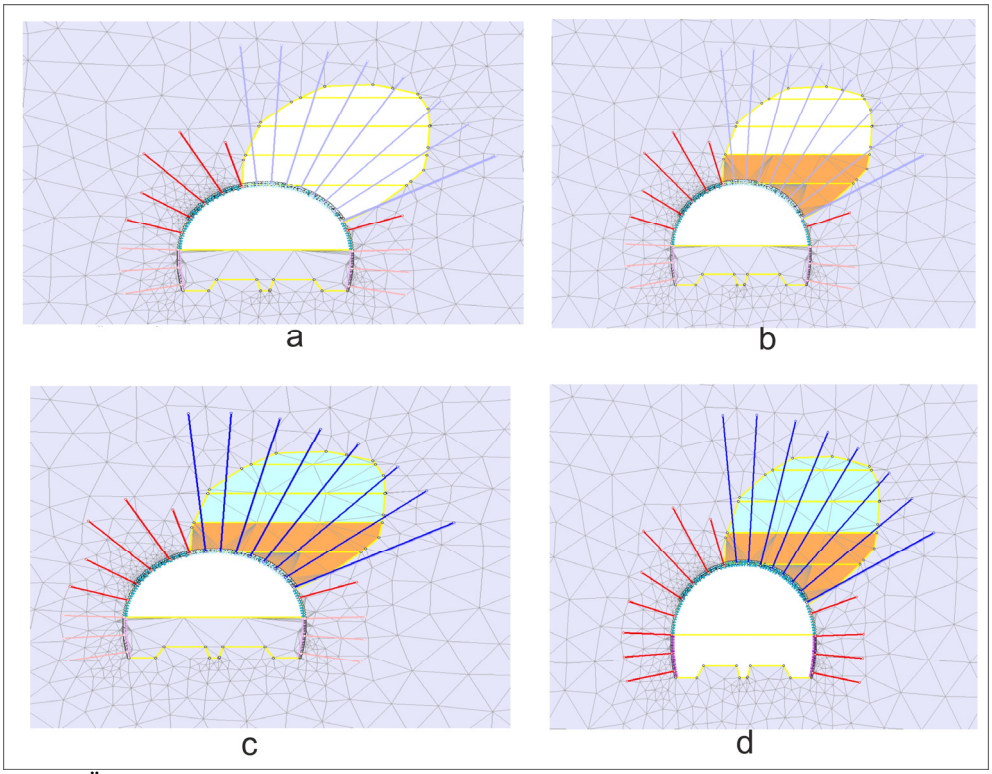
Şekil 10. Tünelde hafif köpük beton uygulaması tip en kesiti



Şekil 11. Tünel sağ tüp karstik boşlukların tipik kesiti



Şekil 12. Hafif köpük betonun hazırlanması ve tavanda uygulanması



Şekil 13. (a) Üst yarı desteklemesi (püskürtme betonu ve bulonlama sisteminin) tipik kesiti, (b) Karstik boşluğun alt kademesinin hafif beton ile doldurulması, (c) Karstik boşluğun üst kademesinin hafif beton ile doldurulması ve (d) Karstik boşluğun ve bulonlama uygulamasının tamamlanmış kesiti

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Mersin – Anamur Karayolu projesinde yer alan T3 Tüneli, farklı litolojiler içeren Pre-Kambriyen yaşlı Sipahili formasyonuna ait kireçtaşı birimleri içerisinde açılmıştır. Tünel kazısı sırasında, km: 46+ 192 ile km:48+290 arasında kireçtaşı içerisinde yer yer dolgusuz ve su taşıyan karstik boşluklarla karşılaşılmış olup beklenmeyen bu özellikten dolayı projede öngörülen destek sistemlerine ilave olarak öneriler geliştirilmiş ve bu kesimlerdeki karstik boşluklar hafif köpük beton kullanılarak doldurulmuştur.

Yapılan güçlendirme işlemi, tünel destekleme elemanlarına, tünel stabilitesine ve trafik güvenliğine destek sağlayacaktır. Bu sebeplerden dolayı karstik boşluk geçilen alanların ek olarak desteklenmesi sağlanarak hem kazı sırasında hem de kalıcı olarak güçlendirilmesi sağlanmıştır. Tünel içerisinde yer alan boşlukların ve kırıklı yapıların kısa ve uzun dönemde tünelde meydana getireceği sorunları ortadan kaldırmak, trafik güvenliğini artırmak ve tünel işletmesi aşamasında beklenen performansı sağlamak için destekleme ve güçlendirme çalışmaları büyük öneme sahiptir.

T3 Tüneli sağ ve sol tüp kesiminde yer alan ve kritik kesitler olarak tanımlanan km:46+872,90 ile km:146+868,81 ve km:146+182,00 ile 146+196 arasında yer alan karstik boşluk, tünel tavan bölgesinden başlayarak tünel sağ omuz bölgesine doğru devam ederek genişleyen ve tünel alt yarısı ile omuz bölgesi arasında sonlanan 1-8 m derinlikte bir yapıdadır. İyileştirme tasarım parametreleri buna göre uygulanmıştır.

Tünel tavan kesiminde saptanan boşluklar, tünel kazı seviyesinden itibaren en az 2,5 m kalınlıkta olacak şekilde, 600 kg/m³ yoğunluğa ve 3,0 MPa tek eksenli basınç dayanımına sahip hafif beton (alt kademe beton tabakası) ile doldurulmuştur. Bu tabakanın üzerine, 400 kg/m³ yoğunluğa ve 1,6 MPa tek eksenli basınç dayanımına sahip hafif beton kullanılarak ikinci bir dolgu tabakası uygulanmış ve boşluklar tamamen stabilize edilmiştir.

Boşluğun fazla olduğu alanlarda da hafif betonunun kademeli olarak doldurulması uygun olacaktır. Bu kesimlerde tünel yüzeylerinin desteklenmesinde çift kat hasır çelik ve sınıflama sisteminde önerilen kalınlıkta püskürtme beton uygulanması daha güvenli destekleme sağlayacaktır. Karstik boşlukların olduğu kesimlerde iksa sistemi kazı projesine uygun olarak öngörülen aralıklarda ve kalınlıklarda uygulanmıştır. Tünelin diğer kesimlerinde de benzer stabilite ve karstik boşluk problemi ile karşılaşılması durumunda bu tasarım projesi uygulanabilir.

Güzergahta 7 adet boşluklu yapıya rastlanmıştır. Bu kesimlerde de karstik boşluklar için aynı sistemi ve çözüm önerileri uygulanmıştır. Tünel kesiminde kullanılacak bulon tipinin kendinden delgili bulon (İBO Bulon (Ø32) olarak kullanılması uygun ve güvenli olacaktır.

5. KAYNAKLAR

1. Terzaghi, K. (1946). Rock defects and load on tunnel supports. *In: Proctor, R.V., White, T.C. (Eds.), Introduction to Rock Tunnelling with Steel Support.* Commercial Shearing and Stamping Co., Youngstava, OH, USA, 271.
2. Bieniawski, T. (1989). Engineering rock mass classifications. *John Wiley and Sons,* 237.
3. Barton, N., Lien, R. & Lunde, J. (1974) Engineering classification of rock masses for the design of Tunnel Support. *Rock Mechanics, 6*, 189-236.
4. Güç, Y. (2024). Mersin-Anamur karayolları T3 tünelindeki karstik boşlukları iyileştirme yöntemleri. *Yüksek lisans tezi.* Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 84.
5. Blumenthal, M.M. (1942). Cenubi Anadolu Toroslarının sahil sıradağlarının Silifke-Anamur arasındaki Jeoloji incelemeler. *MTA Raporu, 2833* (Yayınlanmamış), Ankara.
6. Özgül, N. (1976). Toroslar'ın bazı temel jeolojik özellikleri: *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bülteni, 19*, 65-78.
7. Demirtaşlı E. (1984). Stratigraphy and tectonics of the area between Silifke and Anamur central Taurus Mauntains. *Geology of the Taurus Belt, Int. Symp.,* 101-118.
8. Koç, H. (2003). Aydıncık (İçel) yöresinin tektono-stratigrafisi ve jeolojik evrimi. *Doktora tezi.* Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Adana, 283.
9. Yapıcı, N., Anıl, M. ve Yetiş, C. (2003). Anamur-Malaklar (Mersin) yöresinin jeolojisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi. 18*(2), 267-282.

10. Aydoğdu, M. ve Türkmen, S. (2023). Anamur-Kaledran arası (Mersin) T5 tünelinin kaya kütle sınıflaması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38*(1), 252-263.
11. Hoek, E. & Brown, E.T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,* 1165-1186
12. Hoek, E. & Brown, E.T. (1980). Underground excavations in rock. *Institutions of Mining and Metallurgy.* London, 382.
13. Barton, N. & Grimstad, E. (1994) The Q-system following twenty years of application in NTM support selection. *Felsbau, 12*, 428-436
14. Grimstad, E. & Barton, N. (1993). Updating the Q-system for NTM. *Proceeding of the International Symposium Concrete-Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support,* Norveç
15. ASI ÖNORM B 2203, (2023). *Austrian standards international.* https://www.austrian-standards.at /en/shop/onorm-b-2203-1-2023-03-01~p2653352
16. ACI 318 -19 Code, (1985). Building code requirements for reinforced concrete. *American Concrete Institute. Farmington Hills,* MI, ACI.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 1 MART/MARCH 2026

Binary and Multi-Class Chest X-Ray Classification for COVID-19 and Pneumonia Detection

Çiğdem Gülüzar ALTINTOP [1,a], **Tuğba ŞENTÜRK** [2,b], **Fatma LATİFOĞLU** [1,3,c]

[1]*Erciyes University, Engineering Faculty, Biomedical Engineering Department, Kayseri, Türkiye*
[2]*İnönü University, Engineering Faculty, Biomedical Engineering Department, Malatya, Türkiye*
[3]*Neural Informatics Technologies Inc., Erciyes Technopark, Kayseri, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0001-8632-3385; [b]**ORCID**: 0000-0002-1323-5752; [c]**ORCID**: 0000-0003-2018-9616*

Article Info
Received : 24.07.2025
Accepted : 01.12.2025
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1749930

Corresponding Author
Fatma LATİFOĞLU
flatifoglu@erciyes.edu.tr

Keywords
COVID-19
Coronavirus
Pneumonia
X-ray imaging
Deep learning

***How to cite:** ALTINTOP, Ç.G., ŞENTÜRK, T., LATİFOĞLU, F., (2026). Binary and Multi-Class Chest X-Ray Classification for COVID-19 and Pneumonia Detection. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(1), 29-43.*

ABSTRACT

The Lung disorders, encompassing conditions such as pneumonia and COVID-19, represent significant challenges to global health, impacting millions annually. This study investigates the application of advanced deep learning architectures, specifically AlexNet and SqueezeNet, for the automated classification of chest X-ray (CXR) images from patients diagnosed with pneumonia, COVID-19, and healthy individuals. We achieved an impressive accuracy of 99.85% in binary classification tasks with SqueezeNet and 97.72% for multi-class classification. The results indicate that SqueezeNet outperformed AlexNet in sensitivity, specificity, and accuracy, particularly in distinguishing between COVID-19 and pneumonia. This highlights SqueezeNet's computational efficiency and effectiveness in rapid diagnostic applications. Our findings underscore the importance of timely diagnosis in improving outcomes, especially in resource-limited settings. The use of computer-aided diagnosis (CAD) technologies can aid in early detection and appropriate treatment. Future work will explore deep neural network models on heterogeneous and unbalanced datasets and apply these methods to CT images to enhance generalizability.

COVID-19 ve Zatürre Tespiti için İkili ve Çok Sınıflı Göğüs Röntgeni Sınıflandırması

Makale Bilgileri
Geliş : 24.07.2025
Kabul : 01.12.2025
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1749930

Sorumlu Yazar
Fatma LATİFOĞLU
flatifoglu@erciyes.edu.tr

Anahtar Kelimeler
COVID-19
Koronavirüs
Zatürre
Röntgen görüntüleme
Derin öğrenme

***Atıf şekli:** ALTINTOP, Ç.G., ŞENTÜRK, T., LATİFOĞLU, F., (2026). COVID-19 ve Zatürre Tespiti için İkili ve Çok Sınıflı Göğüs Röntgeni Sınıflandırması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(1), 29-43.*

ÖZ

Zatürre ve COVID-19 gibi hastalıkları içeren akciğer bozuklukları, her yıl milyonlarca insanı etkileyerek küresel sağlık için önemli zorluklar oluşturmaktadır. Bu çalışma, zatürre, COVID-19 ve sağlıklı bireylerden elde edilen göğüs röntgeni görüntülerinin otomatik sınıflandırılması için özellikle AlexNet ve SqueezeNet gibi gelişmiş derin öğrenme mimarilerinin uygulanmasını incelemektedir. SqueezeNet ile ikili sınıflandırma görevlerinde %99.85 gibi etkileyici bir doğruluk, çok sınıflı sınıflandırma için ise %97.72 doğruluk elde edilmiştir. Sonuçlar, özellikle COVID-19 ile zatürreyi ayırt etmede, SqueezeNet'in duyarlılık, özgüllük ve doğruluk açısından AlexNet'ten daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, SqueezeNet'in hızlı tanı uygulamalarındaki hesaplama verimliliğini ve etkinliğini vurgulamaktadır. Bulgularımız, özellikle kaynakların kısıtlı olduğu ortamlarda, zamanında tanının hasta sonuçlarını iyileştirmedeki önemini ortaya koymaktadır. Bilgisayar destekli tanı (CAD) teknolojilerinin erken tespit ve uygun tedaviye katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir. Gelecek çalışmalar, heterojen ve dengesiz veri kümeleri üzerinde derin sinir ağı modellerini araştıracak ve bu yöntemleri BT görüntülerine uygulayarak genellenebilirliği artırmayı hedefleyecektir.

1. INTRODUCTION

Lung disorders include a wide range of problems that affect the lungs and respiratory system, resulting in reduced lung function and breathing. A variety of viral, bacterial or fungal illnesses can cause them. Environmental variables have been related to lung disorders including asthma, mesothelioma, and cancer. They also impact respiratory health, including chronic obstructive pulmonary disease (COPD) and infections like tuberculosis, pneumonia and influenza [1,2]. Pneumonia affects one or both lungs and causes inflammation of the lung parenchyma, which is the part of the lung tissue responsible for gas exchange, including the pulmonary alveoli. Inflammation causes the lung's alveoli to fill up with mucus or liquid, leading in symptoms such as shortness of breath, cough, chest discomfort, fever, and so on. Coronaviruses, commonly known as Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus (SARS-CoV-2), are a group of viruses that may damage the whole human population [3]. Coronavirus illness, frequently referred to as 'COVID-19', was first found in December 2019. Pneumonia remains a serious global health challenge, contributing to high death rates worldwide. It is a leading cause of mortality among children under five years old in developing nations and among the elderly (over 65 years old) in developed countries [4,5]. The SARS-CoV-2 virus has further exacerbated this situation, causing widespread disruption. Globally, up to the present day, there have been over 702 million confirmed cases of COVID-19, resulting in approximately 6.9 million deaths [6]. In many instances, COVID-19 can lead to pneumonia, often necessitating the hospitalization of those affected [7]. However, the two differ in several key aspects: pneumonia can be caused by various pathogens (bacteria, viruses, or fungi), while COVID-19 is specifically caused by the SARS-CoV-2 virus. Additionally, pneumonia is primarily treated based on its underlying cause (e.g., antibiotics for bacterial pneumonia), whereas COVID-19 treatments focus on antiviral therapies and supportive care. Moreover, vaccines exist for both, but they target different pathogens: pneumococcal vaccines for bacterial pneumonia and COVID-19 vaccines for SARS-CoV-2 [4,8].

The accurate diagnosis of both pneumonia and COVID-19 is crucial for effective treatment and patient outcomes. Early detection allows healthcare providers to determine the underlying cause, whether bacterial, viral, or fungal, and apply the appropriate treatment, such as antibiotics for bacterial pneumonia or antiviral care for COVID-19. Misdiagnosis or delayed diagnosis can lead to complications, prolonged illness, and increased mortality, particularly in vulnerable populations like children, the elderly, and those with weakened immune systems. Identifying the right disease ensures timely intervention and can significantly reduce the severity and spread of these infections [9,10].

In diagnosing both COVID-19 and pneumonia, several imaging tools are employed, each with distinct advantages and limitations. Chest X-rays (CXRs) are the most commonly used method due to their accessibility, affordability, and quick results, making them a valuable first-line diagnostic tool. However, they have lower sensitivity compared to computed tomography (CT) scans or magnetic resonance imaging (MRI). CT scans provide higher-resolution images, allowing for more detailed assessments of lung conditions but involve significantly higher radiation exposure and cost [5,11]. MRIs, while effective, are less frequently used for lung diseases due to longer scanning times and higher costs. CXRs, despite their limitations, remain crucial during COVID-19 surges as they enable rapid triaging alongside slower, gold-standard tests like reverse transcription-polymerase chain reaction (RT-PCR). The widespread use of CXRs also helps in resource-limited settings, although their lower resolution increases the risk of misinterpretation, particularly in areas lacking trained radiologists [5,11]. Computer-aided diagnosis (CAD) technologies can assist medical workers, including radiologists and physicians, in diagnosing pneumonia and COVID-19. Deep learning (DL) has been thoroughly explored as a CAD technique for diagnosing pneumonia [12-15] and COVID-19 [16-21]. For more detailed information, review studies (in 2024) on the use of deep learning methods in pneumonia diagnosis [22] and COVID-19 diagnosis [23] can be consulted.

According to data from Johns Hopkins University (latest update as of March 10, 2023), Turkey has recorded 17,042,722 COVID-19 cases and 101,492 deaths, indicating a significant mortality rate associated with this disease. We utilized chest X-ray (CXR) images from patients diagnosed with pneumonia, COVID-19, and healthy individuals to ensure automated diagnosis of these diseases through binary and multi-class classification using some deep learning architectures. Notably, our research distinguishes itself from previous works by not relying on custom models, ensuring a balanced dataset across the groups, and employing SqueezeNet for the first time in such comparisons. Additionally, we achieved a pioneering classification of pneumonia versus normal and COVID-19 versus pneumonia within this dataset,

underscoring the significance of our contributions to the field of medical imaging and disease diagnosis. Figure 1 illustrates the workflow of the study.

The original contributions of this study differ from existing approaches in the literature in several important ways. First, it addresses two specific binary classification scenarios not found in most similar studies: the distinction between COVID-19 and pneumonia, and the classification of normal and pneumonia. These additional classification tasks enable a more comprehensive evaluation of the differential diagnosis process, which is particularly critical from a clinical perspective. Second, the study used a larger and more balanced CXR dataset than many literature studies, thereby increasing the generalizability of the models. Third, the use of lightweight deep learning architectures such as AlexNet and SqueezeNet provides a significant advantage in terms of evaluating the applicability of these models in real-time and resource-limited clinical settings due to their low hardware requirements. Finally, model performance was reported as the mean ± standard deviation across multiple runs, rather than based on a single run, thus emphasizing model stability. In this respect, the study draws attention to consistency assessment, which is often overlooked in the literature.

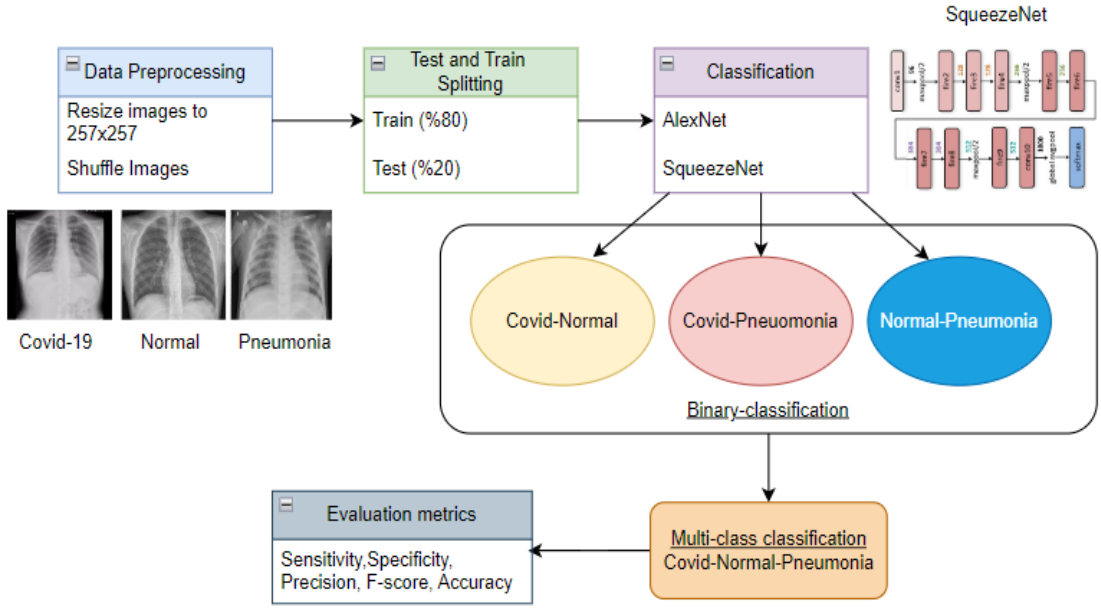


Figure 1. Flowchart of the study

2. MATERIAL AND METHOD

In this section, the dataset used, Convolutional Neural Network (CNN) architectures, and classification results were explained.

2.1. Data Description

The dataset consists of chest CXR images organized into three distinct categories: COVID-19, normal, and pneumonia. It includes a total of 1626 COVID-19 images, 1802 normal images, and 1800 pneumonia images. All images have been preprocessed and resized to 256x256 pixels in PNG format, ensuring uniformity for analysis [24]. This dataset, available as open access at "https://data.mendeley.com/datasets/dvntn9yhd2/1", serves as a valuable resource for researchers and the medical community, facilitating the development of deep learning models for the automatic detection and classification of COVID-19 and pneumonia from CXR images. Figure 2 depicts the distribution of images used in the multi-class and binary classification tasks. In the multi-class setting, the dataset is balanced across the three categories, with 31% COVID-19, 34% pneumonia, and 35% normal images. For the binary task (COVID-19 vs. normal), the distribution is also balanced, consisting of 47% COVID-19 and 53% normal CXR images. In the other binary task (pneumonia vs. normal), the dataset is perfectly balanced, with each class representing 50% of the images. This balanced distribution promotes accurate model training and reduces class bias during evaluation. Figure 3 depicts some images from the dataset.

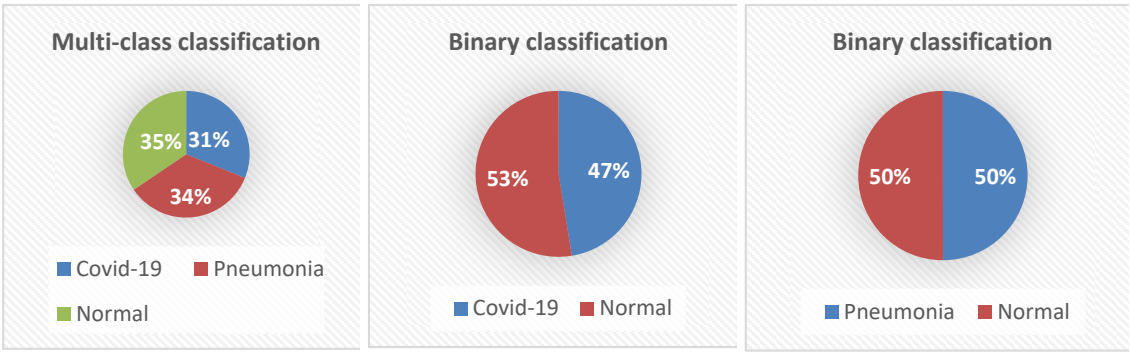


Figure 2. Visualization of data distribution for binary and multi-class tasks



a) b) c)

Figure 3. Sample CXR images from the dataset a) for Covid-19 b) for Normal c) for Pneumonia

2.2. CNN Architectures

In this study, AlexNet and SqueezeNet deep learning architectures were used to classify images. AlexNet was introduced by Krizhevsky et al. [25] in the year 2012. Later on, it won the ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge (ILSVRC) of the same year. This architecture is mainly composed of several layers: five convolutional layers, three fully connected layers, five max-pooling layers, and a final SoftMax layer. It also incorporates ReLU activations and dropout mechanisms to make the model even stronger. This neural network requires input dimensions of 227×227×3. In convolutional layers, features from the input are extracted; a key feature of convolution is that filters (often referred to as kernels) are applied and moved over the input to produce feature maps. Furthermore, pooling layers serve to decrease both the dimensionality and the complication of data in order to enhance efficiency in computational terms through downsampling to retain only the most significant features. Pooling layers normally come after convolutional or fully connected layers. The fully connected layers flatten the 2D feature maps to a one-dimensional matrix-a pathway to data classification.

SqueezeNet is a small deep model trained to provide state-of-the-art performance with many fewer parameters than the larger models like AlexNet. Iandola and his team, in the year 2016, came up with SqueezeNet [26]. The main idea behind SqueezeNet was making it compact and efficient without affecting the accuracies, which really helps the systems with low computational resources. The core idea behind SqueezeNet involves something called the "fire module," a building block that greatly reduces network complexity. In its approach, it first uses a "squeeze" layer with 1x1 filters to reduce the amount of data in the flow, then an "expand" layer which combines both 1x1 and 3x3 filters in order to recover the information at a more detailed level. This method greatly reduces the number of parameters while still being able to find important features within images. The model also replaces the fully connected layers with global average pooling, which again increases its space efficiency. Despite its very compact design, the SqueezeNet demonstrates remarkable performance in image classification tasks and hence should be among the top candidates for resource-constrained platforms such as mobile devices and embedded systems.

AlexNet and SqueezeNet have huge differences in regard to size and efficiency of operation. While AlexNet has around 60 million parameters and requires about 240 MB of memory, SqueezeNet presents a much smaller framework with only 1.2 million parameters and 5 MB for the model size [27]. Such high reduction is possible by using 1x1 convolutions and introducing the "fire module," which includes 1x1 and 3x3 convolutions to keep the effectiveness of feature extraction high. Besides that, Sreplaces fully connected layers with global average pooling, reduces over-fitting, and further reduces the size of the model. While AlexNet is optimized for high accuracy on larger datasets, SqueezeNet is optimized for memory-constrained environments and therefore is very well-suited for mobile and embedded devices [27].

To train the model, we employ deep learning methods with a batch size of 16 using categorical cross-entropy as the loss function. A validation set is used during training to improve accuracy by fine-tuning model parameters. The dataset was trained for 12 epochs, as preliminary experiments showed that accuracy improved and both training and validation losses reached a saturation point within this range, enabling efficient training and high predictive performance without overfitting.

Table 1. The fundamental parameters of AlexNet and SqueezeNet

Parameter	AlexNet	SqueezeNet
Number of layers	8	18
Connected layers	3 fully connected layers	1 global average pooling layer
Activation function	ReLU	ReLU
Optimizer	Adam	Adam
Learning rate	0.0001	0.0001
Dropout	0.5	0.5
Batch size	128	128
Loss function	Cross-entropy	Cross-entropy

2.3. Model Comparison Metrics

5-fold cross-validation was used for training and testing the data. The evaluation of network performance was carried out using several key metrics: accuracy, sensitivity, specificity, precision, and F-score. These metrics were derived from the confusion matrix, illustrated in Table 2. TP designates images correctly classified as COVID-19, FP shows the number of images incorrectly categorized as COVID-19, TN includes images correctly classified as healthy and pneumonia, and FN gives the number of images that were incorrectly categorized as COVID-19 but were, in fact, healthy and pneumonia. All metric calculations were given in Equations (1)-(5). The experiments were performed on a laptop equipped with an Intel Core i5-9300H 8-core CPU running at 2.4 GHz, 16 GB of RAM, and a 4 GB Nvidia GeForce GTX 1650 graphics card.

Table 2. Confusion matrix for COVID-19 class (multi-class classification)

		Predicted class		
		Normal	COVID-19	Pneumonia
Actual class	Normal	TN	FP	TN
	COVID-19	FN	TP	FN
	Pneumonia	TN	FP	TN

$$\text{Sensitivity} = \frac{\text{TP}}{\text{TP+FN}} \quad (1)$$

$$\text{Specificity} = \frac{\text{TN}}{(\text{TN+FP})} \quad (2)$$

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (3)$$

$$\text{F} - \text{Score} = \frac{2\text{TP}}{2\text{TP+FP+FN}} \quad (4)$$

$$\text{Accuracy} = \frac{(\text{TP+TN})}{(all\ predictions)} \quad (5)$$

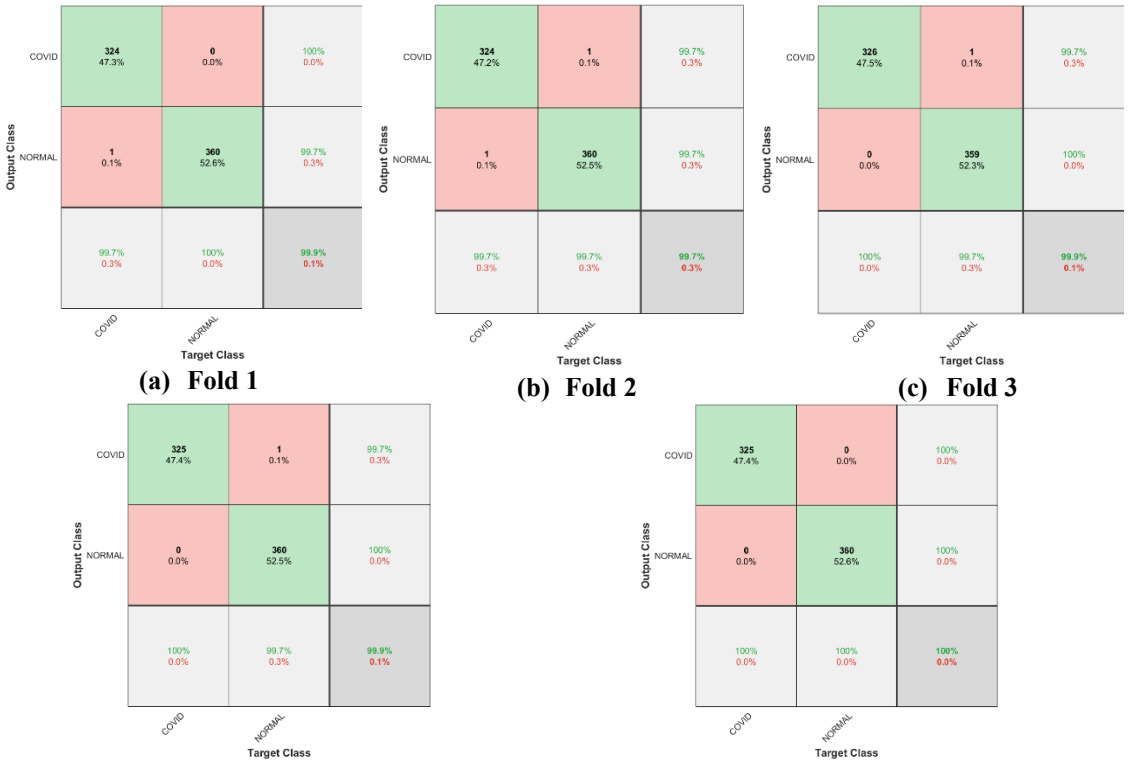
3. RESULTS

In this section, binary classification and multi-class classification results performed with AlexNet and SqueezeNet were given. Table 3 presents the performance metrics for three different binary classifications: Covid-Normal, Covid-Pneumonia, and Normal-Pneumonia, using AlexNet and SqueezeNet. The performance metrics include sensitivity, specificity, precision, F-score, and accuracy. For the Covid-Normal classification, AlexNet achieved an accuracy of 99.42%, while SqueezeNet outperformed it with an accuracy of 99.85%. In the Covid-Pneumonia classification, AlexNet produced an accuracy of 98.51%, whereas SqueezeNet again demonstrated superior performance with 99.85% accuracy. Finally, for the Normal-Pneumonia classification, AlexNet reached an accuracy of 96.25%, while SqueezeNet outperformed it with 98.08%.

Table 3. Binary classification results (%)

binary classification	Method	sensitivity	specificity	precision	F-score	accuracy
Covid-normal	AlexNet	99.69	99.18	99.08	99.38	99.42
	SqueezeNet	99.82	99.89	99.88	99.85	99.85
Covid-pneumonia	AlexNet	98.53	98.58	98.40	98.44	98.51
	SqueezeNet	99.88	99.83	99.82	99.85	99.85
Normal-pneumonia	AlexNet	96.18	96.55	96.45	96.26	96.25
	SqueezeNet	97.82	98.40	98.39	98.09	98.08

SqueezeNet consistently achieved higher results across all classification tasks compared to AlexNet, particularly in the Covid-Normal and Covid-Pneumonia categories, where it excelled with accuracy levels of 99.85% in both cases. The difference is most notable in the Normal-Pneumonia classification, where SqueezeNet achieved 98.08% accuracy, outperforming AlexNet's 96.25%. These results indicate that SqueezeNet is more efficient for binary classification in this context, with a smaller network that offers faster computations without compromising on classification performance. In Figures 4 and 5, confusion matrices for each fold of the Covid-Normal binary classification were given.



(a) Fold 1 **(b) Fold 2** **(c) Fold 3**

(d) Fold 4 **(e) Fold 5**

Figure 4. Confusion matrices for each fold (a–e) of the 5-fold cross-validation in COVID-Normal classification using SqueezeNet

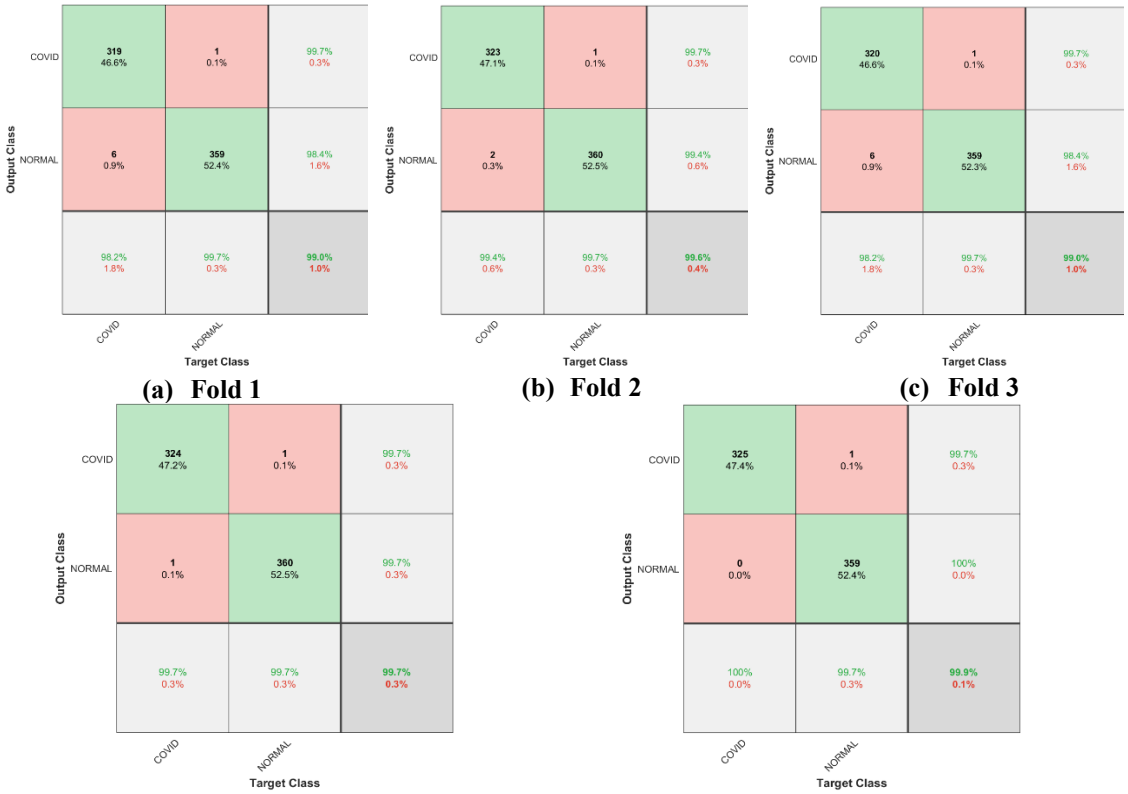


Figure 5. Confusion matrices for each fold (a–e) of the 5-fold cross-validation in COVID-Normal classification using AlexNet

Figure 6 shows the visualization of the standard deviation of the results obtained 5-fold in binary classification. The standard deviation values for each metric (sensitivity, specificity, precision, F-score, and accuracy) show considerable variation across the models and tasks. Higher standard deviation values suggest more variation in model performance over folds. For example, AlexNet's sensitivity for the COVID-Pneumonia and Normal-Pneumonia tasks varies significantly, implying that its predictions for these classes may be unstable. In contrast, SqueezeNet performs better consistently, particularly for COVID-Normal classification.

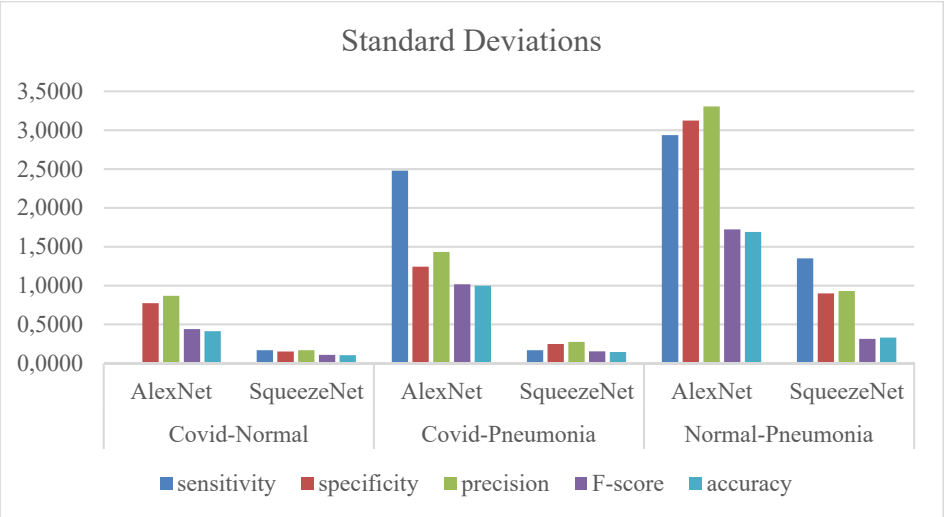


Figure 6. Standard deviations of classification performance metrics across each fold for each binary classification task (COVID-Normal, COVID-Pneumonia, and Normal-Pneumonia) using AlexNet and SqueezeNet models

To explain in more detail, for Covid-Normal classification, AlexNet demonstrated a sensitivity standard deviation of 0.0025, indicating stable sensitivity, but had a higher standard deviation for specificity (0.7740), precision (0.8688), F-score (0.4387), and accuracy (0.4126), suggesting more fluctuations in these areas. SqueezeNet, on the other hand, showed much larger variability, especially in sensitivity (0.1680) and specificity (0.1517), indicating a less stable performance. In the Covid-Pneumonia classification, AlexNet showed relatively higher standard deviations across all metrics, with sensitivity at 2.4800 and specificity at 1.2440, indicating significant fluctuations. SqueezeNet also exhibited lower stability, with sensitivity at 0.1683 and specificity at 0.2473.

Finally, for Normal-Pneumonia classification, AlexNet again showed large standard deviations, with sensitivity at 2.9364 and specificity at 3.1238, reflecting substantial variance in model performance. SqueezeNet showed slightly less variability but still had high standard deviations for metrics like sensitivity (1.3493) and specificity (0.8998). The results indicate that AlexNet generally exhibits more variance in performance, particularly in sensitivity and specificity across all binary classification tasks. SqueezeNet shows slightly better stability in comparison, but still has relatively high standard deviations, especially for precision and F-scores. These findings suggest that while both models can achieve high accuracy, their performance may vary significantly, especially under different test conditions, making it crucial to interpret results with consideration of these variations. Figure 7 shows the confusion matrices for each fold of SqueezeNet, whose average accuracy for multiple classification is 97.72%.

Table 4. Multi-class classification results (%)

Multi-class classification	**Method**	**sensitivity**	**specificity**	**precision**	**F-score**	**accuracy**
Covid-normal-pneumonia	AlexNet	97.44	98.68	97.37	97.39	97.36
	SqueezeNet	97.88	98.88	97.78	97.78	97.72

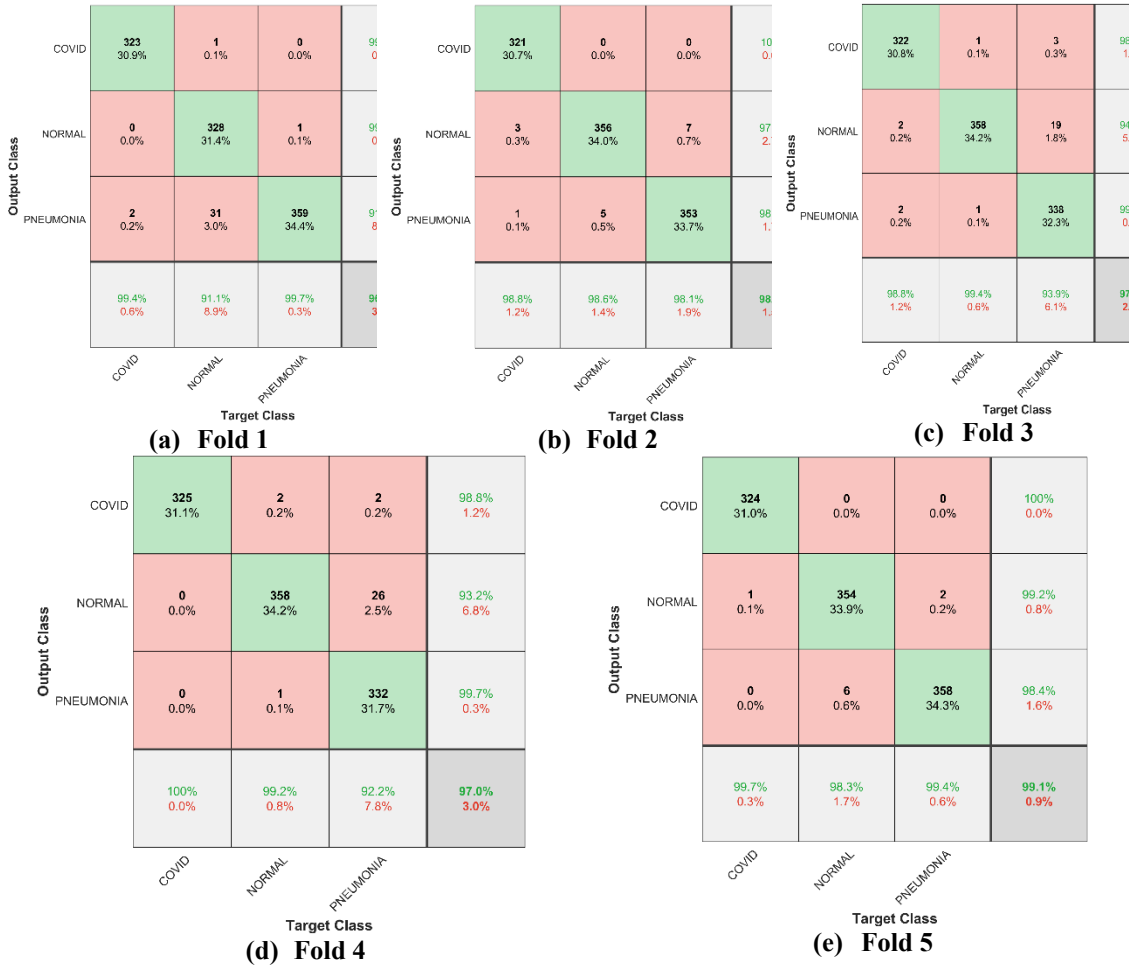


Figure 7. Confusion matrices for each fold (a–e) of the 5-fold cross-validation in COVID-Normal-Pneumonia (multi-class) classification using SqueezeNet

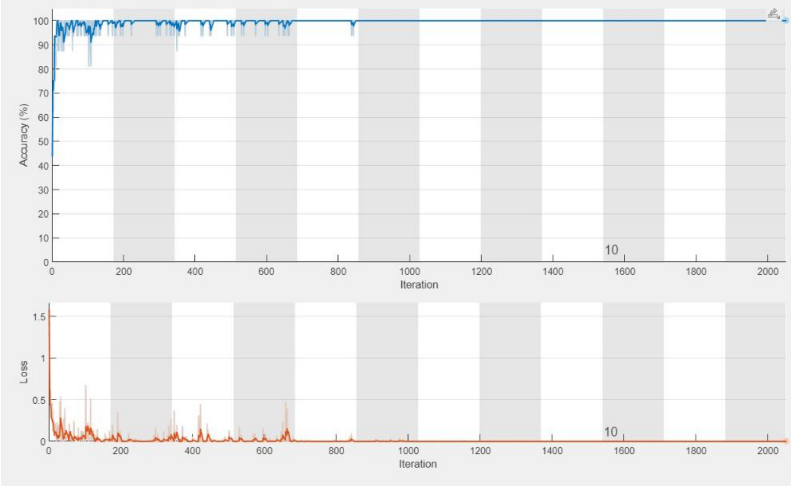


Figure 8. SqueezeNet training process in Covid-Normal classification

Table 4 presents the performance of AlexNet and SqueezeNet in a multi-class classification task involving Covid-Normal-Pneumonia. AlexNet achieved an accuracy of 97.36%, with a sensitivity of 97.44%, specificity of 98.68%, precision of 97.37%, and an F-score of 97.39%. On the other hand, SqueezeNet slightly outperformed AlexNet, achieving an accuracy of 97.72%, with a sensitivity of 97.88%, specificity of 98.88%, precision of 97.78%, and an F-score of 97.78%.

In summary, while both models performed exceptionally well, SqueezeNet showed marginally better results in all evaluation metrics. This demonstrates that SqueezeNet not only maintains high levels of accuracy in multi-class classification but also offers slightly improved sensitivity and specificity compared to AlexNet. These results highlight the potential of SqueezeNet for more accurate classification in complex tasks such as detecting COVID-19, normal, and pneumonia cases simultaneously.

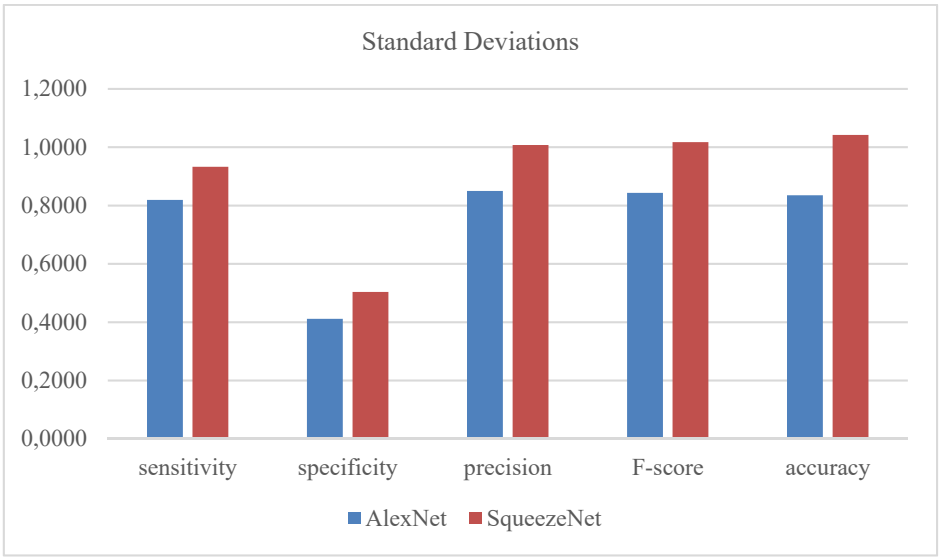


Figure 9. Standard deviations of performance metrics across each fold in the multi-class classification task

Figure 8 depicts how SqueezeNet quickly achieves excellent accuracy at low epoch values. Figure 9 displays the standard deviations of five key performance metrics—sensitivity, specificity, precision, F-score, and accuracy—obtained from 5-fold cross-validation for the multi-class classification task using AlexNet and SqueezeNet models. Each bar in the graph reflects the degree of variability in a particular metric between folds. The standard deviation values reflect the consistency of each model's performance during cross-validation. Lower standard deviations indicate more stable and reliable classification results, while higher values suggest greater fluctuation in the model's predictions. AlexNet has significant

variability across measurements, with the maximum standard deviation in precision and accuracy being about 0.8-0.85. However, SqueezeNet exhibits slightly higher variability, particularly in precision and F-score, with deviations greater than 1.0, indicating more irregularity in its predictions and overall performance. Both models exhibit performance swings, with SqueezeNet having a somewhat larger variance across most metrics than AlexNet. SqueezeNet's greater standard deviations in precision, F-score, and accuracy suggest that its multi-class classification performance is less stable. In contrast, AlexNet is slightly more stable, but still has substantial variability. These variances show the significance of take standard deviation into account when evaluating model performance, as high accuracy alone may not produce consistent results across different data subsets.

The standard deviation analysis reveals that while both models can effectively classify chest X-ray images, AlexNet offers more reliable performance with less fluctuation across validation folds. In contrast, SqueezeNet's higher variation suggests it may be more sensitive to changes in the dataset, which could affect its generalization capabilities in real-world applications.

4. DISCUSSION

CT scans and CXR images are appropriate for identifying lung problems in many countries because patients may receive them promptly and at a low cost. Many studies have employed chest radiographs to detect COVID-19 or pneumonia. Tuncer et al. [28] proposed an intelligent computer vision method for automatic COVID-19 detection from X-ray images, using a novel Residual Exemplar Local Binary Pattern (ResExLBP) for feature extraction and iterative ReliefF for feature selection. The method achieved 100% accuracy with the SVM classifier using 10-fold cross-validation, demonstrating its high effectiveness in Covid-19 diagnosis. However, since 87 Covid-19 CXR images and 234 healthy CXR images were used in this study, there is data imbalance and image scarcity. Khalifa et al. [29] proposed a pneumonia detection method from CXR using generative adversarial networks (GAN) combined with fine-tuned deep transfer learning models. By using GAN to augment the dataset, the model avoided overfitting and generated additional training images, allowing the use of only 10% of the original dataset. ResNet18, AlexNet, GoogLeNet, and SqueezeNet were selected for their lower complexity, with ResNet18 achieving the best performance, including 99% accuracy, precision, recall, and F1 score. The study outperformed related work despite using a smaller portion of the dataset for training. Alshmrani et al. [30] proposed a deep learning architecture for multi-class classification of lung diseases, including COVID-19, pneumonia, lung cancer, tuberculosis (TB), and lung opacity, using CXR images. The model utilized a pre-trained VGG19 combined with three blocks of CNN for feature extraction and classification. The model achieved remarkable performance with 96.48% accuracy, 93.75% recall, 97.56% precision, 95.62% F1 score, and 99.82% AUC. Li et al. [31] proposed a hybrid deep neural network, COVID19-ResCapsNet, for the detection of COVID-19 from chest X-ray images. The model combines an improved Residual feature extraction network and Capsule Networks to classify COVID-19 and non-COVID-19 cases. Evaluated on two datasets (4236 and 2250 images), COVID19-ResCapsNet achieved impressive classification accuracies of 99.88% and 99.33%, respectively. The study also explored the impact of different optimizers and batch sizes, demonstrating the model's effectiveness as a supplementary diagnostic tool in clinical settings. Additionally, in the second dataset containing 750 pneumonia, 750 non-COVID and 750 COVID-19 CXR images, 99.11% accuracy was achieved with COVID19-ResCapsNet and 98.19% accuracy was achieved with ResNet-101 in multi-class classification.

Ali et al. [32] explored the application of deep learning algorithms in medical imaging, particularly using X-rays for diagnosing conditions like lung cancer, bone fractures, COVID-19, and pneumonia. Their custom deep learning model achieved 97.96% accuracy in classifying the dataset equally among healthy, COVID, and pneumonia patients. Also, they conducted experiments using pre-trained DenseNet201, XceptionNet, and MobileNet models for classifying medical conditions from CXR images. The XceptionNet model showed a validation accuracy of 95.53% and a test accuracy of 92.90%. The classification results were reported across training, testing, and validation phases, demonstrating the robustness of the model for medical image analysis. Kumar et al. [33] propose a deep neural network-based model called "LiteCovidNet" for detecting COVID-19 and pneumonia cases using CXR images. The model performs both binary classification (COVID-19 vs. Normal) and multi-class classification (COVID-19, Normal, Pneumonia). It achieves an impressive accuracy of 100% for binary classification and 98.82% for multi-class classification, demonstrating competitive performance compared to other recent studies. Shastri et al. [34] introduced the CheXImageNet model for detecting COVID-19 from digital chest X-ray images

using an open-access dataset. The study achieved a remarkable 100% accuracy for both binary classification (COVID-19 vs. normal X-ray) and multi-class classification (COVID-19, normal X-ray, and pneumonia). While these results are promising, the authors acknowledge that further work is required to enhance the model's robustness. They aim to expand the dataset with more COVID-19 cases and extend their method to digital CT images. Additionally, future work will focus on developing automated tools or software using multi-modality deep learning models, including CT scans and X-rays, for more accurate detection in noisier environments. The authors also plan to explore deeper neural networks to handle larger datasets and improve classification performance. While the study reports 100% accuracy in both binary and multi-class classification, there are some aspects that warrant further discussion. The custom model's validity, when compared to well-established architectures like AlexNet, may be questioned due to the lack of extensive testing on larger datasets. Additionally, the study does not provide details about the training time or computational cost of the algorithm, which are crucial factors in assessing its practical applicability. Therefore, while the results are promising, the generalizability and efficiency of the model need to be further evaluated. Also, The CheXImageNet architecture, with its 27 layers, may introduce a computational load, particularly depending on the available hardware resources like the GPU or CPU. Layers such as convolutional layers with larger filters (32, 64, 256 filters) and activation functions like LeakyReLU can increase the number of trainable parameters, thus adding to the complexity. The input image size also plays a role in determining the overall load. While 27 layers are moderate in size for deep learning models, modern hardware and optimized implementations can manage this efficiently, though it may still impact performance on less powerful systems. Marques et al. [35] proposed an automated diagnosis system for COVID-19 using the EfficientNet model on CXR images. The study employed a 10-fold cross-validation approach and conducted both binary and multi-class classification. In the multi-class task (COVID-19, Pneumonia, Normal), the model achieved an accuracy of 96.70%, while in binary classification (COVID-19 vs. Normal), it achieved 99.62% accuracy. However, the dataset used in this study was relatively small, which may limit the generalizability and robustness of the results. The model showed reasonable performance, but the work did not evaluate other diagnostic challenges, such as distinguishing COVID-19 from pneumonia. Ebenezer et al. [36] investigated the effect of image transformation techniques on EfficientNet performance for classifying COVID-19 from CT scan images. The study achieved an accuracy of 94.56% for binary classification. Although it demonstrated that pre-processing improves performance, it focused solely on CT data and did not evaluate chest X-rays or explore the classification between pneumonia and other conditions. Sharma and Sharma [37] presented a binary classification method for identifying COVID-19 from CT scan images using the EfficientNet model. The study reported a training accuracy of 99.54% and a test accuracy of 98.24%, indicating strong performance in distinguishing COVID-19 from non-COVID cases. However, the study did not include multi-class classification and focused exclusively on CT images without evaluating performance on CXR images or considering lightweight architectures. In comparison, our study used a larger and balanced dataset, achieving 99.85% accuracy in binary classification (COVID-19 vs. Normal) and 97.72% accuracy in multi-class classification using the lightweight SqueezeNet model.

According to binary classification, SqueezeNet consistently delivered higher results in all categories compared to AlexNet. It achieved notably better sensitivity, specificity, and accuracy, especially in the Covid-Normal and Covid-Pneumonia classifications. SqueezeNet's performance highlights its efficiency in binary classification tasks, with a smaller model architecture that offers computational advantages without sacrificing accuracy. This makes it a more suitable option for rapid and accurate diagnostic applications. SqueezeNet is suitable for portable X-ray and low-end environments, enabling fast inference on mobile and embedded clinical devices thanks to its low number of parameters (~1.2M) and small model size (~5MB). AlexNet, on the other hand, is preferred as a reference model in clinical research requiring high accuracy due to its larger capacity and powerful transfer learning capability [26].

In our study, instead of using a custom model, AlexNet and SqueezeNet were employed, achieving an accuracy of 99.85% for binary classification (Covid-Normal, Covid-Pneumonia) using SqueezeNet and an accuracy of 97.72% for multi-class classification using SqueezeNet. This result demonstrates the effectiveness of these well-established deep learning architectures in the detection of COVID-19, offering a competitive performance compared to other models such as "LiteCovidNet" and similar studies that report 100% accuracy. However, a key distinction in our research lies in the unique binary classifications performed: pneumonia vs. COVID-19 and pneumonia vs. healthy. These additional classification tasks, not present in many other studies, further showcase the versatility and robustness of the proposed approach in distinguishing between complex conditions, potentially enhancing diagnostic precision for healthcare

professionals. Table 5 presents representative deep learning–based studies that report binary and multi-class classification results for COVID-19 and pneumonia using CXR datasets of comparable scale, highlighting studies that are widely referenced in the literature. In the study conducted by Ucar [38] and Chowdhury [39], AlexNet was not implemented; instead, data augmentation was employed to increase the image count and achieve class balance. Although Karakanis's study [40] attained high accuracy in multi-class classification, its dataset was balanced but relatively small. Our study, on the other hand, benefits from a larger and balanced dataset, enhancing the robustness of the findings. Furthermore, a unique contribution of this work is the inclusion of specific binary classification tasks (COVID-19 vs. pneumonia and normal vs. pneumonia), which, combined with multi-class classification, yielded high accuracy. These distinctions underscore the efficacy and comprehensive nature of our approach compared to existing studies. Our findings were also compared with the recent study by Singh et al. [41], which used the same dataset. Unlike their Deep CP-CXR model, which is computationally heavier and limited to a single binary task (COVID-19 vs. pneumonia), our approach employs lightweight architectures, performs multiple binary and multi-class classifications, and reports results with stability analysis. These aspects make our method more efficient, broader in scope, and more suitable for real-time clinical applications.

Table 5. Comparison with other studies

Author	Data	Method	Binary classification results	Multi-class classification results
Kumar et al. [33]	1475 normal, 1480 pneumonia and 1281 COVID-19 CXR images	Custom CNN model named LiteCovidNet	(COVID-19 and normal) 100% accuracy	98.82% accuracy
Shastri et al. [34]	358 normal, 340 pneumonia and 347 COVID-19 CXR images	Custom CNN model named CheXImageNet	(COVID-19 and normal) 100% accuracy	100% accuracy
Ucar et al. [38]	1583 normal, 4290 pneumonia and 76 COVID-19 CXR images	Bayes-SqueezeNet	NA	98.3% accuracy
Chowdhury et al. [39]	1579 normal, 1485 pneumonia and 423 COVID-19 CXR images	DenseNet201 and SqueezeNet	(COVID-19 and normal) 99.70% weighted accuracy using DenseNet201 and %99.40 weighted accuracy using SqueezeNet	97.94% weighted accuracy using DenseNet201 and 95.10% weighted accuracy using SqueezeNet
Karakanis and Leontidis [40]	275 normal, 275 pneumonia and 275 COVID-19 CXR images	Custom CNN model	(COVID-19 and normal) 98.7% accuracy	98.3% accuracy
Apostolopoulos and Mpesiana [42]	504 normal, 714 pneumonia and 224 COVID-19 CXR images	MobileNetv2	(COVID-19 and normal) 96.78% accuracy	94.72% accuracy
Aljuaid et al. [43]	2313 CXR images for each class (COVID-19, normal and pneumonia)	Several CNN models	NA	97% accuracy using VGG-19
Singh et al. [41]	1802 normal, 1800 pneumonia, and 1626 COVID-19 CXR images	Deep CP-CXR, Custom CNN model	100% accuracy (COVID-19 and normal)	98.57% accuracy
Randieri et al. [44]	5017 CXR images for each class (COVID-19, normal and pneumonia)	Custom CNN model	NA	97.48% accuracy
Proposed study	1802 normal, 1800 pneumonia, and 1626 COVID-19 CXR images	AlexNet SqueezeNet	COVID-19 and normal 99.85% accuracy, COVID-19 and pneumonia 99.85% accuracy, Normal and pneumonia 98.08% accuracy using SqueezeNet	97.72% accuracy using SqueezeNet

5. CONCLUSIONS

This work highlights the effectiveness of AlexNet and SqueezeNet in automatically classifying chest X-ray images into COVID-19, pneumonia, and healthy categories, achieving a maximum binary classification accuracy of 99.85%. While AlexNet provided consistent performance across all metrics, SqueezeNet, though accurate on average, displayed greater variation in precision and F-score. The study employed a rigorous 5-fold cross-validation framework for the three-class problem, including per-fold confusion matrices and stability analyses, ensuring a thorough assessment of model reliability. These results demonstrate the practical potential of automated diagnostic tools, especially in settings with limited clinical resources. Although the dataset was balanced across groups and larger than those in many previous studies, it was obtained from a single source, which may limit generalizability. Future studies will focus on applying these models to heterogeneous datasets, including CT images, to further evaluate generalizability and enhance diagnostic support for respiratory conditions.

6. DATA AVAILABILITY

The X-Ray images used in this study are openly available at Mendeley data repository [https://data.mendeley.com/datasets/dvntn9yhd2/1]

7. REFERENCES

1. Schwarz, M.I. & King, T.E. (2003). *Interstitial lung disease*. PMPH-USA, 5th Edition, 1151.
2. Abut, S. (2024). AI-based model design for prediction of COPD grade from chest X-ray images: a model proposal (COPD-GradeNet). *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *39*(2), 325-338.
3. Huang, C., Wang, Y., Li, X., Ren, L., Zhao, J., Hu, Y., Zhang, L., Fan, G., Xu, J., Gu, X., Cheng, Z., Yu, T., Xia, J., Wei, Y., Wu, W., Xie, X., Yin, W., Li, H., Liu, M., Xiao, Y., Gao, H., Guo, L., Xie, J., Wang, G., Jiang, R., Gao, Z., Jin, Q., Wang, J. & Cao, B. (2020). Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China. *The lancet, 395*(10223), 497-506.
4. World Health Organization (WHO), (2024). *Pneumonia in children.* (https://www.who.int/), Access date: October 2024.
5. Siddiqi, R. & Javaid, S. (2024). Deep learning for pneumonia detection in chest x-ray images: A comprehensive survey. *Journal of Imaging, 10*(8), 176.
6. Johns Hopkins University & Medicine, Johns Hopkins Coronavirus Resource Center. (https://coronavirus.jhu.edu/), Access date: October 2024.
7. Ieracitano, C., Mammone, N., Versaci, M., Varone, G., Ali, A., Armentano, A., Calabrese, G., Ferrarelli, A., Turano, L., Tebala, C., Hussain, Z., Sheikh, Z., Sheikh, A., Sceni, G., Hussain, A. & Morabito, F. (2022). A fuzzy-enhanced deep learning approach for early detection of Covid-19 pneumonia from portable chest X-ray images. *Neurocomputing, 481*, 202-215.
8. Centers for Disease Control and Prevention (CDC) (2024). *COVID-19: Clinical care.* (https://archive.cdc.gov/), Access date: October 2024.
9. Anderson, R. & Feldman, C. (2023). The global burden of community-acquired pneumonia in adults, encompassing invasive pneumococcal disease and the prevalence of its associated cardiovascular events, with a focus on pneumolysin and macrolide antibiotics in pathogenesis and therapy. *International Journal of Molecular Sciences, 24*(13), 11038.
10. Kim, P.S., Read, S.W. & Fauci, A.S. (2020). Therapy for early COVID-19: a critical need. *Jama, 324*(21), 2149-2150.
11. Rana, S., Hosen, M.J., Tonni, T.J., Rony, M.A.H., Fatema, K., Hasan, M., Rahman, M., Khan, R., Jan, T. & Whaiduzzaman, M. (2024). DeepChestGNN: A comprehensive framework for enhanced lung disease identification through advanced graphical deep features. *Sensors, 24*(9), 2830.
12. Kundu, R., Das, R., Geem, Z.W., Han, G.-T. & Sarkar, R. (2021). Pneumonia detection in chest X-ray images using an ensemble of deep learning models. *PloS one, 16*(9), e0256630.
13. Rajaraman, S., Guo, P., Xue, Z. & Antani, S.K. (2022). A deep modality-specific ensemble for improving pneumonia detection in chest x-rays. *Diagnostics, 12*(6), 1442.
14. Ibrahim, A.U., Ozsoz, M., Serte, S., Al-Turjman, F. & Yakoi, P.S. (2024). Pneumonia classification using deep learning from chest X-ray images during COVID-19. *Cognitive Computation, 16*(4), 1589-1601.

15. Jaiswal, A.K., Tiwari, P., Kumar, S., Gupta, D., Khanna, A. & Rodrigues, J.J.P.C. (2019). Identifying pneumonia in chest X-rays: A deep learning approach. *Measurement, 145*, 511-518.
16. Wang, L., Lin, Z.Q. & Wong, A. (2020). Covid-net: A tailored deep convolutional neural network design for detection of covid-19 cases from chest x-ray images. *Scientific Reports, 10*(1), 19549.
17. Mousavi, Z., Shahini, N., Sheykhivand, S., Mojtahedi, S. & Arshadi, A. (2022). COVID-19 detection using chest X-ray images based on a developed deep neural network. *SLAS Technology, 27*(1), 63-75.
18. Hussain, E., Hasan, M., Rahman, M.A., Lee, I., Tamanna, T. & Parvez, M.Z. (2021). CoroDet: A deep learning based classification for COVID-19 detection using chest X-ray images. *Chaos, Solitons & Fractals, 142*, 110495.
19. Ismael, A.M. & Şengür, A. (2021). Deep learning approaches for COVID-19 detection based on chest X-ray images. *Expert Systems with Applications, 164*, 114054.
20. Oğuz, Ç. & Yağanoğlu, M. (2022). Detection of COVID-19 using deep learning techniques and classification methods. *Information Processing & Management, 59*(5), 103025.
21. Kılıç, Ş. (2025). A novel multi-head attention framework for COVID-19 detection: Hybrid integration of MobileNet and VGG19 with enhanced feature learning. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40*(3), 655-670.
22. Sharma, S. & Guleria, K. (2024). A systematic literature review on deep learning approaches for pneumonia detection using chest X-ray images. *Multimedia Tools and Applications, 83*(8), 24101-24151.
23. Shoeibi, A., Khodatars, M., Jafari, M., Ghassemi, N., Sadeghi, D., Moridian, P., Khadem, A., Alizadehsani, R., Hussain, S., Zare, A., Alizadeh Sani, Z., Khozeimeh, F., Nahavandi, S., Acharya, U. & Gorriz, J. (2024). Automated detection and forecasting of covid-19 using deep learning techniques: A review. *Neurocomputing*, 127317.
24. Kumar, S. (2022). *Covid19-pneumonia-normal chest X-ray images.* Mendeley Data, 1. (https://doi.org/10.17632/dvntn9yhd2.1), Access date: October 2024.
25. Krizhevsky, A., Sutskever, I. & Hinton, G.E. (2012). Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 25.
26. Iandola, F.N., Han, S., Moskewicz, M.W., Ashraf, K., Dally, W.J. & Keutzer, K. (2016). SqueezeNet: AlexNet-level accuracy with 50x fewer parameters and< 0.5 MB model size. *ArXiv preprint arXiv*, 1602.07360.
27. Ullah, A., Elahi, H., Sun, Z., Khatoon, A. & Ahmad, I. (2022). Comparative analysis of AlexNet, ResNet18 and SqueezeNet with diverse modification and arduous implementation. *Arabian Journal for Science and Engineering, 47*(2), 2397-2417.
28. Tuncer, T., Dogan, S. & Ozyurt, F. (2020). An automated residual exemplar local binary pattern and iterative ReliefF based COVID-19 detection method using chest X-ray image. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 203*, 104054.
29. Khalifa, N.E.M., Taha, M.H.N., Hassanien, A.E. & Elghamrawy, S. (2022). Detection of coronavirus (COVID-19) associated pneumonia based on generative adversarial networks and a fine-tuned deep transfer learning model using chest X-ray dataset. *International Conference on Advanced Intelligent Systems and Informatics*, 234-247). Springer.
30. Alshmrani, G.M.M., Ni, Q., Jiang, R., Pervaiz, H. & Elshennawy, N.M. (2023). A deep learning architecture for multi-class lung diseases classification using chest X-ray (CXR) images. *Alexandria Engineering Journal, 64*, 923-935.
31. Li, Z., Xing, Q., Zhao, J., Miao, Y., Zhang, K. & Feng, G. (2023). COVID19-ResCapsNet: A novel residual capsule network for COVID-19 detection from chest X-ray scans images. *IEEE Access, 11*, 52923-52937.
32. Ali, M.M., Ranjan, V., Farid, A. & Raj, M. (2023). Deep learning-based Covid and pneumonia classification. *2023 Second International Conference On Smart Technologies For Smart Nation (SmartTechCon)*, 1462-1466. IEEE.
33. Kumar, S., Shastri, S., Mahajan, S., Singh, K., Gupta, S., Rani, R., Mohan, N. & Mansotra, V. (2022). LiteCovidNet: A lightweight deep neural network model for detection of COVID-19 using X-ray images. *International Journal of Imaging Systems and Technology, 32*(5), 1464-1480.
34. Shastri, S., Kansal, I., Kumar, S., Singh, K., Popli, R. & Mansotra, V. (2022). CheXImageNet: a novel architecture for accurate classification of Covid-19 with chest x-ray digital images using deep convolutional neural networks. *Health and Technology, 12*(1), 193-204.
35. Marques, G., Agarwal, D. & De la Torre Díez, I. (2020). Automated medical diagnosis of COVID-19 through EfficientNet convolutional neural network. *Applied Soft Computing, 96*, 106691.

36. Ebenezer, A.S., Kanmani, S.D., Sivakumar, M. & Priya, S.J. (2022). Effect of image transformation on EfficientNet model for COVID-19 CT image classification. *Materials Today: Proceedings, 51*, 2512-2519.
37. Sharma, P. & Sharma, V. (2024). Classification of COVID-19 utilizing CT scan images employing the EfficientNet model. *2024 International Conference on Advances in Computing Research on Science Engineering and Technology (ACROSET)*, 1-7. IEEE.
38. Ucar, F. & Korkmaz, D. (2020). COVIDiagnosis-Net: Deep bayes-SqueezeNet based diagnosis of the coronavirus disease 2019 (COVID-19) from X-ray images. *Medical Hypotheses, 140*, 109761.
39. Chowdhury, M.E.H., Rahman, T., Khandakar, A., Mazhar, R., Kadir, M.A. & Mahbub, Z.B. (2020). Can AI help in screening viral and COVID-19 pneumonia?. *IEEE Access, 8*, 132665-132676.
40. Karakanis, S. & Leontidis, G. (2021). Lightweight deep learning models for detecting COVID-19 from chest X-ray images. *Computers in Biology and Medicine, 130*, 104181.
41. Singh, K., Gaur, A., Kumar, S., Shastri, S. & Mansotra, V. (2025). Deep CP-CXR: A deep learning model for classification of Covid-19 and pneumonia disease using chest X-ray images. *Annals of Data Science*, 1-24.
42. Apostolopoulos, I.D. & Mpesiana, T.A. (2020). Covid-19: automatic detection from x-ray images utilizing transfer learning with convolutional neural networks. *Physical and Engineering Sciences in Medicine, 43*, 635-640.
43. Aljuaid, H., Adlan, H., Alkebsi, B., Alfurhood, B.S., Liotta, A. & Cavallaro, L. (2026). An experimental comparison of deep learning models for pneumonia classification from chest X-ray images. *Biomedical Signal Processing and Control, 112*, 108742.
44. Randieri, C., Perrotta, A., Puglisi, A., Grazia Bocci, M. & Napoli, C. (2025). CNN-based framework for classifying COVID-19, pneumonia, and normal chest X-rays. *Big Data and Cognitive Computing, 9*(7), 186.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 1 MART/MARCH 2026

Acoustic Response of Aerogel Fiber Nonwovens: The Contribution of Fiber Crimp

Süreyya KOCATEPE [1,2,a]

[1]*RWTH Aachen Institute of Textile Technology (ITA), Germany*
[2]*Fırat University, Department of Textile, Clothing, Shoes and Leather, Vocational School of Organized Industrial Zone, Elazığ, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0001-8084-0699*

Article Info
Received : 09.07.2025
Accepted : 11.12.2025
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1737782

Corresponding Author
Süreyya KOCATEPE
skocatepe@firat.edu.tr

Keywords
Aerogel fiber
Acoustic nonwoven
Sound insulation
Fiber crimp
Acoustic textiles

***How to cite:** KOCATEPE, S., (2026). Acoustic Response of Aerogel Fiber Nonwovens: The Contribution of Fiber Crimp. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(1), 45-54.*

ABSTRACT

This study investigates the impact of fiber crimp on the acoustic performance of nonwoven structures fabricated from aerogel fibers. Aerogel fibers were produced via wet spinning followed by supercritical CO_2 drying, then either uncrimped or thermally crimped. These fibers were blended with polypropylene, carded into webs, and consolidated through needle punching. The sound absorption of the nonwovens was evaluated using an impedance tube across a wide frequency range. Crimping led to a modest yet notable increase in absorption, particularly at higher frequencies, due to increased bulk, porosity, and fiber entanglement. Double-layered samples further showed superior performance over a broader frequency spectrum, underscoring the combined effects of fiber morphology and layer architecture. These insights provide guidance for developing lightweight porous composites for noise reduction applications.

Aerogel Liflerinden Elde Edilen Dokusuz Yüzey Yapıların Akustik Tepkisi: Lif Kıvrımının Katkısı

Makale Bilgileri
Geliş : 09.07.2025
Kabul : 11.12.2025
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1737782

Sorumlu Yazar
Süreyya KOCATEPE
skocatepe@firat.edu.tr

Anahtar Kelimeler
Aerogel lifi
Akustik dokusuz yüzeyler
Ses Yalıtımı
Lif kıvrımı
Akustik tekstiller

***Atıf şekli:** KOCATEPE, S., (2026). Aerogel Liflerinden Elde Edilen Dokusuz Yüzey Yapıların Akustik Tepkisi: Lif Kıvrımının Katkısı. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(1), 45-54.*

ÖZ

Bu çalışma, aerogel liflerinden üretilen dokusuz yüzey yapıların akustik performansı üzerinde lif kıvrımının etkisini araştırmaktadır. Aerogel lifleri, ıslak eğirme ve ardından süperkritik CO_2 kurutma yoluyla üretilmiş, ardından termal kıvrıma tabi tutulmuştur. Bu lifler polipropilen ile karıştırılmış, tülbent halinde taranmış ve iğneleme yoluyla sabitlenmiştir. Elde edilen dokusuz yüzeylerin ses emilim özellikleri, geniş bir frekans aralığında bir empedans tüpü kullanılarak değerlendirilmiştir. Bulgular, aerogel liflere verilen kıvrımın, özellikle daha yüksek frekanslarda, ses emilim katsayısında dikkate değer bir artışa yol açtığını göstermektedir. Bu iyileşme, hava akış direncini ve ses enerjisi dağılımı için kullanılabilir yüzey alanını artıran bir hacme ve gelişmiş gözenekliğin oluştuğuna işaret etmektedir. Ayrıca, çift katmanlı numuneler, daha geniş bir frekans spektrumunda önemli ölçüde üstün akustik performans göstererek, lif morfolojisi ve katman mimarisinin sinerjik etkilerinin altını çizmiştir. Bu bilgiler, gürültü azaltma uygulamalarına yönelik gelişmiş hafif gözenekli kompozitlerin geliştirilmesi için yol gösterici olmuştur.

1. INTRODUCTION

Noise has become an inevitable byproduct of modern life and technological progress, exerting numerous adverse effects on human health, including hearing loss, sleep disturbances, stress, fatigue, and cardiovascular disorders [1,2]. Moreover, it poses a significant threat to biodiversity [3]. According to the World Health Organization (WHO), noise pollution ranks among the most critical environmental issues impacting public health [4]. In Europe, industrial activities [5], transportation and air traffic [1], construction, social gatherings [6], and the food and entertainment industries have collectively re-established noise as a pressing concern. Consequently, strategies aimed at mitigating noise pollution have become increasingly vital.

Ensuring acoustic comfort in transportation systems (such as aircraft, automobiles, and trains) as well as in indoor environments has emerged as an essential component of modern living standards. Among the various approaches to achieving indoor acoustic control, the development and application of sound-absorbing materials stand out. These materials are fabricated from a wide range of raw inputs, including mineral- or polymer-based, natural or synthetic constituents. Fiber-based systems are particularly advantageous due to their lightweight nature, cost-effectiveness, and superior sound absorption capabilities, primarily attributed to the interconnected porous air voids between fibers [7]. The acoustic performance of fibrous porous materials fundamentally stems from the dissipation of sound wave energy through vibration and friction within both the fibers and the surrounding air [8].

In recent years, aerogel-based fiber materials have garnered growing attention due to their lightweight characteristics, high specific surface area, and intrinsic porosity, offering exceptional potential for sound insulation applications. In particular, polyacrylonitrile (PAN)-based aerogel fibers exhibit low density and a porous internal structure, enabling efficient sound energy absorption. Employing these fibers in nonwoven fabric form provides additional benefits, such as ease of production and uniform surface morphology.

Nonwoven structures occupy a distinctive position within sound-absorbing systems due to their fibrous architecture. Their extensive surface areas combined with micro-scale pores make them highly effective for sound insulation. Furthermore, the random arrangement of fibers not only enhances sound absorption but also facilitates more uniform distribution of acoustic energy across the material [9]. However, the acoustic performance of nonwoven surfaces depends on both the microstructural properties of the fibers and their macroscopic arrangement. In this context, imparting crimp to fibers emerges as a critical strategy for improving sound absorption. Crimp refers to the deviation of a fiber from a straight axis, resulting in a wavy or irregular shape, typically characterized by the number of crimps per unit length or the extent of fiber straightening under tension [10].

Beyond its impact on yarn quality, uniformity, and strength during spinning processes [11], crimp significantly increases the bulk of carded webs, facilitates drafting, and enhances the loft of nonwoven structures [12]. The increased inter-fiber distances introduce additional air pockets within the material, which contribute to greater reflection and attenuation of sound waves, thereby improving absorption. Moreover, crimp restricts fibers from lying flat, promoting volumetric stability and yielding a denser overall structure [13,14]. The degree of crimp retention during processing is also crucial; fibers with identical initial crimp levels may exhibit different bulk, elasticity, and air permeability characteristics depending on subsequent processing conditions [15,16].

Certain inherent limitations of synthetic fibers, such as low moisture regain and inadequate thermal insulation, can be partially mitigated by introducing crimp, which effectively traps air between fibers, enhancing both thermal and acoustic performance. Typically, crimping is achieved using a stuffer box method prior to cutting fiber bundles into staple lengths, with crimp frequency exerting a direct influence on the final product's properties. Loose nonwoven fibrous layers have consequently found extensive application in the automotive and construction sectors, driven by increasing demands for sound and thermal insulation [17].

The influence of fiber arrangement and pore structure on sound absorption is well documented. Ibrahim et al. reported that increasing the thickness of fibrous materials significantly enhances low-frequency sound absorption [18]. Similarly, Fahy and Walker, along with Ver and Beranek, emphasized that flow resistance, porosity, air permeability, and fiber crimp are key determinants of the acoustic behavior of textile-based

materials [19,20]. Moreover, reducing fiber diameter has been shown to improve sound absorption. For instance, Koizumi et al. demonstrated that decreasing fiber diameter leads to higher sound absorption coefficients, with micro-denier fibers exhibiting particularly pronounced effects [21]. Likewise, Lee et al. found that reducing polyester fiber diameter to 1.25 dpf increased airflow resistance, thereby enhancing acoustic performance [22].

Against this backdrop, the present study investigates the impact of fiber crimp on the acoustic properties of nonwoven surfaces produced using PAN-based aerogel fibers with a diameter of 20 µm, processed via a thermal crimping method. Nonwoven samples of varying areal densities and needling intensities were fabricated, and their acoustic performance was comprehensively evaluated. This study hypothesizes that introducing crimp to aerogel fibers will enhance the sound absorption of nonwoven structures by increasing porosity and tortuosity.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Materials

This study primarily used polyacrylonitrile (PAN)-based aerogel fibres and polypropylene (PP) fibres. The PP fibres had a fineness of 6.7 dtex, a length of 80 mm, and were commercially sourced. The aerogel fibres were produced in the laboratory with a diameter of 30 micrometres, then cut to a length of 80 mm for use in producing nonwoven fabrics.

2.2. Inducing Crimp in Fibers

Thermal crimping was applied to the aerogel fibers to enhance their volumetric properties and improve the acoustic performance of the resulting nonwoven fabrics. The crimping process involved exposing the drawn aerogel fibers to a hot air flow at 130°C for 45 seconds, followed by rapid cooling. This treatment caused irregular bending along the fiber axis, resulting in permanent crimp formation. Consequently, the surface area and volume of the fibers increased, contributing to the formation of more air voids in the nonwoven fabrics produced in subsequent steps, thereby enhancing sound absorption capacity. The temperature and duration parameters applied during the crimping process were determined based on the thermal behavior of PAN fibers were maintained within ranges recommended in the literature [10].



Figure 1. Imparting crimp to aerogel fibers

2.3. Production of Nonwoven Fabrics

2.3.1. Web Formation

The initial step in the production of nonwoven fabrics is web formation. For this purpose, a laboratory-scale carding machine (Mesdan Card) was employed. This equipment consists of a wide conveyor belt, two feeding rollers, three pairs of stripper and worker rollers, a fancy clearer, and an oscillating mechanism that strips the web from the card clothing and transfers it to the collecting drum, enabling the production of webs with desired thickness.

Initially, production was carried out using only PP fibers; subsequently, a homogeneous blend of aerogel and PP fibers was prepared and carded. During this stage, both the homogeneity of the fiber blend and the

structural characteristics of the webs after needling were evaluated. The carded web was subjected to needle punching to enhance surface stability and promote fiber bonding [Figure 2].

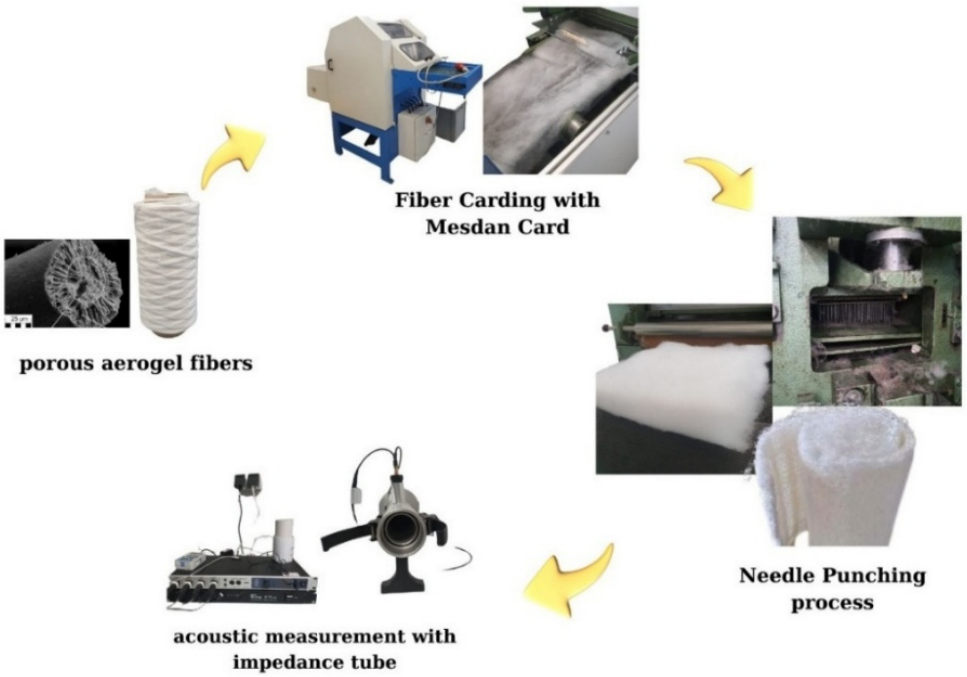


Figure 2. Material production flow diagram

2.4. Experimental Design

Nonwoven fabrics were produced by blending aerogel fibers and polypropylene (PP) fibers at basis weights of 500 and 1000 g/m², as specified in the experimental design. Samples were prepared with fiber blends consisting of 40% aerogel, 60% PP. The samples produced using crimped aerogel fibers were evaluated comparatively against those produced with uncrimped fibers.

In the experimental design, samples coded as 1C, 1CR, 1K, 1KC, 2C, 2CR, 2K, and 2KC are given in Table 1. The codes which starts with '2' refer to the double layer versions of corresponding '1' series samples.

Table 1. Preliminary experimental design plan

Exp.	Sample Code	Gram Weight (g/m²)	Aerogel (%)	PP (%)	Total fiber amount (gr)	Aerogel amount (gr)	PP amount (gr)	Crimp Value
1	1C	500	40	60	250	100	150	Non-crimped
2	1CR	500	40	60	250	100	150	Crimped
3	1K	1000	40	60	500	200	300	Non-crimped
4	1KC	1000	40	60	500	200	300	Crimped
5	2C	1000	40	60	500	200	300	Non-crimped
6	2CR	1000	40	60	500	200	300	Crimped
7	2K	2000	40	60	1000	400	600	Non-crimped
8	2KC	2000	40	60	1000	400	600	Crimped

The fibers, which were combed into fabric, were fixed in place using the needling method on a needling machine. An LBM 6 type needling machine manufactured by Oskar Dilo KG Maschinenfabrik was used. In all samples in the test plan, the needle length was set to 3 inches (approximately 76 mm), the stitch depth to 2.5 units (according to the machine scale), and the impact depth to automatic mode (standard setting). Needling density is 75 punches/cm².

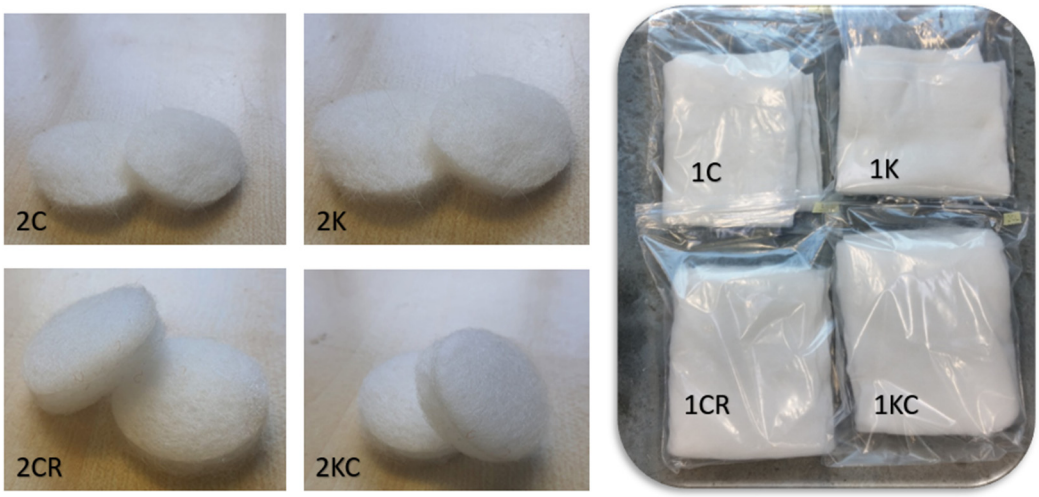


Figure 3. Nonwoven samples produced from crimp and non-crimp fibers

2.5. Morphological Characterization

The morphology of both crimped and uncrimped fibers, as well as the nonwoven fabrics produced from these fibers, was examined using scanning electron microscopy (SEM). SEM analyses provided detailed evaluation of the surface properties of the fibers and the structural changes following crimping. In particular, the relationship between fiber diameter and crimp structure was analyzed through images obtained at 50 µm magnification. The crimp characteristics were qualitatively verified via SEM imaging, which revealed enhanced fiber undulations post-crimping.

2.6. Acoustic Performance Measurements

All acoustic measurements were conducted at the Aachen TFI laboratories using a Siemens-brand impedance tube. The measurements followed the DIN EN ISO 10534-2 standard, which specifies the determination of the normal incidence sound absorption coefficient of sound-absorbing materials using an impedance tube equipped with two microphones and a frequency analysis system.

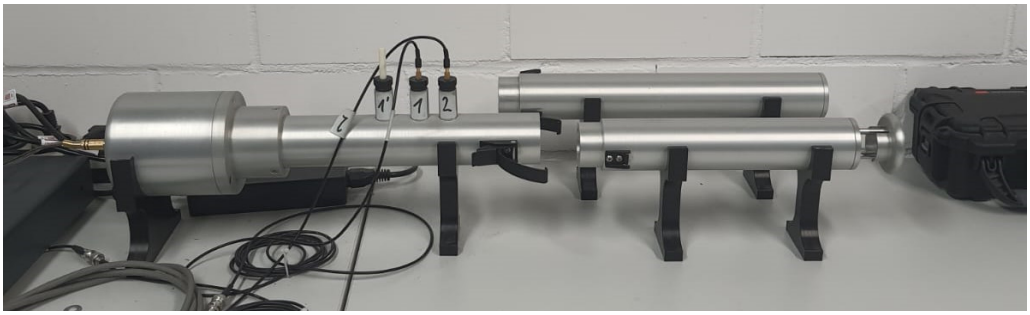


Figure 4. Sıemens mark impedance tube at TFI



Figure 5. Preparation of samples for acoustic measurement

3. RESULTS AND DISCUSSION

First, Table 2 presenting the basic physical properties of the samples, including thickness, porosity, and basis weight, is provided. Subsequently, the morphological images obtained from SEM analyses and the acoustic performance results are presented and discussed sequentially.

All parameters listed in Table 2 were calculated by applying the calculation procedures and formulas outlined below.

The bulk density of the fabric (d, g/cm³) was determined using the mean measured mass per unit area (M, g/m²) and thickness (t, cm) as follows: [23]

$$d = \frac{M}{t} \tag{1}$$

The fiber volume fraction (FVF, %) expresses the volume occupied by fibers relative to the full volume of the fabric. This value is obtained by the ratio of fiber volume to the overall fabric volume [24]

$$FVF = \frac{M}{t\ x\ \rho_f} \tag{2}$$

In this formula, M represents the measured mass per unit area (g/cm²), t is the fabric thickness (cm), and ρ is the density of the fiber blend (g/cm³). The density of the component fibers was derived using a weighted average, following the method described in [26]

$$\rho_f = w_p\rho_p + w_v\rho_v \tag{3}$$

Here; w_p and w_v define weight fraction of pp and aerogel fibers (%), respectively. ρ_p is the density of pp fiber (0,67g/cm3) and ρ_v is the density of aerogel fiber (0.003g/cm3).

Porosity = (1-FVF)x100

Table 2. Physical properties of the nonwoven samples

Exp.	Sample code	Material weight (gr)	Surface area (cm²)	Thickness (cm)	Bulk density (g/cm³)	Areal weight (g/cm²)	Bulk density (g/cm³)	Fiber volume friction (FVF)	Porosity (%)
1	1C	19,8	400	0,912	0,05428	0,049	0,05427	0,13461	86,53861
2	1CR	20,1	400	0,924	0,05438	0,050	0,05438	0,13487	86,51212
3	1K	40,4	400	1,956	0,05164	0,101	0,05163	0,12806	87,19345
4	1KC	40,1	400	0,946	0,10597	0,100	0,10597	0,26282	73,71713
5	2C	39,9	400	1.876	0,05317	0,099	0,05317	0,13187	99,98681
6	2CR	40,3	400	1,886	0,05341	0,100	0,05341	0,13248	86,75100
7	2K	81,2	400	3,92	0,05177	0,203	0,05178	0,12843	87,15632
8	2KC	80.5	400	1,907	0,10555	0,201	0,10553	0,26173	73,82632

The acoustic performance of nonwoven fabrics produced from both crimped and uncrimped fibers was evaluated. SEM images of the fibers and the corresponding nonwoven fabric samples were obtained before and after the crimping process (Figure 6).

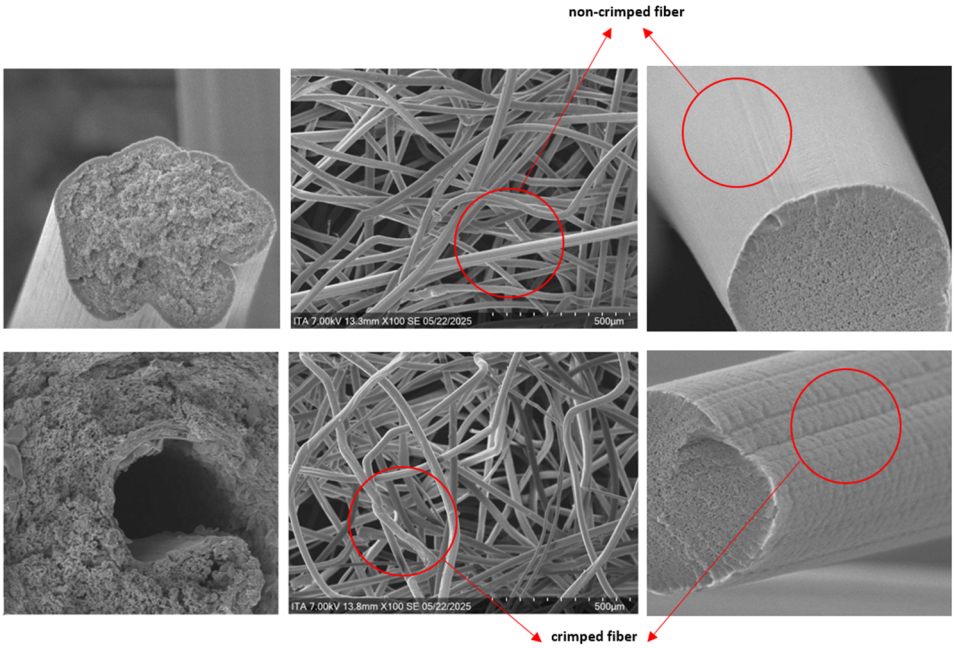


Figure 6. SEM anaylses of fiber and nonwoven sample: noncrimps fiber and nonwoven (above), crimp fiber and nonwoven (below)

The images provided an important reference for assessing whether the internal porous structure of the fibers was compromised after crimping and for visually confirming the morphological prominence of the crimp. Based on these observations, it was concluded that the crimping process did not damage the internal structural integrity of the fibers; rather, in some areas, it introduced increased irregularity in the porous structure, leading to variations in sound absorption. SEM analysis illustrated more pronounced fiber waviness in crimped samples, indicating increased tortuosity and potential for higher acoustic dissipation paths.

In this study, the effects of basis weight and crimping (imparting waviness to the fibers) on the sound absorption performance of nonwoven fabrics produced from aerogel and PP fibers were systematically investigated. The findings are discussed in detail below.

The sound absorption coefficients (α) of the produced nonwoven fabrics were evaluated with respect to the crimp condition of the fibers. Comparative analyses were conducted over the frequency range of 100 Hz to 5000 Hz, with samples produced from both crimped and uncrimped fibers tested under identical manufacturing parameters.

Incorporating crimp into the fiber structure significantly impacted the internal architecture of nonwoven fabrics, directly influencing their acoustic behaviour. Crimped fibers created a network in nonwoven surface that was more irregular, tortuous and spatially expanded, increasing the number of fiber–air interfaces and enhancing the propagation pathway of incident sound waves. As a result, crimped samples demonstrated enhanced sound energy dissipation, particularly within the middle to high frequency range. This is consistent with earlier findings indicating that fiber waviness modifies essential structural properties, such as porosity and volumetric density, thereby affecting the acoustic performance of nonwoven materials [26,27].

Changes in base weight have also significantly affected the acoustic properties of the samples. Increasing the base weight from 500 g/m² to 1000 g/m² and then to 2000 g/m² reduced the pore volume and increased fibre entanglement, thereby creating more compact fibre structures within the material. These morphological changes in the production of nonwoven surfaces have been observed to encourage multiple reflections and viscous friction by allowing sound waves to pass through longer and more complex internal paths. Consequently, samples produced at higher base weights demonstrated noticeably higher sound absorption capabilities, particularly at high frequencies where pore complexity plays a dominant role in acoustic attenuation.

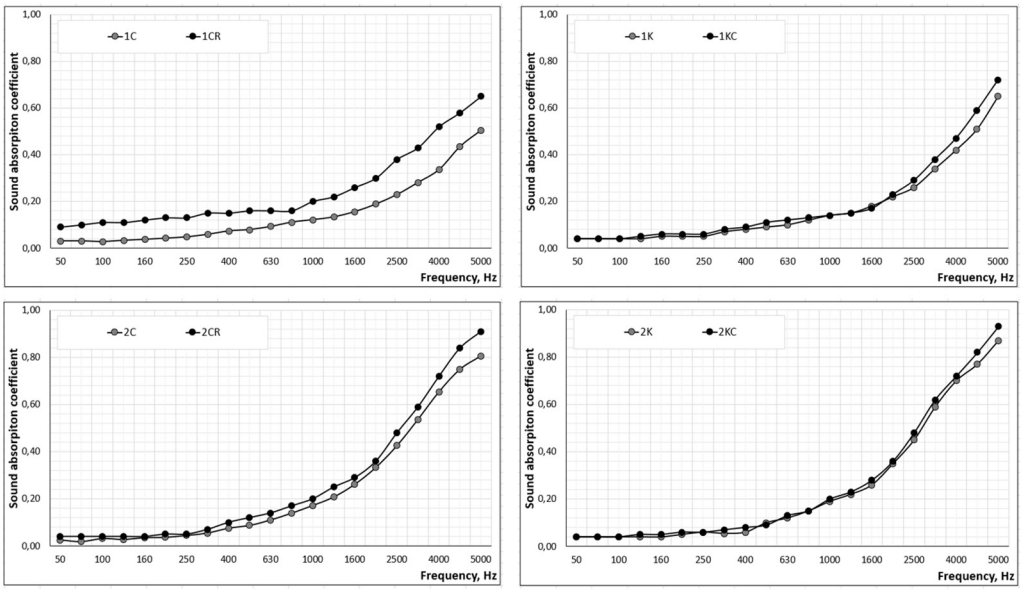


Figure 7. Sound absorption coefficient of samples with different crimp levels and basis weights across 100-5000 Hz.

Direct comparison of crimped and non-crimped samples of identical basis weight further highlights the positive impact of crimping. The crimped fibers formed a more convoluted internal geometry, enhancing scattering, reflection and frictional losses within the structure. This improvement was most evident in the mid-to-high frequency region, demonstrating that fiber morphology is a critical determinant of acoustic performance in aerogel-based nonwovens.

The combined effects of basis weight, crimping and layering showed that the 2KC sample, which was produced with a total basis weight of 2000 g/m² and crimped fibers, exhibited the most compact structural characteristics. This specimen had the highest bulk density (0.105 g/cm³) and fiber volume fraction (0.26), and the lowest porosity (73.8%). These properties are indicative of a densely packed fiber network. This microstructure enhances the material's ability to dissipate acoustic energy, particularly within frequency ranges where internal friction and scattering are dominant. These properties highly suggest that the 2KC sample is capable of achieving the highest sound absorption coefficients.

As shown in Table 2, the bulk density values for 1C, 1CR, 1K and 1KC ranged from approximately 0.051 to 0.106 g/cm³. Double-layer samples exhibited similar patterns, with 2CR and 2KC consistently showing higher densities and FVF values than non-crimped ones. Samples produced from crimped fibers, particularly 1KC and 2KC, showed pronounced increases in both bulk density and fiber volume fraction, confirming their more consolidated and compact internal architecture. These structural parameters closely align with their superior expected performance in sound absorption, particularly at medium and high frequencies.

Overall, the results clearly demonstrate that nonwoven fabrics produced with higher basis weights and crimped aerogel fibers exhibit significantly enhanced acoustic absorption. The combination of increased fiber mass, reduced porosity and a more intricate internal fiber arrangement makes these materials strong candidates for high-performance acoustic insulation applications, particularly in systems requiring lightweight yet effective sound absorption. Similar studies on alternative insulation materials are also available in the literature [28,29].

4. CONCLUSIONS

All results in this study show that the acoustic behaviour of aerogel–polypropylene (PP) nonwoven surfaces can be significantly impacted by various structural factors, particularly basis weight and the incorporation of crimped fibers. As basis weight increased, the fabric structure became more consolidated, creating more complex airflow paths inside the material and enabling the samples to absorb more sound at medium and

high frequencies. Crimped fibers also played an important role, creating a more irregular and entangled network that encouraged additional friction and scattering of sound waves.

The samples produced with both a higher basis weight and crimped fibers, such as the 2KC sample, stood out due to their compact internal structure and notably better acoustic response. These results suggest that carefully adjusted aerogel-based nonwovens with specific fiber morphology could be promising candidates for use in areas requiring lightweight yet effective sound absorption, including interior building applications.

Future studies could examine how different crimp levels, alternative aerogel–polymer blends and changes in needling or fiber ratios might further improve the acoustic behaviour of similar nonwoven structures. Exploring these parameters could provide a more detailed understanding of how to fine-tune the material for specific performance requirements.

5. ACKNOWLEDGMENTS

This research was financially supported by the TÜBİTAK 2219 International Postdoctoral Research Fellowship Program. The author expresses sincere gratitude to the Institute of Textile Technology at RWTH Aachen University for providing access to the laboratory facilities and for their invaluable technical assistance throughout the course of this study.

6. REFERENCES

1. Floud, S., Blangiardo, M. & Clark, C. (2013). Exposure to aircraft and road traffic noise and associations with heart disease and stroke in six European countries: A cross-sectional study. *Environmental Health, 12*, 89.
2. Eulalia, P. (2020). *Noise pollution is a major problem, both for human health and the environment.*
3. Sordello, R., Ratel, O. & Flamerie De Lachapelle, F. (2020). Evidence of the impact of noise pollution on biodiversity: A systematic map. *Environmental Evidence, 9*, 20.
4. Moszynski, P. (2011) WHO warns noise pollution is a growing hazard to health in Europe. *BMJ, 342*, d2114.
5. Ahmed, S.S. & Gadelmoula, A.M. (2022). Industrial noise monitoring using noise mapping technique: A case study on a concrete block-making factory. *International Journal of Environmental Science and Technology, 19*, 851-862.
6. Lokhande, S.K., Garg, N., Jain, M.C. & Rayalu, S. (2022). Evaluation and analysis of firecrackers noise: Measurement uncertainty, legal noise regulations and noise-induced hearing loss. *Applied Acoustics, 186*, 108462.
7. Yang, S. & Yu, W.D. (2011). Air permeability and acoustic absorbing behavior of nonwovens. *Journal of Fiber Bioengineering, 3*, 203-207.
8. Zwikker, C. & Kosten, C.W. (1949). Sound absorbing materials. *Elsevier Publishing*.
9. Kazragis, A., Gailius, A. & Juknevičiute, A. (2002). Thermal and acoustical insulating materials containing mineral and polymeric binders with cellulose fillers. *Materials Science, 8*, 193-195.
10. Das, A. & Alagirusamy, R. (2010) Thermal transmission. In A. Das, R. Alagirusamy (Eds.), *Science in clothing comfort,* 79-105. Woodhead Publishing.
11. Maity, S. (2014). Characteristics and effects of fibre crimp in nonwoven structure. *Journal of the Textile Association, 76*(6), 360-366
12. Bauer-Kurz, I. (2000). Fiber crimp and crimp stability in nonwoven fabric process. *Doctoral thesis,* NCSU Libr., No. 11.
13. Hamza, H., ElHadi, H. & Mansour, R. (2018). Physico-chemical and mechanical characterization of jute fabrics for civil engineering applications. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering, 18*(1), 129-147.
14. Stig, F. & Hallström, S. (2019). Effects of crimp and textile architecture on the stiffness and strength of composites with 3D reinforcement. *Advanced Materials Science and Engineering*, 1-8.
15. Itoh, M. & Komori, T. (1991). An extension of the theory of the deformation of fiber assemblies. *Sen'i Gakkaishi, 47*(11), 563-572.

16. Ban, E., Barocas, V.H., Shephard, M.S. & Picu, C.R. (2016). Effect of fiber crimp on the elasticity of random fiber networks with and without embedding matrices. *Journal of Applied Mechanics, 83*(4), 1-7.
17. Avcıoğlu-Kalebek, N. (2016). Sound absorbing polyester recycled nonwovens for the automotive industry. *Fibres and Textiles in Eastern Europe,* 24.
18. Ibrahim, M.A. & Melik, R.W. (1978). Physical parameters affecting acoustic absorption characteristics of fibrous materials. *Proceedings of the Mathematical and Physical Society of Egypt*, 46.
19. Fahy, F. & Walker, J.G. (1998). *Fundamentals of noise and vibration.* E & FN Spon.
20. Ver, I.L. & Beranek, L.L. (2006). *Noise and vibration control engineering: Principles and applications* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
21. Koizumi, T., Takanashi, Y. & Adachi, A. (2018). Sound absorption properties of nonwoven fabrics produced from micro-denier fibers. *Journal of Industrial Textiles, 47*(4), 1011-1024.
22. Lee, J.Y., Kim, S.W. & Kim, J.H. (2021). Effect of polyester fiber diameter reduction to 1.25 dpf on airflow resistance and sound absorption properties of nonwoven fabrics. *Journal of Industrial Textiles, 50*(3), 456-467.
23. Payen, J., Vroman, P., Lewandowski, M., Perwuelz, A., Callé-Chazelet, S. & Thomas, D. (2012). Influence of fiber diameter, fiber combinations and solid volume fraction on air filtration properties in nonwovens. *Textile Research Journal, 82*(19), 1948-1959.
24. Barker, R.L. & Heniford, R.C. (2011). Factors affecting the thermal insulation and abrasion resistance of heat resistant hydro-entangled nonwoven batting materials for use in firefighter turnout suit thermal liner systems. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 6*(1), 1-10.
25. Koç, E. & Çinçik, E. (2012.) An analysis on abrasion resistance of polyester-/viscose-blended needle-punched nonwovens. *The Journal of the Textile Institute*, 852-860.
26. Kang, T.J., Kim, S.M. & Yoo, C.H. (2012). Acoustic absorption properties of nonwoven fabrics with various fiber shapes and orientations. *Textile Research Journal, 82*(14), 1472-1483.
27. Lee, J.Y., Kim, S.W. & Kim, J.H. (2005). Sound absorption characteristics of nonwoven fabrics with recycled polyester fibers. *Journal of Industrial Textiles, 34*(4), 271-285.
28. Binici, H., Küçükönder, A., Eken, M., Sevinç, A.H. ve Tüfenk, N. (2013). Atık kâğıt ve mukavvaların yalıtım malzemesi ve radyasyon tutucu materyal olarak üretiminde kullanılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 28*(1), 21-29.
29. Binici, H., Sevinç, A.H. ve Efe, V. (2015). Atık gazete kâğıdından yalıtım malzemesi üretimi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30*(2), 13-23.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 1 MART/MARCH 2026

Frequency Selective Surface Used as a Band-Stop Filter in Microwave-Powered Combi System

Emin ÜNAL [1,a], **Faruk ÖZYURT** [1,b]

[1]*Necmettin Erbakan University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Konya, Türkiye*

[a]***ORCID***: *0000-0002-4088-8353;* [b]***ORCID***: *0000-0002-4113-5417*

Article Info
Received : 05.09.2025
Accepted : 16.12.2025
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1778659

Corresponding Author
Emin ÜNAL
emin.unal@erbakan.edu.tr

Keywords
F*rekans seçici yüzey*
B*ant durduran filtre*
R*F ve mikrodalgalar*
S *parametreleri*

How to cite: *ÜNAL, E., ÖZYURT, F., (2026). Frequency Selective Surface Used as a Band-Stop Filter in Microwave-Powered Combi System. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(1), 55-64.*

ABSTRACT

Today, heating systems generally use fossil fuels, which are quite inefficient. These systems not only have high energy costs but also emit carbon dioxide. This study proposes a band-stop filter design that allows the use of microwave energy instead of fossil fuels in heating systems. A frequency-selective surface (FSS) with a band-stop filter operating at 2.45 GHz has been designed to prevent microwaves generated in the magnetron from leaking out of the water tank. The design is implemented using a FIT-based simulation program, samples are produced, and measurements are performed using a vector network analyzer.

Simulations and measurements are conducted in both free space and a water-filled environment. The numerical and measured values of the transmission coefficient (S_{21}) in water are obtained as -17.29 dB and -32.1 dB, respectively. The agreement and consistency between the measured results and the full-wave simulation results confirm the effectiveness of the completely original design in this study.

Mikrodalga Kombi Sisteminde Bant Durduran Filtre Olarak Kullanılan Frekans Seçici Yüzey

Makale Bilgileri
Geliş : 05.09.2025
Kabul : 16.12.2025
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1778659

Sorumlu Yazar
Emin ÜNAL
emin.unal@erbakan.edu.tr

Anahtar Kelimeler
F*requency selective surface*
B*and stop filter*
R*F and microwaves*
S *parameters*

Atıf şekli: *ÜNAL, E., ÖZYURT, F., (2026). Mikrodalga Kombi Sisteminde Bant Durduran Filtre Olarak Kullanılan Frekans Seçici Yüzey. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(1), 55-64.*

ÖZ

Günümüzde, ısıtma sistemlerinde, genellikle verimi oldukça düşük olan fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Bu sistemler yüksek enerji maliyetinin yanında, dışarıya karbondioksit salımı da yapmaktadır. Bu çalışmada, ısıtma sistemlerinde fosil yakıtlar yerine mikrodalga enerjisinin kullanımına imkan veren bir bant durduran filtre tasarımı önerilmektedir. Magnetronda üretilen mikrodalganın su tankı dışına sızıntısının engellenmesi için 2,45 GHz'de çalışan, bant durduran filtre özellikli frekans seçici yüzey (FSS) tasarlanmıştır. Tasarım FIT tabanlı bir simülasyon programı ile gerçekleştirilmiş, numuneler üretilmiş ve ölçümleri vektör ağ analizörü kullanılarak yapılmıştır.

Simülasyon ve ölçümler hem boşlukta, hem de su dolu ortamda gerçekleştirilmiştir. Su içerisindeki iletim katsayısının (S_{21}) sayısal ve ölçülen değerleri sırasıyla -17,29 dB ve -32,1 dB olarak elde edilmiştir. Ölçülen sonuçlar ile tam dalga simülasyon sonuçları arasında elde edilen uyum ve tutarlılık bu çalışmada, tamamen özgün olan tasarımın etkinliğini doğrulamaktadır.

1. INTRODUCTION

Energy demand is rapidly increasing in parallel with population growth, scientific and technological advancements. This increased demand for energy not only increases energy costs but also leads to environmental problems such as pollution. Recently, numerous studies have been conducted on energy efficiency [1,2] and energy from clean energy sources [3-7]. Reducing the proportion of fossil fuels, which contribute to numerous environmental problems, in energy consumption is as important as increasing energy efficiency.

The energy consumed for residential heating accounts for approximately 70% of total energy consumption in Türkiye and 57% in the European Union, with 25% of this figure reportedly used for hot water production [8]. This energy, which accounts for a significant portion of total energy consumption, requires research into alternative or renewable energy sources and, more importantly, focusing on more efficient systems. In our country, combi boiler systems, commonly used for heating and hot water in homes, generally use natural gas, a fossil fuel, and their efficiency is quite low. In these systems, natural gas is used by burning, and there are side effects such as the release of carbon monoxide gas and its spread into the environment as a result of combustion [9].

Conventional heating systems like natural gas combi boilers, natural gas water heaters, electric water heaters, water heaters, and similar systems use electricity or natural gas to heat water. In these systems, electrical energy is used directly, while natural gas is burned to heat the water. Using microwaves in heating systems can be more energy efficient than other methods. This is because, instead of heating the entire environment, microwave heating focuses energy directly on the substance to be heated, namely the water, and the process is completed in a shorter time.

The purpose of the proposed study is to design a FSS with a band-stop feature that is installed within the water inlet and outlet pipes of the boiler to prevent microwaves from leaking out of the water inlet and outlet pipes while the water is heated using the energy generated by the magnetron in the microwave oven and transferred to the central heating system. Advantages of this design over existing boiler systems include higher efficiency due to the transfer of all 2.45 GHz microwave energy to the water, thus reducing user bills, eliminating the need for wall-mounted installations within the building, and ease of manufacture.

The use of microwaves for water heating is a well-known application [10]. However, microwaves have not been previously used in combi boiler applications. Furthermore, no frequency-selective surface with a band-stop filter designed for this purpose is available in the literature. Therefore, the frequency-selective surface designed to directly heat the combi boiler with microwaves and prevent microwave leakage is a completely original study. The most important original value of this study is the use of FSSs for the first time in the literature in order to prevent microwave energy from leaking out with the water while the water heated by microwave energy is transferred to the system and also to obtain a highly efficient combi boiler.

FSSs with random geometries are generally composed of periodically arranged metallic patches or their complementary geometries [11]. The most important parameters of the FSS structure, such as bandwidth, transfer function, incidence angle dependence and polarization, which determine the overall frequency-dependent response, are controlled by the element type and geometry. substrate parameters, the presence or absence of upper layers and the spacing between elements [12-14]. Due to their frequency-selective capabilities, FSSs are widely used in communication systems to effectively control the reflection and transmission of electromagnetic waves in free space. Furthermore, when plane waves are incident on them at a certain angle, FSSs, being periodic structures, exhibit a band-pass or band-stop filter response through parameters such as bandwidth and attenuation [15]. When it is necessary to attenuate incoming electromagnetic waves within a specific frequency band, a band-stop filter response is necessary. This can also be accomplished with bandpass filters, but when interfering frequencies are particularly strong, special measures must be taken to suppress them. In such cases, it becomes necessary to use band-stop filters to excessively attenuate the unwanted frequency band [16,17]. There is another important point to note here. As is known, single-layer FSSs have low selectivity and narrow bandwidth [18]. Adding multiple layers, including a dielectric intermediate layer, is the most common way to improve the attenuation response and increase the bandwidth [19,20].

FSSs are structures that act as a type of filter; that is, they are two- or three-dimensional structures that reflect or transmit depending on the frequency of the incident electromagnetic wave and have attracted considerable interest in the scientific community in recent years [12-14]. FSSs have potential applications in many areas such as shielding, wireless communication and security of wireless networks. FSSs, consisting of periodically arranged metallic patches or aperture elements, can provide broad-band capacity in specific frequency ranges. When interacting with electromagnetic waves, FSSs exhibit low-pass, high-pass, band-pass or band-stop filters at microwave frequencies and can be used to filter the desired frequencies [21-25]. Due to their wide-band properties, FSSs have recently found potential applications as spatial filters [26-28] and polarization converters [29,30]. In addition, electromagnetic shielding applications are among the most well-known and widely used applications of FSSs [31-33].

Many studies have been conducted on FSSs with band-stop filters. One of these studies has been designed to have band-stop properties in the L and S bands at microwave frequencies [34]. In another study, a band-stopping FSS structure obtained using a glass substrate has been investigated [35]. Murugan et al. have investigated the FSS structure with band-stop feature to prevent the 2.45 GHz 1000 W signals that enable the operation of microwave ovens from leaking out of the oven glass. In this study, the design and simulation results of two different FSS arrays consisting of circular ring-shaped patches are discussed [36].

In this study, an FSS design with band stop feature is proposed to prevent microwave energy from leaking out of the microwave combi boiler together with water during the transfer of water heated by 2.45 GHz microwave energy to the heating system. The following part of the article is organized as follows. The proposed FSS structure is designed and simulated using a FIT-based simulation program in Section II. Furthermore, a parametric evaluation of the band-stopping capability at 2.45 GHz is performed and the dimensions are optimized. In Section III, an FSS structure with band-stop filter properties has been fabricated using optimized dimensions, and experimental measurements have been performed. Furthermore, the integration of the fabricated FSS into the microwave combi system has been realized. Finally, in Section IV, results and discussion, the paper concludes with a comparison of simulation and measurement results.

2. DESIGN AND SIMULATION OF FSS STRUCTURE

Depending on the frequency of the incident electromagnetic wave, an FSS provides reflection or transmission, and also acts as an electromagnetic filter. An FSS can be thought of as a two-port circuit that transmits or reflects the wave depending on the frequency. In other words, it passes waves in the conduction band and reflects waves in the stop band. FSSs consist of periodically arranged patches and cavities; the patches cause a capacitive effect, while the cavities cause an inductive effect [37].

The filtering properties of the FSS structure depend on the electrical properties of the conductor used in the design, the dielectric constant of the material, and the structure, type, and shape of the unit cell. In this context, the designed FSS structure is intended to act as a filter that allows water flow out of the tank but blocks the operating band of the microwave oven. It has been observed that the FSS structure, designed to exhibit band-stop filter properties, can be used in applications where water passes but the operating band of the microwave oven is stopped, unlike known areas of use such as aviation, defense, radar, food, security, telecom and medicine.

2.1. Band-Stop FSS Filter Design

To understand the response of an FSS to incident electromagnetic waves, S-parameters are measured. These measurements typically include reflection (S_{11}) and transmission (S_{21}) coefficients. When determining bandwidth, -10 dB is considered the threshold value; that is, the region where the S-parameters fall below -10 dB is called the FSS bandwidth.

A perspective view of the designed band-stop FSS structure is shown in Figure 1.a. FR4 is used as a dielectric material in the design of the FSS structure because it is easily accessible and low-cost. The FR4 material, coated with 35 µm-thick copper, has a relative dielectric constant of $\varepsilon_r = 4.3$ and a thickness of 1.6 mm.

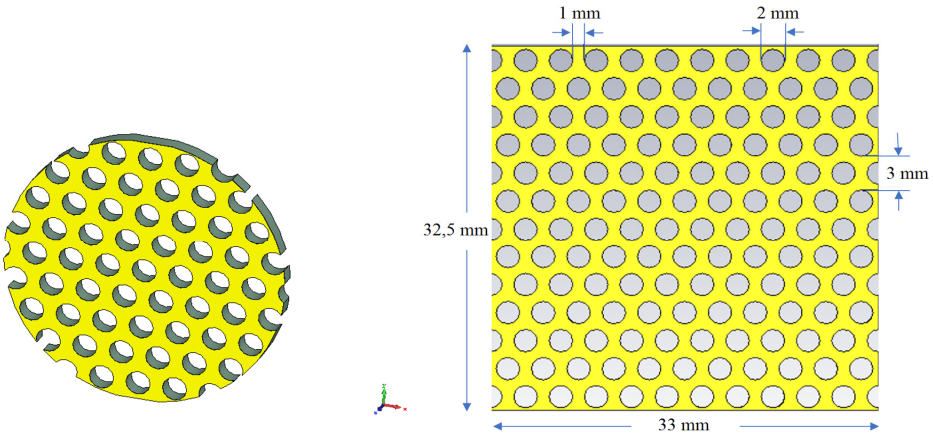


Figure 1. a) FSS perspective view, b) Dimensions of the designed FSS structure

The dimensions of the designed FSS structure are given in Figure 1.b. The periodic slots used in the FSS structure have a diameter of 2 mm, and there is a 1 mm horizontal gap between the slots. Simulation studies have been conducted using a FIT-based simulation program. Simulation studies of the designed structure have been examined in terms of transmission and reflection coefficients in the frequency band covering the desired frequency range (2.45 GHz). The cavity dimensions have also been optimized using genetic algorithm methods in the FIT-based simulation program.

2.2. Simulation Results

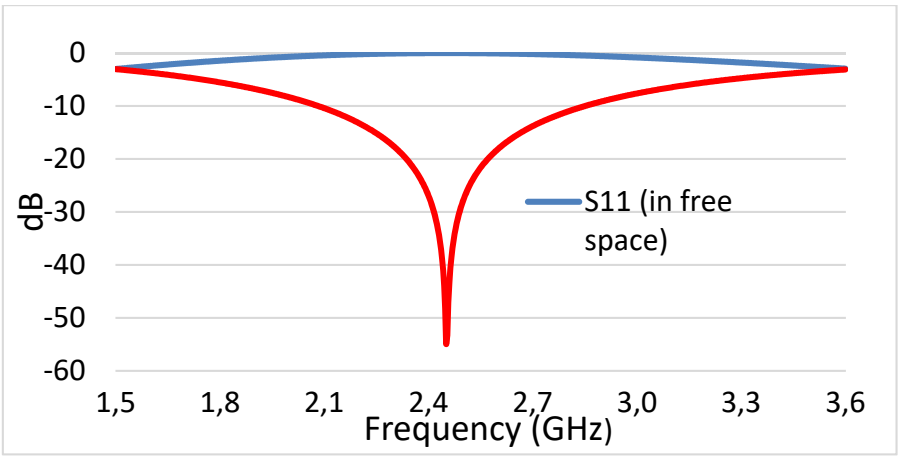


Figure 2. Simulation results when the FSS structure is placed in free space

S_{11} and S_{21} coefficients of the designed FSS structure are shown in Figure 2. It is observed that S_{11} value generally remains below -3dB between 1.5 and 3.5 GHz, which covers the operating band of the microwave oven. Around 2.5 GHz, S_{11} value approaches 0 dB, meaning that almost all of the 2.45 GHz EM wave incident on the FSS is reflected. When S_{21} is examined, it is seen that the designed structure exhibits band-stop filter properties at the 2.5 GHz center frequency. The transmission coefficient value of 54.94 dB obtained at 2.5 GHz means that the entire incoming wave is reflected. Considering the frequency range where S_{21} bandwidth falls below -10 dB, it is understood that the designed FSS structure acts as a band-stop filter in a very wide frequency band of 765 MHz in the range of 2.085-2.85 GHz around 2.45 GHz.
The designed FSS primarily operates in a water-filled environment. Therefore, the FSS structure has been placed inside a water-filled waveguide and the second simulation has been performed accordingly. The results are shown in Figure 3. This simulation has been performed in the 1.5-3.5 GHz range. It is understood that S_{11} value remains below -1 dB in the 1.5-3.5 GHz range and approaches zero around 2.5 GHz, meaning that almost all of the 2.45 GHz EM wave arriving at the FSS is completely reflected. When S_{21} is examined, a relatively high result of -17,29 dB is obtained at 2.45 GHz. Considering the frequency band where the

transmission coefficient falls below the threshold value of -10 dB, it is understood that the designed FSS structure acts as a band-stop filter in a wide bandwidth around 2.45 GHz.

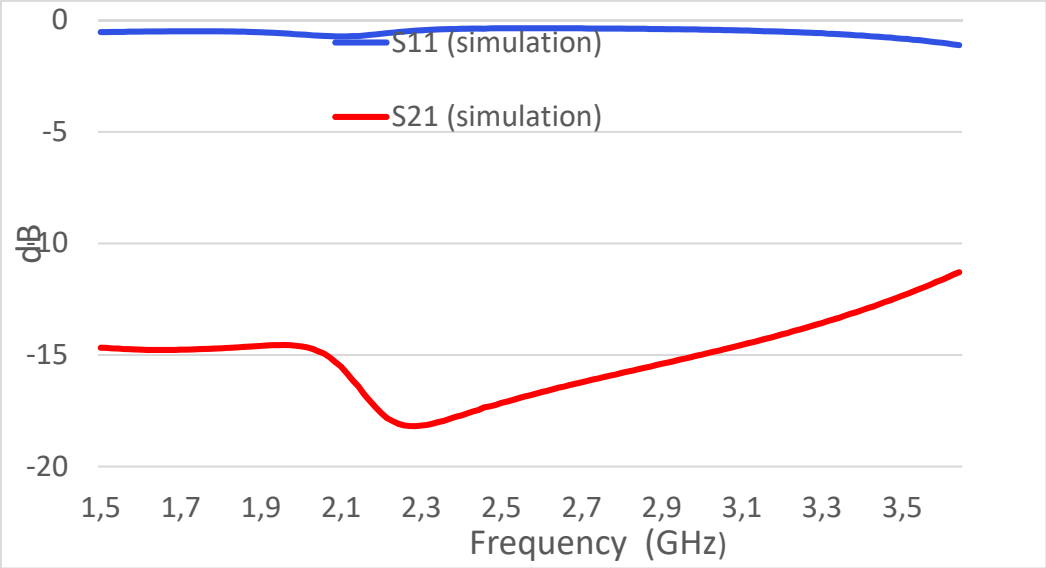


Figure 3. Simulation results when the FSS structure is placed in a water-filled medium

Consequently, two different simulations have been performed to test the designed FSS structure in both a vacuum and a water-filled environment. Both simulations yield highly consistent results for S_{11}. It is understood that especially around 2.5 GHz S_{11} value is below -1 dB, meaning that a very large part of the incident wave is reflected back by the FSS. According to the simulation results in free space, it is observed that the transmission coefficient value has dropped below -54,94 dB at 2.45 GHz frequency, and this value is obtained as -17,29 dB in a water-filled environment. The reason why S_{21} value is lower in water compared to free space is due to losses in the water medium [33]. Thus, considering the threshold value where the transmission coefficient falls below -10 dB, it is understood that the designed FSS structure stops the 2.45 GHz waves, that is, it prevents the waves in the microwave oven from passing to the heating system via water and reflects them back into the boiler.

3. FABRICATION, MEASUREMENT AND INTEGRATION OF FSS

3.1. Fabrication of FSS

The production of the FSS structure, whose design has been completed and dimensions have been optimized, is carried out using LPKF Laser & Electronics AG, Promat E33, i.e., computer numerical control (CNC) and printed circuit board (PCB) device, as seen in Figure 4. Copper-coated FR4 material is used in production. The thickness of the FR4 material, with a dielectric constant of $\varepsilon_r = 4{,}3$ and a loss tangent of $0{,}025$, is 1.6 mm, and the thickness of the copper layer, with a conductivity of $\sigma = 5.8 \times 10^7\ S/m$, is 0.035 mm.

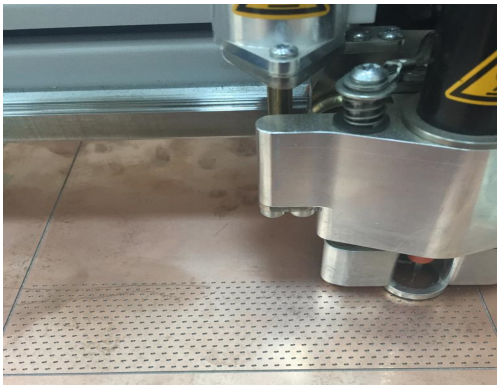


Figure 4. Fabrication of FSS structure using LPKF E-33

3.2. Measurements Made with the Produced FSS

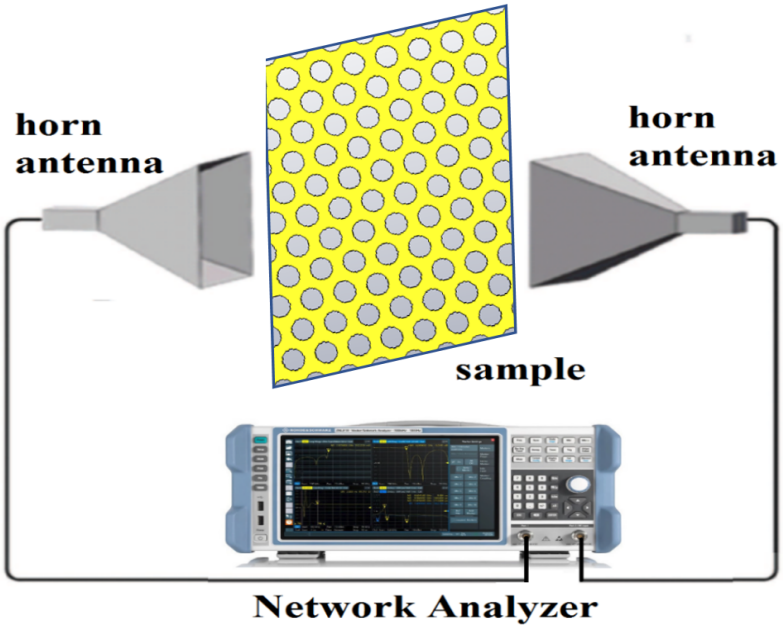


Figure 5. Measurement of S parameters with Microwave Network Analyzer

Experimental results of the manufactured FSS is obtained using the PNA-L Microwave Network Analyzer. Before starting the measurements, the PNA-L Microwave Network Analyzer is calibrated. Two standard gain WR-430 Horn antennas, one receiver and the other transmitter, operating from 1.7 GHz to 2.6 GHz, have been connected to the input and output ports of the calibrated device and measurements have been performed as shown in Figure 5. In the measurements, the distance between the horn antennas is adjusted to meet the far field condition.

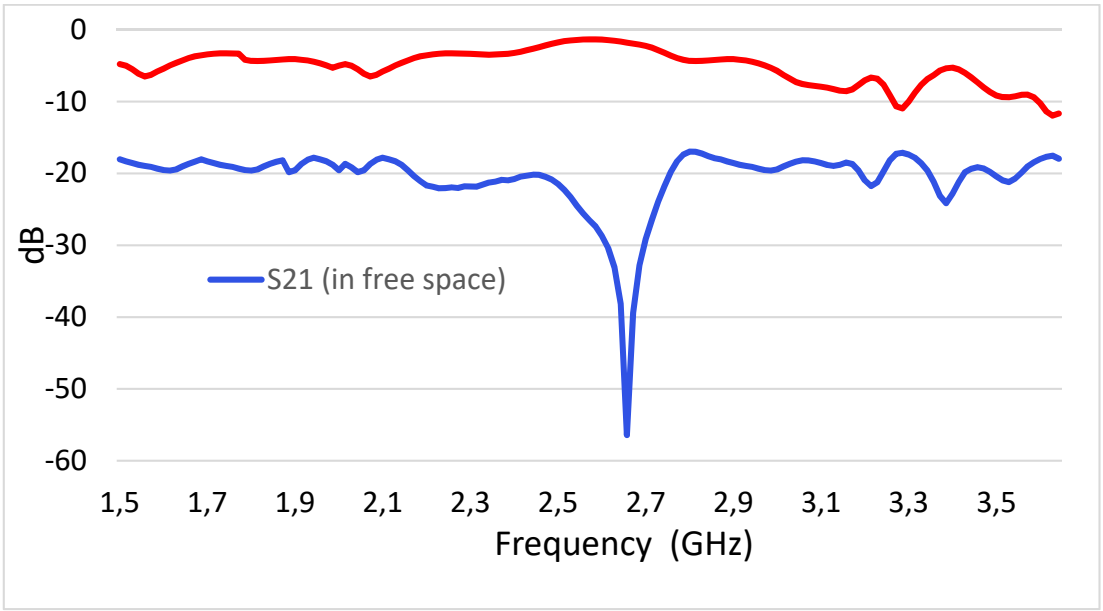


Figure 6. Measurement results when the FSS structure is placed in free space

The first measurement has been performed by placing the designed FSS in the free space between the horn antennas, S_{11} and S_{21} are measured. Figure 6 shows the graph of the measured reflection and transmission coefficients.

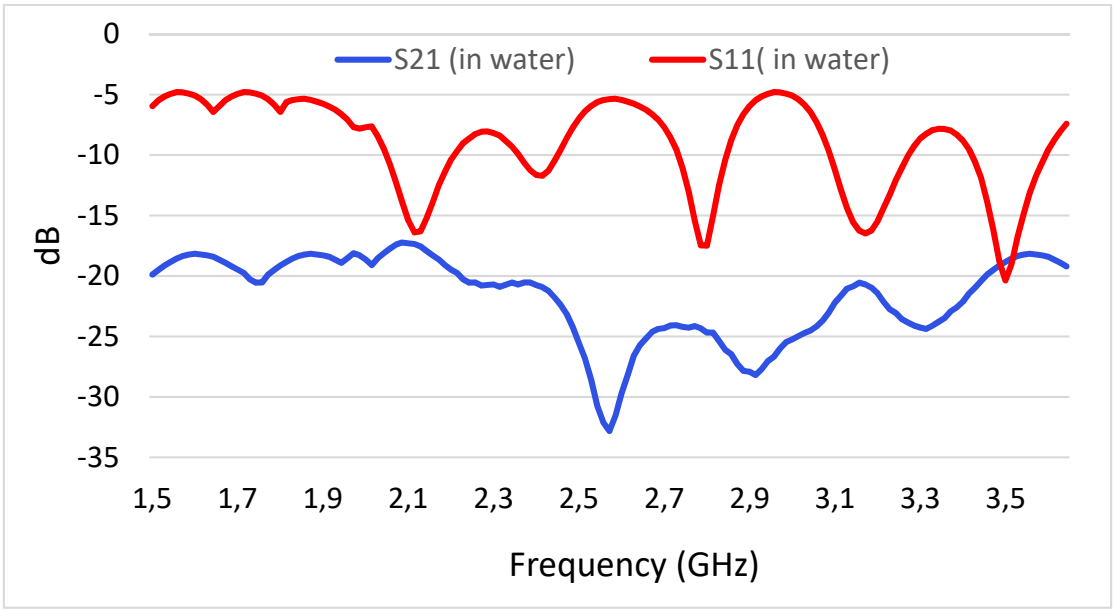


Figure 7. Measurement results when the FSS structure is placed in water

Considering the reflection coefficient given in Figure 6, it has a reflection bandwidth of approximately 350 MHz ($S_{11} > -3\ dB$) between 2.35 GHz and 2.7 GHz and a good band-stop filter property is observed over a fairly wide frequency range. The structure has a maximum insertion loss (IL) of -56.42 dB at 2.63 GHz and a maximum reflection loss (RL) of -1.33 dB at 2.53 GHz. Considering S_{21} response, the selectivity at the center frequency is quite good.

Then, the FSS structure in water is placed between the two antennas to provide the far field condition, S_{11} and S_{21} values are measured again. Considering the reflection coefficient in Figure 7, it is seen that $S_{11} \approx -5$ dB in the 2.45 GHz band. The structure has a maximum IL of -32.1 dB and a maximum RL of -5.4 dB at 2.53 GHz. Considering S_{21} response, the selectivity at the center frequency is quite good.

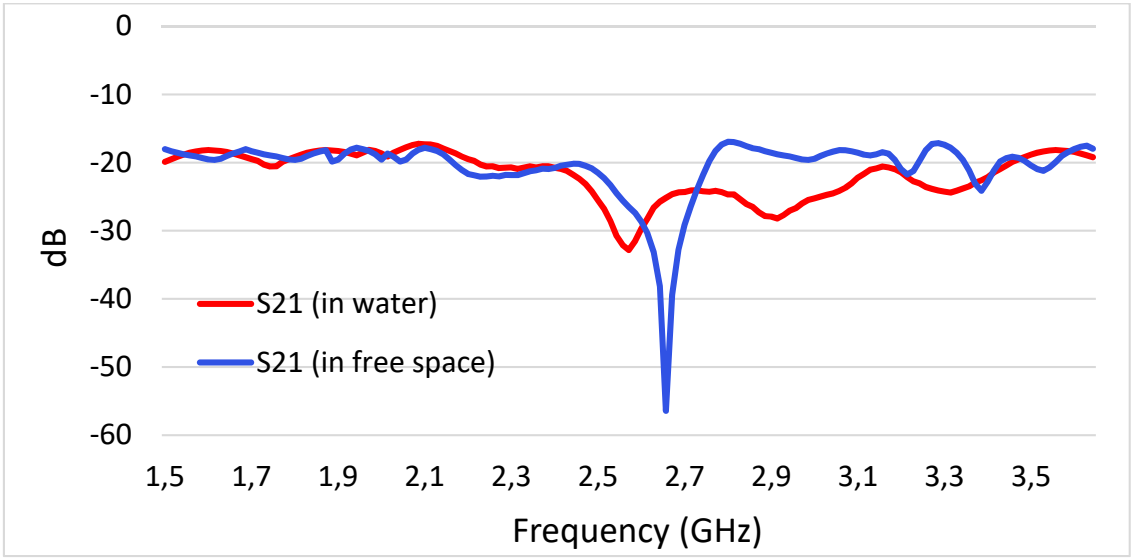


Figure 8. Comparison of S_{21} values measured in free space and in water

The S_{21} values measured in free space and in water are compared and the result is given in Figure 8. A downward shift has been observed in the resonance frequency of S_{21} measured in water, as expected, but it is not at the desired level due to manufacturing and measurement errors. There is an important detail to be noted here; S_{11} and S_{21} of the designed structure do not satisfy the equation $|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2 \approx 1$, which shows that the medium, namely water, is lossy [33].

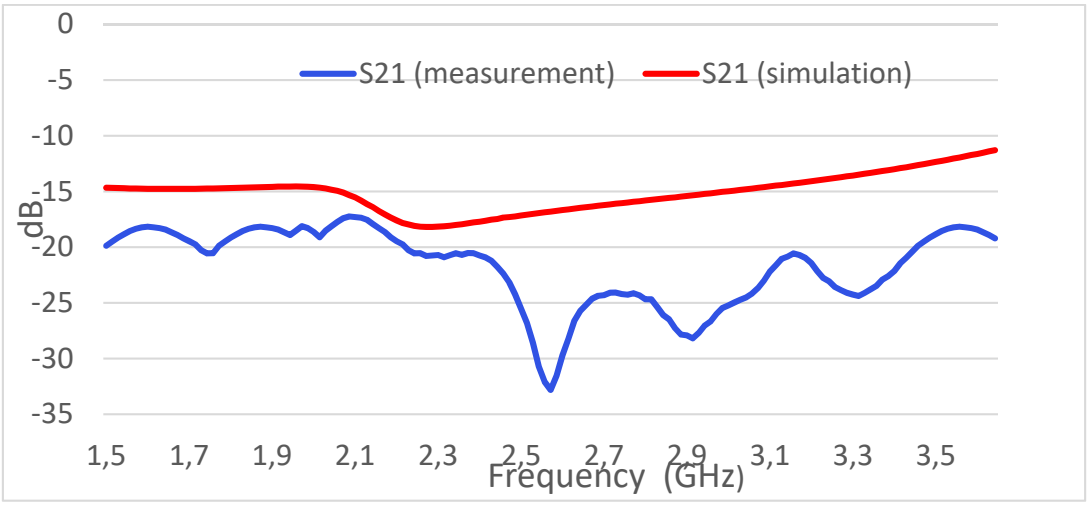


Figure 9. Comparison of measured and simulated S_{21} values in water

The measured and simulated S_{21} values in water are compared, and the results are shown in Figure 9. Both the measured and simulated S_{21} values are observed to be below -10 dB in the 1.5-3.5 GHz range. The measured and simulated results are in good agreement. There is a frequency shift due to manufacturing and measurement errors, and the center frequency is not exactly at 2.45 GHz due to manufacturing and measurement errors. In the production process with LPKF, the line edges are not as smooth as in the simulation and micro edge roughness also occurs. In the simulation, the copper and dielectric surfaces are considered smooth and flat, but after production, the surface usually has a wavy appearance.

In addition, although the measurement results vary between -20 and -30 dB within the desired operating band, the fact that the simulation results are around -15 dB is considered to be due to the difference between the loss tangent of the water used in the simulation and the loss tangent of the water used in the measurement.

3.3. Integration of The Produced FSS Into the Microwave Combi System

The designed microwave combi system is shown in Figure 10. The water tank is designed as a cavity resonator structure filled with water as a dielectric and resonating at 2.45 GHz to transfer microwave energy to the water. Various water-filled structures are tested, and their dimensions are adjusted for maximum efficiency in experimental studies. In practice, the 15x15x30 cm structure has been chosen because it provides the most efficient results, allowing the water temperature in the tank to reach 85 degrees Celsius within two minutes. The pipe diameter is chosen as 4 cm to ensure that the metal pipe does not function as a cylindrical cavity resonator and that the circulation of heated water can be easily ensured within the system. To prevent water from coming into contact with the magnetron, the waveguide that carries energy from the magnetron to the water tank is filled with a suitable dielectric, as shown in the figure, thus preventing water from coming into contact with the magnetron.

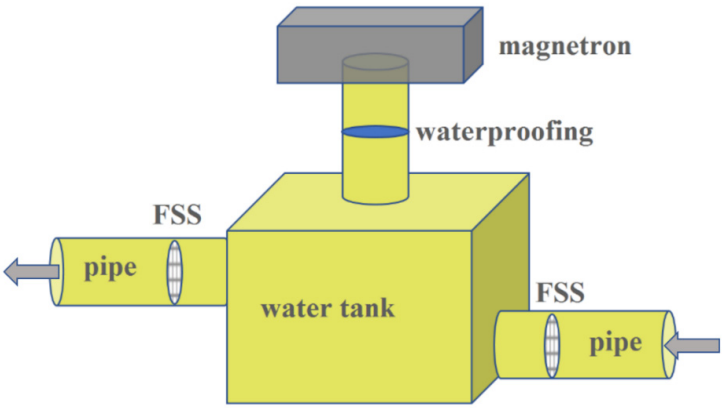


Figure 10. Block diagram of the combi system with FSS

4. RESULTS AND DISCUSSIONS

In this section, the simulation results of the designed FSS structure are compared with the experimental measurement results. Simulation and experimental studies have been conducted in two different environments: the FSS structure in free space and the water-filled environment. Considering that the designed FSS structure operates in water, S_{21} values obtained in the water-filled environment according to the simulation and measurement results have been found to be -17.29 dB and -32.1 dB, respectively. Thus, the measurement and simulation results are in good agreement. The agreement and consistency between the measured and full-wave simulation results confirm the effectiveness of the completely original design strategy implemented in this study.

The FSS structure designed in this study is a unique band-stop filter with a measured S_{21} value of -50 dB, which is consistent with the simulation results. As can be seen from the results, our proposed signal reflector reflects almost all of the 2.45 GHz microwave energy back to the water chamber in a wide bandwidth without obstructing the water flow in closed fluid-mechanical systems.

Consequently, to ensure the reliability and consistency of the results, not only simulations but also measurements are conducted in both free-space and a water-filled environment. Multiple simulations and measurements under two different conditions have confirmed the reproducibility of the data. To further confirm the accuracy and reliability of the results, the experimental findings are cross-validated with simulations [38].

5. REFERENCES

1. Akhan, H. (2023). Energy management practices for improving energy efficiency in industries: Furnace, steam boiler, HVAC, and cooling systems. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38*(1), 195-210.
2. Duman A.A. ve Sağbaş, A. (2020). Türkiye'nin enerji verimliliği ve iklim değişikliği performansı: Mevcut durum ve gelecek projeksiyonu. *Verimlilik Dergisi, 1*, 7-26.
3. Güldürek, M. (2025). Sustainable energy and Turkey: The role of geothermal energy and energy planning. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40*(1), 239-249.
4. Özbek, S. ve Naimoglu, M. (2021). Enerji verimliliğinin dinamikleri: Var analizi ile Türkiye üzerine ampirik bir çalışma. *19 Mayıs Sosyal Bilimler Dergisi, 2*(2), 314-326.
5. Akkoyunlu, M.T., Polat, E., Özkılıçaslan, R., Keleş, V., Abdellatif, Y. ve Samancı, A. (2024). Güneş enerji santralinin temizlik sonrası üretim verilerinin incelenmesi. *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering, 6*(3), 583-591.
6. Kıymaz, Y.E. & Oğuz, H. (2024). Assessment of electricity generation using deep learning on solar power plants. *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering, 6*(2), 289-311.
7. Hançer G.E. ve Özen, D.N. (2024). Jeotermal temelli bir organik rankine çevriminin eksergo-ekonomik analizi. *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering, 6*(2), 312-335.
8. Dilmaç, S. & Kesen, N. (2003). A comparison of new Turkish thermal insulation in building. *Energy and Buildings*, 35(2), 161-174.
9. Anwar, R.S., Mao, L. & Ning, H. (2018). Frequency selective surfaces: A review. *Applied Sciences, 8*(9), 1689.
10. Tanaka, M. & Sato, M. (2007). Microwave heating of water, ice and saline solution: Molecular dynamics study. *The Journal of Chemical Physics, 126*(3), 34509.
11. Sousa, M.E.T., Da Silva, B.S., Andrade, H.D. & Da Silva, M.W.B. (2023). A complementary frequency selective surface with tri-band frequency response for applications in Wi-Fi and 5G. *Journal of Communication and Information Systems, 38*(1), 189-197.
12. Munk, B.A. (2000). *Frequency selective surface: Theory and design.* Wiley.
13. Wu, T.K. (1995). *Frequency selective surfaces and grid array.* Wiley.
14. Mittra, R., Chan, C.H. & Cwik, T. (1988). Techniques for analyzing frequency selective surfaces-A review. *Proceedings of the IEEE, 76*(12), 1593-1615.
15. Rashid, A.K. & Shen, Z.A. (2010). Novel band-reject frequency selective surface with pseudo-elliptic response. *IEEE Trans. Antennas Propag., 58*, 1220-1226.
16. Ma, Y., Yuan, Y., Wang, D., Shi, Q. & Yuan, N. (2019). A way to design the miniaturized dual-stopbands FSS based on the topology structure. *IEEE Access, 7*, 156536-156543.

17. Ud Din, I., Alibakhshikenari, M., Virdee, B.S., Jayanthi, R.K.R., Ullah, S., Khan, S., See, C.H., Golunski, L. & Koziel, S. (2023). Frequency selective surface-based MIMO antenna array for 5G millimeter-wave applications. *Sensors, 23*(15), 7009.
18. Tamoor, T., Ahmed, F., Qasim A.S.M., Hassan, T. & Shoaib, N. (2020). An FSS based stop band filter for EM shielding application. *In Proceedings of the 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility,* Rome, 1-3.
19. Shengli, J., Bingzheng, X. & Ting, Z. (2020). Design of A 3-D band-stop FSS with high selectivity. *In Proceedings of the 2020 IEEE 3rd International Conference on Electronics Technology (ICET),* Chengdu, 6-10.
20. Montejo-Garai, J.R., Page, J.E., Perez-Palomino, G. & Guirado, R. (2024). Band-stop frequency-selective surface (FSS) with elliptic response designed by the extracted pole technique. *Sensors, 24*(14), 4452.
21. Zhu, J., Wang, Q. & Jin, M. (2024). High-order wideband band-pass miniaturized frequency-selective surface with enhanced equivalent inductance. *Electronics, 13*(5), 925.
22. Li, Z., Weng, X., Yi, X., Li, K., Duan, W. & Bi, M. (2024). A broadband second-order bandpass frequency selective surface for microwave and millimeter wave application. *Sci. Reports, 14*, 12040.
23. Pascarella, F., Brizi, D. & Monorchio, A. (2025). An ultra thin wide band angularly stable frequency selective surface bandpass filter for S-C band coverage. *Appl. Sci., 15*(9), 4887.
24. Dahima, V., Mishra, R. & Kapoor, A. (2025). Dual-band single-layered frequency selective surface filter for LTE band with angular stability. *Telecom, 6*, 18.
25. Altıntaş, O. (2021). A bandpass frequency selective surface filter for earth observation satellite and radar applications. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36*(4), 1033-1040.
26. Yong, W.Y. & Glazunov, A.A. (2023). Miniaturization of a fully metallic bandpass frequency selective surface for millimeter-wave band applications. *IEEE Transactıons on Electromagnetic Compability, 65*(4), 1072-1080.
27. Tariq, M.H. & Zahid, M.N. (2023). Design and performance analysis of band pass filter using frequency selective surface for 5G communication. *Proceedings of Engineering and Technology Innovation, 23*(16), 15-22.
28. Kapoor, A., Mishra, R. & Ku, P. (2022). Frequency selective surfaces as spatial filters: Fundamentals, analysis and applications. *Alexandria Engineering Journal, 61*, 4263-4293.
29. Lundgren, J., Zetterstrom, O., Mesa, F., Fonseca, N.J. & Teruel, O.Q. (2021). Fully metallic dual-band linear-to-circular polarizer for K/K a-band. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., 20*(11), 2191-2195.
30. Lin, B.Q., Huang, W.Z., Guo, J.X., Liu, Z., Wang, Y.W. & Ye, H.J. (2023). A band-pass frequency selective surface with polarization rotation. *Chin. Phys. B,* (2), 024204.
31. Ünal, E., Gökcen, A. & Kutlu, Y. (2006). Effective electromagnetic shielding. *IEEE Microwave Mag., 7*(4), 48-54.
32. De Sabata, A., Matekovits, L., Buta, A., Dassano, G. & Silaghi, A. (2022). Frequency selective surface for UWB filtering and shielding. *Sensors, 22*(5), 1896.
33. Ghosh, J., Dutta,R., Sarkhel, A. & Abbasi, O.H. (2022). Design of miniaturize flexible wideband frequency selective surface for electromagnetic shielding application. *Waves in Random and Complex Media*, 11249-11269.
34. Sivasamy, R. & Kanagasabai, M. (2017). Novel reconfigurable 3-D frequency selective surface. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology,* (99), 1-5.
35. Liu, X., Tan, W., Shen, Z. & Jin, C. (2020). Integrated frequency selective surface and antenna printed on a transparent substrate. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 19*(12), 2062-2066.
36. Murugan, J.T., Sureshkumar, T.R., Salil, P. & Venkatesh, C. (2015). Dual frequency selective transparent front doors for microwave oven with different opening areas. *Progress in Electromagnetics Research Letters, 52*, 11-16.
37. Varikuntla, K.K. & Singaravelu, R. (2019). Design of SIW cavity models to control the bandwidth of frequency selective surface. *IET Microwave Antennas Propag., 13*(14), 2515-2524.
38. Özyurt, F. (2024). Mikrodalga enerjisi ile çalışan ev tipi ısıtma cihazı. *Yüksek lisans tezi*. Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 1 MART/MARCH 2026

Transfer Matrisi Metodu ile Helmholtz Rezonatörlü Periyodik Akustik Metamalzeme Yapısının Sayısal Modellemesi

Sinem ÖZTÜRK [1,a]

[1]*İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0002-0483-9730*

Makale Bilgileri
Geliş : 11.07.2025
Kabul : 06.01.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1740474

Sorumlu Yazar
Sinem ÖZTÜRK
ozturksi@itu.edu.tr

Anahtar Kelimeler
Akustik metamalzemeler
Helmholtz rezonatörü
Ses yutum
Transfer matrisi yöntemi

***Atıf şekli:** ÖZTÜRK, S., (2026). Transfer Matrisi Metodu ile Helmholtz Rezonatörlü Periyodik Akustik Metamalzeme Yapısının Sayısal Modellemesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(1), 65-74.*

ÖZ

Bu çalışma, periyodik Helmholtz rezonatörlerinden oluşan bir akustik metamalzemenin ses yutma performansını sayısal olarak analiz etmektedir. Modelleme sürecinde transfer matrisi yöntemi (TMM) kullanılmış; visko-termal ve radyasyon kayıplarını içeren kapsamlı bir hesaplama çerçevesi geliştirilmiştir. MATLAB tabanlı model ile rezonatör hücre sayısı ve geometrik parametrelerin (özellikle boyun uzunluğu) yutum karakteristiğine etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, hücre sayısının artmasının daha belirgin band-gap bölgeleri oluşturduğunu ve yutumun daha geniş bir frekans aralığında optimize edilebildiğini göstermiştir. Ayrıca boyun uzunluğundaki değişimin rezonans frekanslarını doğrudan etkilediği ve hedef frekanslara uyarlamada kritik olduğu belirlenmiştir. Son aşamada kayıpları temsil eden ölçek faktörleri (Rrad ve Rvis) otomatik optimize edilerek ilk band-gap genişliği maksimize edilmiştir. Bulgular, önerilen modelin deneysel çalışmaya gerek duymadan tasarım aşamasında metamalzeme yapıların akustik performansını değerlendirmek için etkili ve esnek bir araç sunduğunu göstermektedir.

Numerical Modeling of Periodic Acoustic Metamaterial Structure with Helmholtz Resonator Using Transfer Matrix Method

Article Info
Received : 11.07.2025
Accepted : 06.01.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1740474

Corresponding Author
Sinem ÖZTÜRK
ozturksi@itu.edu.tr

Keywords
Acoustic metamaterials
Helmholtz resonator
Sound absorption
Transfer matrix method

***How to cite:** ÖZTÜRK, S., (2026). Numerical Modeling of Periodic Acoustic Metamaterial Structure with Helmholtz Resonator Using Transfer Matrix Method. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(1), 65-74.*

ABSTRACT

This study numerically analyzes the sound absorption performance of an acoustic metamaterial composed of periodic Helmholtz resonators. The transfer matrix method (TMM) was employed, and a computational framework incorporating viscothermal and radiative losses was developed. Using the MATLAB-based model, the effects of the number of resonator cells and geometric parameters (particularly neck length) on absorption characteristics were examined. The results show that increasing the number of cells yields more pronounced bandgap regions and enables absorption optimization over a wider frequency range. In addition, variations in neck length directly shift resonance frequencies, highlighting its critical role in tuning the system to target bands. Finally, the loss-related scale factors (Rrad and Rvis) were automatically optimized to maximize the first bandgap width. Overall, the proposed model provides an effective and flexible design-phase tool for evaluating the acoustic performance of metamaterial structures without the need for experimental studies.

1. GİRİŞ

Günümüzde gürültü kontrolü ve ses yalıtımı, yalnızca konfor amaçlı değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik ve endüstriyel güvenlik bakımından da kritik bir araştırma alanıdır. Geleneksel yalıtım malzemeleri, özellikle uzun dalga boylu (düşük frekanslı) bölgede kütle-yay prensibine dayanan sınırlı performansları nedeniyle yetersiz kalmakta ve bu eksiklik, akustik metamalzemeler (AMM) gibi yenilikçi çözümlere duyulan gereksinimi ortaya koymaktadır. AMM'ler, yerel rezonansa dayalı "meta-atom" tasarımları sayesinde ortamın efektif kütle yoğunluğu veya sıkıştırılabilirliğini negatif ya da sıfıra yakın değerlere indirerek yayılımı belirli frekans aralıklarında tamamen bastırabilmekte ve "bandgap" oluşumuna imkân tanımaktadır [1].

Son on yılda yayınlanan kapsamlı derlemeler, Helmholtz rezonatörleri, membran-tipi yapılar ve uzay-bükümlü kanalların düşük frekans yetkinliğini ayrıntılı biçimde ortaya koymuş; ayrıca sayısal tasarım, 3B-yazdırma ve programlanabilir metamalzemeler gibi teknolojik eğilimlerin ön plana çıktığını vurgulamıştır [2,3]. Özellikle periyodik dizilimli Helmholtz rezonatörleri, dalga boyunun küçük bir kesri mertebesindeki hücre boyutlarıyla bandgap'i alt frekanslara çekerek konvansiyonel malzemelere göre üstün yalıtım sağlamaktadır. Gözenekli tabaka içine yerleştirilen rezonatör dizileriyle 180–550 Hz bandında %80'in üzerinde yutuculuk elde edilmesi [4], ya da gözenekli çekirdeğe periyodik rezonatör gömülerek geliş açılarından bağımsız ses geçiş kaybı artışı sağlanması [5], bu yaklaşımın uygulama potansiyelini açıkça göstermektedir. Benzer biçimde, space-coiling hücrelerden oluşan kompakt ızgaralar [6] ve periyodik oyuklu gözenekli metasurfaces [7], düşük-orta frekanslarda önemli ses kesimi sağlayarak tasarım çeşitliliğini genişletmiştir.

Helmholtz rezonatörlü yapılar, geleneksel yutucuların ulaşmakta zorlandığı düşük frekanslı bölgelerde etkinlik göstermektedir. Özellikle birden fazla HR biriminin farklı frekanslara ayarlanarak dizi şeklinde kullanılması, 200–1100 Hz aralığında yüksek yutuculuk elde edilmesine olanak tanımaktadır [8]. 3B yazıcıyla üretilmiş çok mertebeli HR hücreleri sayesinde 400–2800 Hz gibi geniş bir bantta tam soğurma gerçekleştirilebilmekte, bu da mimari uygulamalarda önemli avantajlar sunmaktadır [9]. HR'lerin iç yapısı üzerinde yapılan değişikliklerle, negatif efektif kütle yoğunluğu ve sıkıştırılabilirlik gibi doğada bulunmayan özelliklerin kontrollü olarak elde edilmesi mümkün hale gelmiştir [10].

Periyodik rezonatör topolojisine eklenen eylemsizlik yükseltici (inertial amplification) mekanizmaları, yerel kütle etkinliğini artırarak bandgap'i daha da düşük frekanslara taşımaktadır; ancak bu tasarım "erken tesadüf" vadisi gibi yeni dinamik özellikleri beraberinde getirmekte ve yapısal-akustik etkileşimin önemini vurgulamaktadır [11]. Ayrıca, rezonatör duvarlarının esnekliği, özellikle kavite tabanı elastik olduğunda, iletim kaybında belirgin azalmaya neden olmakta ve tasarım sürecinde malzeme seçiminin önemini ortaya koymaktadır [12].

Böylesi karmaşık parametre alanlarının hızlı taranabilmesi için hesaplama verimliliği yüksek modellere ihtiyaç vardır. Bu bağlamda aktarım matrisi yöntemi (TMM), periyodik metamalzemelerin band yapısını ve ses geçiş kaybını sonlu elemanlar yöntemine kıyasla çok daha düşük maliyetle öngörebilmekte; çok katmanlı, gözenekli-rezonatörlü sistemlerin eşdeğer karakterizasyonuna olanak tanımaktadır [13,14]. TMM, deneysel çalışmalarla uyumlu sonuçlar verdiği gibi, özellikle düzlem dalga ve rijit duvar koşulları altında karakterizasyon yapılmasına da imkân tanımaktadır [15]. Ayrıca, farklı rezonatör konfigürasyonlarının (tekli, çoklu, paralel, seri vb.) TMM ile modellenmesi sayesinde tasarım esnekliği artırılmıştır [16]. Karmaşık rezonatör dizilerinde faz gecikmesinin doğru hesaplanması da transfer matrisi temelli yöntemlerle başarıyla gerçekleştirilebilmektedir [17].

Yeni nesil HR yapılarında, ayarlanabilir ve programlanabilir özellikler ön plana çıkmaktadır. Örneğin, origami tabanlı HR yapılarında, iç hacmin hava basıncıyla değiştirilerek rezonans frekanslarının dinamik olarak ayarlanması sağlanabilmekte, böylece 271–790 Hz arasında %90'ın üzerinde yutuculuk elde edilebilmektedir [18]. Benzer biçimde, havalandırmaya izin veren çok katmanlı HR yapıları, 450–700 Hz arasında geniş bantta etkili yutum sunarak, hem akustik hem de hava geçirgenliği açısından avantaj sağlamaktadır [19].

Bu çalışmada, Helmholtz rezonatörlerinden oluşan bir periyodik metamalzemenin TMM tabanlı sayısal modeli tamamen MATLAB® ortamında geliştirilmiştir. Model; (i) periyodik rezonatör–gözenekli ortam etkileşimini teorik olarak aydınlatmakta, (ii) geometri ve malzeme parametrelerinin bandgap, ses geçiş

kaybı ve soğurma katsayısı üzerindeki etkilerini sistematik biçimde incelemekte ve (iii) deneysel düzeneğe gereksinim duymaksızın tasarım ön optimizasyonu için hızlı bir araç sunmaktadır. Böylece, literatürde farklı platformlarda raporlanan düşük frekanslı yalıtım yaklaşımları tek bir çatı altında birleştirilmekte ve mühendislik uygulamaları için maliyet etkin bir yol haritası önerilmektedir.

2. TEORİ

Helmholtz rezonatörleri, dar bir boyun ve geniş bir kaviteye sahip akustik elemanlar olarak, belirli rezonans frekanslarında ses enerjisini etkili biçimde yutarlar. Bu yapı, klasik anlamda bir akustik kütle-yay (mass-spring) sistemine benzetilerek modellenebilir. Rezonatörün temel rezonans frekansı şu şekilde ifade edilir:

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi}\sqrt{\frac{S_n}{V_c L_{eff}}} \tag{1}$$

Burada c_0 havadaki ses hızı, S_n boyun kesit alanı, V_c kavite hacmi ve L_{eff} etkin boyun uzunluğudur. Etkin uzunluk, boyun giriş ve çıkışlarındaki uç düzeltmelerini içerir [20].

Bu rezonatörler periyodik olarak dizildiğinde, belirli frekans aralıklarında sesin yayılmasını engelleyen ve band-gap (durma bandı) olarak adlandırılan bölgeler oluşur. Bu yapıların analizi için en yaygın kullanılan yöntemlerden biri Transfer Matrisi Yöntemi (TMM)'dir. Bu yöntem, birim hücre içinde yer alan tüm bileşenlerin akustik giriş ve çıkış değişkenleri arasındaki ilişkiyi bir matris çarpımı şeklinde ifade eder.

Genel bir transfer matrisi şu formdadır:

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ u_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_2 \\ u_2 \end{bmatrix} \tag{2}$$

Burada p ses basıncı, u partikül hızı, T_{ij} ise sistemin transfer matris elemanlarıdır. Tüm yapı, birim hücre transfer matrislerinin ardışık çarpımı ile modellenir [21].

2.1. Helmholtz Rezonatörün Empedansı

TMM içerisinde, rezonatörler şönt empedans olarak modele dahil edilir. Kayıplar dahil edilerek rezonatörün kompleks empedansı aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$Z_{HR} = R_{rad} + R_{vis} + i\omega M + \frac{1}{i\omega C} \tag{3}$$

Burada, R_{rad} radyasyon kaynaklı kayıplar ve R_{vis} visko-termal kayıpları temsil eder. M ve C, sırasıyla, akustik kütle ve akustik uyumdur ve şöyle hesaplanırlar [22]:

$$M = \frac{\rho_0 L_{neck}}{S_{neck}} \tag{4}$$

$$C = \frac{V_{cav}}{\rho_0 c_0^2} \tag{5}$$

Bu empedans, transfer matrisine şönt eleman olarak şu şekilde entegre edilir:

$$T_{shunt} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_{HR} & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

2.2. Band-Gap Kriteri

Periyodik yapının band-gap karakteri, Bloch teorisine dayalı olarak, birim hücre transfer matrisinin iz (trace) değeri üzerinden analiz edilir. Kayıplı sistemlerde yayılımın engellendiği durma bandı aşağıdaki koşulla belirlenir:

$$\left|\Re\left[\frac{tr(T)}{2}\right]\right| > 1 \tag{7}$$

Bu koşul sağlandığında, sistemde gerçek bir faz hızı tanımlanamaz ve akustik dalga sönümlenir [23].

Bu kuramsal yapı, daha sonra sunulan sayısal analizlerin dayandığı temel fiziksel modeldir. Rezonatör geometrisinin, kayıpların ve hücre sayısının sistem davranışına etkisi bu eşitlikler doğrultusunda çözümlenecektir.

3. YÖNTEM

Bu çalışmada, Helmholtz rezonatörlerinden oluşan periyodik bir akustik metamalzeme yapısı Transfer Matrisi Yöntemi (TMM) ile sayısal olarak modellenmiştir. Kuramsal temeli bir önceki bölümde sunulan sistem, her bir hücrede bir Helmholtz rezonatör şöntü ve bu şöntü çevreleyen iki yarım kanal elemanından oluşmaktadır. Model, doğrusal, izotermal ve tek boyutlu düzlem dalga varsayımlarına dayanmaktadır.

TMM uygulamasında, her hücre için kanal ve şönt bileşenlerine ait transfer matrisleri ardışık olarak çarpılmış ve elde edilen birim hücre matrisi $\mathbf{T}_{\text{cell}}$, N adet hücrenin üst üste eklenmesiyle tüm sistemin matrisine dönüştürülmüştür:

$$\mathbf{T}_{\text{total}} = (\mathbf{T}_{\text{cell}})^N \tag{8}$$

Her hücredeki şönt empedans Z_{HR}, Eşitlik (3) ile tanımlandığı gibi visko-termal ve radyasyon kayıplarını da içerecek biçimde modellenmiştir. Bu empedans, şönt transfer matrisi (Eşitlik 4) ile sisteme eklenmiştir. Kanal elemanları ise klasik dalga yayılım transfer matrisi ile temsil edilmiştir:

$$T_{duct} = \begin{bmatrix} \cos(kL) & jZ_0\sin(kL) \\ jsin(kL)/Z_0 & \cos(kL) \end{bmatrix} \tag{9}$$

Burada L kanal uzunluğu, $k=\omega/c_0$ dalga sayısı ve $Z_0=\rho_0 c_0/S$ karakteristik empedanstır.

Yansıtılan dalga genliği R üzerinden hesaplanan yansıma katsayısı şu şekildedir:

$$R = \frac{Z_{in}-Z_0}{Z_{in}+Z_0} \tag{10}$$

ve buna karşılık gelen yutum katsayısı:

$$\alpha = 1 - |R|^2 \tag{11}$$

olarak ifade edilmiştir. Giriş empedansı Z_{in}, sistemin toplam transfer matrisinden elde edilmektedir.

3.1. MATLAB Kod Yapısı ve Görsel Çıktılar

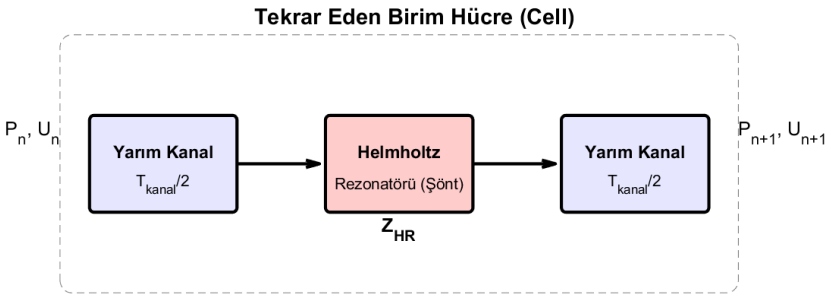
Tüm sayısal modelleme MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir. Kod yapısı, Transfer Matrisi Yöntemi'ne (TMM) dayalı olarak periyodik Helmholtz rezonatörlü bir akustik metamalzemenin frekans bandındaki yutum performansını hesaplamaya yönelik tasarlanmıştır. Hesaplamalarda hava özellikleri (ρ_0, c_0, η), kanal ve rezonatör geometrileri doğrudan modele girilmiş, her frekans adımı için sistemin toplam transfer matrisi elde edilmiştir.

Rezonatör başına birim hücre, iki yarım ana kanal ve bir şönt empedanstan oluşmakta; bu yapı, transfer matrisleri aracılığıyla N adet hücre için ardışık olarak modellenmektedir. Sistem çıkışında, toplam matris üzerinden giriş empedansı hesaplanmakta, yansıma katsayısı ve buna bağlı olarak yutum katsayısı (α) elde edilmektedir.

Modelin genellenebilirliğini test etmek amacıyla, hücre sayısı (N) parametrik olarak değiştirilebilmekte ve her N değeri için ayrı bir frekans süpürmesi yapılmaktadır. Kod yapısı, farklı hücre sayılarına karşılık gelen yutum karakteristiklerini topluca görselleştirecek şekilde düzenlenmiştir. Bu görseller, yöntemsel karşılaştırma ve parametrik çalışma planlaması için temel sağlamaktadır.

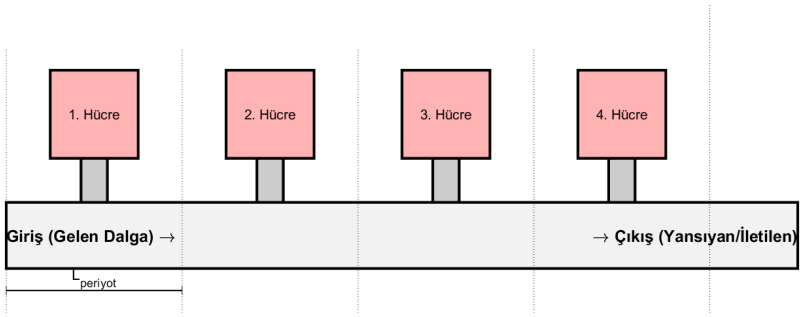
Modelin blok yapısı, sistemin fiziksel anlamda nasıl inşa edildiğini Şekil 1'de açıkça göstermektedir. TMM yaklaşımıyla her hücre, yarım kanal, Helmholtz rezonatör empedansı ve tekrar eden yapı blokları olarak

modellenmiştir. Bu diyagram, sistemin transfer matrisi bileşenlerine nasıl ayrıldığını ve modelleme akışının fiziksel karşılığını açıklamaktadır. Her hücre yarım kanal – rezonatör – yarım kanal şeklinde modellenmiş, bu yapı N kez tekrar edilerek periyodik yapı oluşturulmuştur.



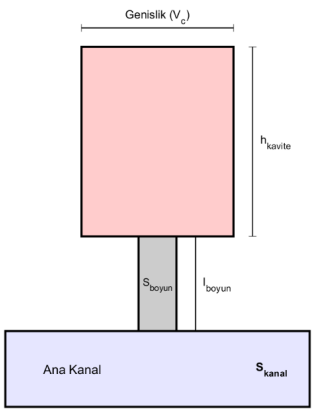
Şekil 1. Transfer Matrisi Yöntemi kullanılarak oluşturulan sistemin blok diyagramı

Sayısal analizlerin temelini oluşturan sistem modeli, ana kanal boyunca yerleştirilen Helmholtz rezonatörlerinin periyodik dizilimine dayanmaktadır. Her bir hücre, dar bir boyunla bağlanan bir boşluk içermektedir ve ana hava kanalı ile akustik etkileşim bu şönt bağlantı üzerinden gerçekleşmektedir. Bu yapı, transfer matrisi yaklaşımıyla modellenmek üzere belirli aralıklarla tekrarlanmıştır. Sistemin fiziksel yapısını açıklayıcı bir şematik gösterim Şekil 2'de sunulmuştur. Sayısal analizlerin temelini oluşturan sistem modeli, TMM çerçevesinde tanımlanmış blok yapıya sahiptir. Her bir hücre, bir Helmholtz rezonatör şöntü ve iki yarım kanal segmentinden oluşmakta olup, sistemin toplam transfer matrisi bu yapının periyodik tekrarlarıyla elde edilir (Şekil 2). Giriş ve çıkış arasında yer alan kanal segmentleri ve rezonatör bağlantısı bir hücreyi oluşturur. Bu hücre yapısı N kez tekrarlanarak toplam sistem elde edilir.



Şekil 2. Transfer matrisi yöntemi ile modellenen periyodik Helmholtz rezonatörlü sistemin şematik gösterimi

Helmholtz rezonatörünün geometrisi, akustik kütle ve esneklik hesaplamalarında doğrudan etkili olan boyun uzunluğu l_n, boyun çapı a_n, boşluk yüksekliği h_c ve boşluk çapı a_c gibi parametrelerle karakterize edilir (Şekil 3). Ana kanal ile bağlantı boyun bölgesi (l_n, a_n) aracılığıyla sağlanırken, rezonatörün iç boşluğu (h_c, a_c) ses dalgası ile etkileşimde görev alır. Bu parametreler rezonans frekansı ve empedans üzerinde belirleyici etkiye sahiptir.



Şekil 3. Helmholtz rezonatörünün şematik gösterimi

3.2. Hava ve Rezonatör Parametreleri

Bu çalışmada kullanılan model, sabit sıcaklık ve basınç altında (20 °C, 1 atm) tanımlanmış standart hava özellikleri üzerinden hesaplanmıştır. Havanın yoğunluğu $\rho_0 = 1.21$ kg/m³, ses hızı $c_0 = 343$ m/s ve dinamik viskozitesi η=1.84×10−5 kg/ms olarak alınmıştır. Helmholtz rezonatörlerinden oluşan sistemin temel geometrik parametreleri, literatürde önerilen tipik boyut aralıklarına uygun olarak seçilmiştir. Bu parametreler arasında rezonatör boşluk hacmi (V_{cav}), boyun uzunluğu (l_n), boyun kesit alanı (S_n) ve kanalın periyot uzunluğu (L_{cell}) yer almaktadır. Rezonatör boyutları ve kanal kesit alanı, akustik empedans ve rezonans frekansları üzerinde belirleyici etkiye sahiptir.

Modelleme ortamı olarak standart atmosfer koşulları dikkate alınmış; hava yoğunluğu $\rho_0 = 1.21$ kg/m³, ses hızı $c_0 = 343$ m/s ve akustik empedansı $Z_0 = \rho_0 \cdot c_0$ olarak alınmıştır. Helmholtz rezonatörü, bir boyun ve bir kavite bölgesinden oluşan klasik geometriyle modellenmiştir. Bu çalışmada kullanılan geometrik parametreler; boyun uzunluğu $L_n = 0.008$ m, boyun kesit alanı $S_n = 0.00025$ m² ve rezonatör boşluk hacmi $V_c = 0.0001$ m³ olarak belirlenmiştir. Rezonatörler arasında kalan boşluk, sistemde hava katmanı olarak modellenmiş ve hücre periyodu $L_{cell} = 0.03$ m olarak tanımlanmıştır.

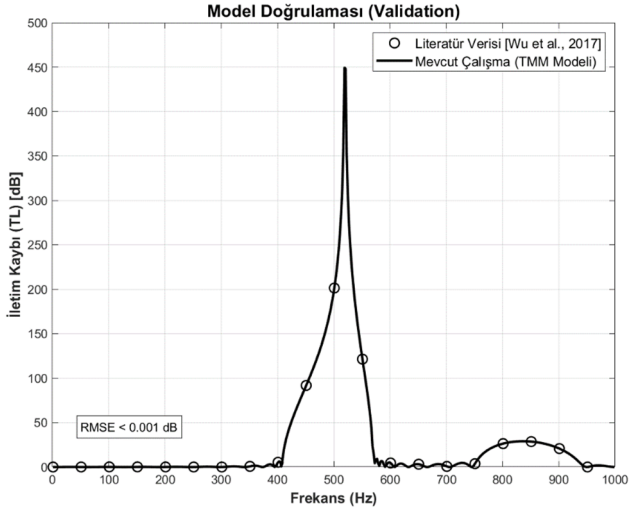
Modelde kullanılan tüm fiziksel sabitler ve geometrik parametreler, Transfer Matrisi Yöntemi'nin uygulanmasında temel giriş verileri olarak kullanılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan bu büyüklükler, deneysel olarak doğrulanabilir büyüklükler doğrultusunda seçilmiş ve literatürdeki benzer çalışmalara paralel biçimde düzenlenmiştir. Çizelge 1'de, çalışmada kullanılan temel fiziksel ve geometrik parametreler sistematik biçimde özetlenmiştir. Bu değerler literatürde yer alan benzer rezonatör yapılarından uyarlanmıştır [20,23].

Çizelge 1. Kullanılan geometrik parametreler

Parametreler	**Tanım**	**Değer**
S_{main}	Ana kanal kesit alanı	0.0004 m²
L_{cell}	Hücre periyodu uzunluğu	0.03 m
S_n	Boyun kesit alanı	0.00025 m²
l_n	Boyun uzunluğu	0.008 m
V_c	Rezonatör boşluk hacmi	0.0001 m³
N	Hücre sayısı	1 – 9 arası

3.3. Sayısal Modelin Doğrulanması

Önerilen Transfer Matrisi Yöntemi (TMM) modelinin hesaplama hassasiyetini ve fiziksel tutarlılığını doğrulamak amacıyla, literatürde Wu ve ark. [24] tarafından sunulan ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile valide edilmiş çalışma referans alınmıştır. Referans çalışmadaki periyodik Helmholtz rezonatör dizisi parametreleri ($S_n = 0.0004\pi$ m², $l_n = 0.025$ m, $V_c = 101.25\text{x}10^{-6}\pi$ m³, $S_d = 0.0036$ m²) mevcut modele uygulanmış ve sistemin İletim Kaybı (TL) değerleri hesaplanmıştır.



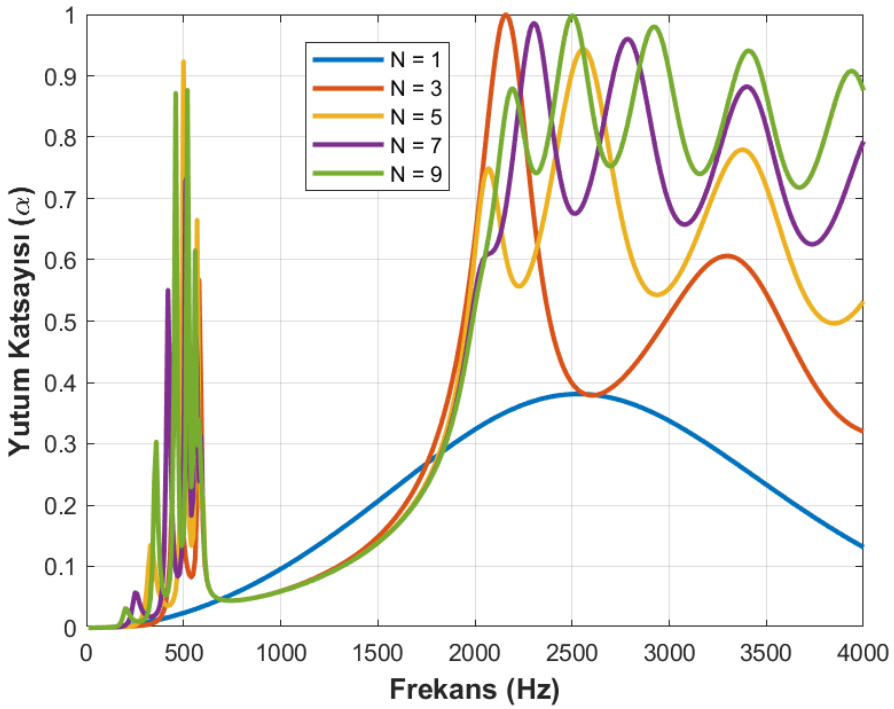
Şekil 4. Model doğrulaması

Şekil 4, mevcut model ile literatür verisi arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Grafikten açıkça görüldüğü üzere, geliştirilen modelin sonuçları literatür verileriyle rezonans frekansı (520 Hz) ve Bragg yansıma bantları genelinde tam bir örtüşme sergilemektedir. İki veri seti arasındaki uyumu sayısal olarak ifade etmek için yapılan hata analizinde, Kök Ortalama Kare Hata (RMSE) değerinin ihmal edilebilir düzeyde (< 0.001 dB) olduğu tespit edilmiştir. İletim kaybı hesaplamalarındaki bu yüksek doğruluk, modelin akustik empedans ve dalga yayılımı matrislerini doğru oluşturduğunu kanıtlamakta olup, çalışmanın devamında sunulan ses yutum katsayısı (α) analizleri için güvenilir bir temel oluşturmaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

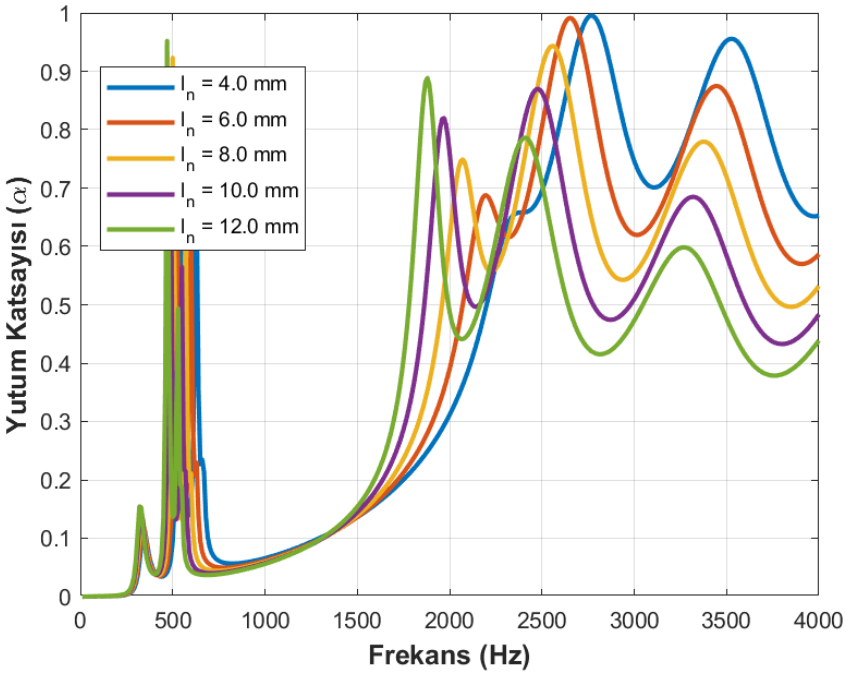
Bu çalışmada, Helmholtz rezonatörlerinden oluşan periyodik bir akustik metamalzeme yapısı Transfer Matrisi Yöntemi (TMM) kullanılarak sayısal olarak modellenmiş ve sistemin frekansa bağlı yutum karakteristiği ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. MATLAB ortamında geliştirilen modelde hem visko-termal hem de radyasyon kaynaklı kayıplar ölçeklenebilir parametrelerle temsil edilerek yapının gerçekçi bir akustik davranış sergilemesi sağlanmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında, rezonatör parametreleri sabit tutularak farklı sayıda hücre içeren (N=1, 3, 5, 7, 9) yapılar modellenmiş ve her bir yapı için yutum katsayısı α(f) hesaplanmıştır. Bu analiz sonucunda, hücre sayısındaki artışın yapının periyodiklik derecesini güçlendirerek band-gap oluşumunu desteklediği gözlemlenmiştir. Özellikle $N \geq 5$ için rezonansların daha keskin hale geldiği ve belirgin yutum tepe noktalarının ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Şekil 5'te gösterilen yutum eğrileri, hücre sayısının artmasının yutum seviyesini frekansın daha geniş bir aralığında artırdığını açıkça ortaya koymaktadır. Her eğrinin maksimum yutum noktası sarı işaretleyicilerle gösterilmiştir.



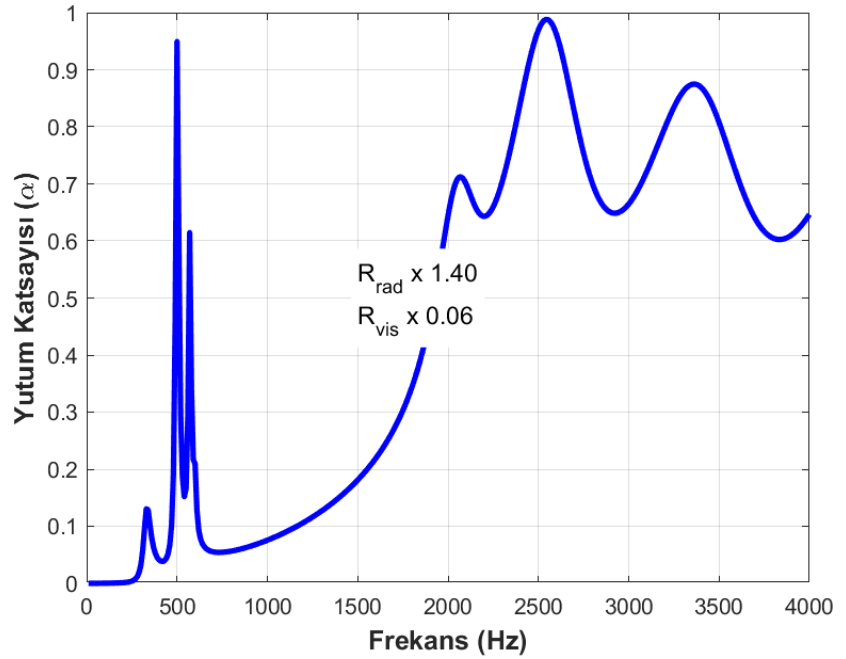
Şekil 5. Farklı hücre sayıları için (N=1,3,5,7,9) hesaplanan normal-incidence yutum eğrileri

Modelin ikinci aşamasında, rezonatör boyun uzunluğunun sistem üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sabit hacim ve boyun kesiti altında 0.004 m ile 0.012 m arasında değişen boyun uzunlukları için sistem tepkisi hesaplanmış ve rezonans frekanslarının bu parametreye duyarlılığı gösterilmiştir. Şekil 6'da yer alan eğriler, boyun uzunluğu arttıkça rezonans frekansının daha düşük değerlere kaydığını ve yutum tepe noktalarının yer değiştirdiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, Helmholtz rezonatörlerinin rezonans frekansının boyun geometrisine bağlı olarak hassas biçimde ayarlanabileceğini göstermekte ve sistemin belirli frekans bantlarında optimize edilmesine imkân tanımaktadır.



Şekil 6. Boyun uzunluğunun (l_n = 0.004–0.012 m) değişimi ile rezonans frekansının kayması. N=5 sabit tutulmuştur

Çalışmanın son aşamasında, sistemin kayıpsal karakteristiklerini tanımlayan radyasyon kaybı (R_{rad}) ve visko-termal kayıp (R_{vis}) ölçek faktörleri otomatik olarak optimize edilmiştir. Bu optimizasyonun amacı, ilk band-gap bölgesinin genişliğini maksimize ederek, yapının hedef frekans aralığında daha etkili bir ses yutumu sağlamasıdır. MATLAB ortamında gerçekleştirilen parametrik analizler ve manuel optimizasyon denemeleri sonucunda, sistemin sönümleme performansını artıran ölçek faktörleri radyasyon kaybı için 1.40 ve visko-termal kayıp için 0.06 olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerle hesaplanan ve Şekil 7'de sunulan yutum eğrisi, özellikle 2000 Hz üzerindeki frekanslarda geniş bantlı bir yutum karakteristiği sergilemektedir. Visko-termal kayıpların optimize edilmesi, rezonans tepelerinin bant genişliğini artırarak (Q faktörünü düşürerek) daha kararlı bir yutum performansı sağlamıştır.



Şekil 7. Radyasyon ve visko-termal kayıp faktörlerinin otomatik optimizasyonu sonucunda elde edilen geniş-bant yutum eğrisi

Sonuç olarak, yapılan sayısal modelleme çalışması, Helmholtz rezonatörlü metamalzeme yapılarının parametrik olarak incelenmesinin hem rezonans ayarı hem de band-gap mühendisliği açısından son derece verimli bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir. Hücre sayısı, boyun uzunluğu ve kayıpların ayrı ayrı ve birlikte kontrol edilmesi, belirli hedef frekans aralıklarında yüksek performanslı ses yutucu yapıların tasarımı açısından önemli olanaklar sağlamaktadır.

Yapılan tüm analizler, Helmholtz rezonatörlerinden oluşan periyodik yapıların uygun geometrik ve kayıpsal parametrelerle modellenmesi hâlinde, istenen frekans aralıklarında yüksek düzeyde ses yutumu sağlayabileceğini ortaya koymuştur. Geliştirilen sayısal model, parametrik analiz ve optimizasyon uygulamalarıyla birlikte değerlendirildiğinde, hem akustik metamalzeme tasarımı hem de ön-tasarım süreçleri için pratik ve güvenilir bir mühendislik aracı niteliğindedir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, periyodik Helmholtz rezonatörlerinden oluşan bir akustik metamalzemenin frekansa bağlı ses yutma karakteristiği Transfer Matrisi Yöntemi (TMM) ile sayısal olarak modellenmiş ve sistemin davranışı kapsamlı biçimde analiz edilmiştir. MATLAB ortamında geliştirilen model sayesinde, rezonatör geometrisi, hücre sayısı ve kayıpların etkisi ayrı ayrı ve birlikte incelenmiş; sistem performansı üzerinde belirleyici parametrelerin etkileri detaylandırılmıştır.

Modelin ilk aşamasında, farklı sayıda rezonatör hücresi içeren yapılar değerlendirilmiş ve hücre sayısının artmasının sistemde daha keskin rezonans tepeleri ve daha belirgin band-gap oluşumları sağladığı gözlemlenmiştir. Bu durum, periyodikliğin artırılmasının yapıdaki faz gecikmesini güçlendirerek Bloch dalgasının evanescent davranışını tetiklediğini ve böylece sesin belirli frekans aralıklarında etkin biçimde yutulabildiğini göstermektedir.

Rezonatör boyun uzunluğu üzerindeki parametrik süpürme, bu geometrik parametrenin rezonans frekansı üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymuştur. Boyun uzunluğu arttıkça rezonans frekansının daha düşük değerlere kaydığı tespit edilmiştir. Bu da, rezonatörlerin hedef frekans bantlarına göre tasarlanmasında boyutsal hassasiyetin önemini vurgulamaktadır.

Çalışmanın son bölümünde, radyasyon ve visko-termal kayıpları temsil eden direnç terimlerinin ölçek faktörleri optimizasyon algoritması kullanılarak ayarlanmış ve ilk durdurma bandının genişliği maksimize edilmiştir. Bu işlem sonucunda elde edilen yutum eğrisi, geniş frekans aralığında yüksek yutuculuk sunarak, kayıpların sistem tepkisindeki belirleyici rolünü doğrulamıştır.

Elde edilen bulgular, TMM'nin düşük maliyetli ve esnek bir ön-tasarım aracı olarak kullanılabileceğini, özellikle rezonatör tabanlı akustik metamalzeme tasarımında etkinliğini ortaya koymuştur. Gerçek sistemlerde, sonlu elemanlar analizleri veya deneysel doğrulamalarla modelin kalibrasyonu yapılması önerilmekle birlikte, bu çalışma mühendislik öncesi aşamada hızlı ve yönlendirici bir analiz zemini sunmaktadır.

Sonuç olarak, rezonatör geometrisi, periyodiklik ve kayıp faktörleri gibi parametrelerin birlikte ele alınması, hem rezonans frekanslarının hassas kontrolünü hem de geniş bantlı yutum tasarımını mümkün kılmaktadır. Bu yönüyle TMM tabanlı bu yaklaşım, mimari akustikten gürültü kontrolüne kadar geniş bir uygulama alanı için yol gösterici potansiyele sahiptir. Özellikle endüstriyel üretim ortamlarında raporlanan yüksek gürültü maruziyetleri ve patlatma gibi saha uygulamalarında gözlenen hava şoku etkileri, düşük frekanslı bölgede hedeflenmiş yutum sağlayan kompakt çözümlere olan ihtiyacı desteklemektedir [25,26].

6. KAYNAKLAR

1. Cummer, S.A., Christensen, J. & Alù, A. (2016). Controlling sound with acoustic metamaterials. *Nature Reviews Materials, 1*, 16001.
2. Gao, N., Zhang, Z., Deng, J., Guo, X., Cheng, B. & Hou, H. (2022). Acoustic metamaterials for noise reduction: A review. *Advanced Materials Technologies, 7*(6), 2100698.
3. Aydın, G. & San, S.E. (2024). Breaking the limits of acoustic science: A review of acoustic metamaterials. *Materials Science and Engineering B, 305*, 117384.

4. Zhu, X.-F., Lau, S.-K., Lu, Z. & Jeon, W. (2019). Broadband low-frequency sound absorption by periodic metamaterial resonators embedded in a porous layer. *Journal of Sound and Vibration, 461*, 114922.

5. Magliacano, D., Catapane, G., Petrone, G., Verdière, K. & Robin, O. (2024). Sound transmission properties of a porous meta-material with periodically embedded Helmholtz resonators. *Mechanics of Advanced Materials and Structures, 31*(25), 6748-6756.

6. Yu, X., Lu, Z., Liu, T., Cheng, L., Zhu, J. & Cui, F. (2019). Sound transmission through a periodic acoustic metamaterial grating. *Journal of Sound and Vibration, 449*, 140-156.

7. Fang, Y., Zhang, X. & Zhou, J. (2017). Sound transmission through an acoustic porous metasurface with periodic structures. *Applied Physics Letters, 110*(17), 171904.

8. Bi, S., Yang, F., Shen, X., Peng, W., Yang, X. & Yin, Q. (2025). Optimal design of acoustic metamaterials for noise suppression by the frequency division in military equipment. *AIP Advances, 15*, 015016.

9. Liu, C.-R., Wu, J.-H., Ma, F.-Y., Chen, X. & Yang, Z. (2019). A thin multi-order Helmholtz metamaterial with perfect broadband acoustic absorption. *Applied Physics Express, 12*(8), 084002.

10. Dandsena, J. (2023). Estimating effective acoustic properties of various configuration of perforated panels. *Noise Control Engineering Journal, 71*(3), 208-223.

11. Mi, Y. & Yu, X. (2021). Sound transmission of acoustic metamaterial beams with periodic inertial amplification mechanisms. *Journal of Sound and Vibration, 499*, 116009.

12. Laly, Z., Mechefske, C., Ghinet, S., Ashrafi, B. & Kone, C.T. (2023). Analysis of Helmholtz resonator wall elasticity effects on the performance of periodic acoustic metamaterial. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 268*(2), 6356-6367.

13. Laly, Z., Panneton, R. & Atalla, N. (2022). Characterization and development of periodic acoustic metamaterials using a transfer matrix approach. *Applied Acoustics, 185*, 108381.

14. Laly, Z., Panneton, R. & Atalla, N. (2019). A transfer matrix approach for modeling periodic acoustic metamaterial. *Proc. ICSV-26,* 3538-3546.

15. Mohapatra, K. & Jena, D.P. (2017). Benchmark analysis of a Helmholtz resonator for estimating acoustic metamaterial properties. *In International Conference on Physics and Mechanics of new materials and their applications (PHENMA 2017), Jabalpur, Madhya Pradesh,* India, 14-16.

16. Mahesh, K. & Mini, R. (2019). Helmholtz resonator based metamaterials for sound manipulation. *Journal of Physics: Conference Series, 1355*(1), 012031.

17. Kim, H., Kwon, Y. & Lee, S. (2023). Acoustic metamaterial design by phase delay derivation using transfer matrix. *Symmetry, 15*(3), 689.

18. Wen, G., Zhang, S., Wang, H., Wang, Z., He, J., Chen, Z., Liu, J. & Xie, Y.M. (2023). Origami-based acoustic metamaterial for tunable and broadband sound attenuation. *International Journal of Mechanical Sciences, 239*, 107872.

19. Zhang, Y., Wu, C., Li, N., Liu, T., Wang, L. & Huang, Y. (2024). Ventilated low-frequency sound absorber based on Helmholtz acoustic metamaterial. *Physics Letters A, 523*, 129779.

20. Singh, S., Hansen, C.H. & Howard, C.Q. (2008). A detailed tutorial for evaluating in-duct net acoustic power transmission in a circular duct with an attached cylindrical Helmholtz resonator using transfer matrix method. *Proceedings of Acoustics*, 1-8.

21. Jiménez, N., Groby, J.-P. & Romero-García, V. (2021). The transfer matrix method in acoustics. *Topics in Applied Physics*, 103-164.

22. Dell, A., Krynkin, A. & Horoshenkov, K. (2021). The use of the transfer matrix method to predict the effective fluid properties of acoustical systems. *Applied Acoustics, 182*, 108259.

23. Mahesh, K. & Mini, R. (2021). Investigation on the acoustic performance of multiple Helmholtz resonator configurations. *Acoustics Australia, 49*, 355-369.

24. Wu, D., Zhang, N., Mak, C.M. & Cai, C. (2017). Noise attenuation performance of a Helmholtz resonator array consist of several periodic parts. *Sensors, 17*(5), 1029.

25. Aritan, A. E. ve Can, M.F. (2024). Doğaltaş madenciliğinde ocak-fabrika ortamında titreşim ve gürültü maruziyetinin araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39*(2), 467-474.

26. Kalaycı Şahinoğlu, Ü. (2024). Patlatma sonucu meydana gelen hava şoku ve partikül madde yayılımı arasındaki ilişkinin araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39*(3), 831-837.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 1 MART/MARCH 2026

Terminal and Fast Terminal Sliding Mode Controls of a SISO Coupled Tank System: A Comparative Performance

Özgür GEYLANİ [1,a], **Barış ATA** [1,b]

[1]*Cukurova University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, Adana, Türkiye*

[a]***ORCID***: *0009-0001-2269-0976;* [b]***ORCID***: *0000-0003-4773-0564*

Article Info

Received : 07.03.2025
Accepted : 03.02.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1653345

Corresponding Author

Özgür GEYLANİ
ogeylani@cu.edu.tr

Keywords

Coupled tank system
Terminal sliding mode control
Fast terminal sliding mode control
Sliding surface
Stability analysis

How to cite: *GEYLANİ, Ö., ATA, B., (2026). Terminal and Fast Terminal Sliding Mode Controls of a SISO Coupled Tank System: A Comparative Performance. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(1), 75-88.*

ABSTRACT

In this study, both a terminal sliding mode controller and a fast terminal sliding mode controller are devised with the aim of enhancing the stability of the liquid level within a single-input, single-output coupled tank system. The foundational elements of the proposed controllers are established through an overview of the mathematical model governing the coupled tank system, alongside the conventional sliding mode control method. In the conventional sliding mode control design, the target can be reached in infinite time. To overcome this problem and produce more efficient results, a terminal sliding mode controller has been designed. Furthermore, an advanced design for a fast terminal sliding mode controller is introduced, with the objective of achieving expedited convergence towards the target. This design extends upon the findings derived from the terminal sliding mode controller. Subsequently, a comparative analysis of the outcomes obtained from the three methodologies is conducted. Simulation outcomes corroborate the superior efficacy of the proposed approach over conventional sliding mode control methods in accurately regulating the desired liquid level.

SISO Bağlantılı Tank Sisteminin Terminal ve Hızlı Terminal Kayan Mod Kontrolleri: Karşılaştırmalı Bir Performans Çalışması

Makale Bilgileri

Geliş : 07.03.2025
Kabul : 03.02.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1653345

Sorumlu Yazar

Özgür GEYLANİ
ogeylani@cu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Bağlantılı tank sistemi
Terminal kayan kipli kontrol
Hızlı terminal kayan kipli kontrol
Kayma yüzeyi
Kararlılık analizi

Atıf şekli: *GEYLANİ, Ö., ATA, B., (2026). SISO Bağlantılı Tank Sisteminin Terminal ve Hızlı Terminal Kayan Mod Kontrolleri: Karşılaştırmalı Bir Performans Çalışması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(1), 75-88.*

ÖZ

Bu çalışmada, tek girişli, tek çıkışlı bir bağlı tank sistemine yönelik olarak hem bir terminal kayan kipli kontrolcü hem de hızlı terminal kayan kipli kontrolcü tasarlanmıştır. Önerilen kontrolcülerin temel unsurları, bağlı tank sistemini yöneten matematiksel modelin genel bir değerlendirmesi ile geleneksel kayan kipli kontrol yöntemi üzerinden belirlenmiştir. Geleneksel kayan kipli kontrol tasarımında, hedefe ulaşım sonsuz bir zaman alabilir. Bu sorunu aşmak ve daha verimli sonuçlar elde etmek için bir terminal kayan kipli kontrolcü tasarlanmıştır. Ayrıca, hedefe hızlı bir şekilde yaklaşmayı hedefleyen gelişmiş bir hızlı terminal kayan kipli kontrolcü tasarımı tanıtılmıştır. Bu tasarım, terminal kayan kipli kontrolcüden elde edilen bulgulara dayanmaktadır. Ardından, üç metodun elde edilen sonuçlarının karşılaştırmalı bir analizi yapılmıştır. Simülasyon sonuçları, önerilen yaklaşımın geleneksel kayan kipli kontrol yöntemlerine göre istenen sıvı seviyesini daha doğru bir şekilde düzenlemede üstün etkinliğini doğrulamaktadır.

1. INTRODUCTION

The coupled tank system, which is widely employed in laboratory environments and various industries, serves as a fundamental mechanism for liquid distribution [1]. It is possible to use the coupled tank systems in different ways with the model structure and tank features that can be modified based on specific requirements. Using pop-up valves positioned at the transitions between the tanks enables manipulation of the liquid flow direction and structural adjustments. Several studies have added value to the literature by exploring both the single input single output (SISO) and multi input multi output (MIMO) configurations of the coupled tank system [2-4].

Following the development of a controller employing an appropriate control law tailored for the system, the coupled tank system becomes readily deployable in experimental configurations. The primary objective of the designed controller is to regulate the liquid level within the tank, ensuring it stays within the desired range. This necessitates the generation of a precise control signal [5]. Controlling such a complex system is challenging. Numerous significant studies in existing literature demonstrate the control of liquid flow through various noteworthy controller designs [6-8]. The compatibility and proper design of controllers with the system are essential as they affect system performance. Controller performance can be evaluated by observing the values for rise time, steady-state error, settling time, and overshoot.

There are many noteworthy studies on liquid level control in the literature. Experiments in these studies have been carried out with different control methods such as the PID controller, backstepping controller, fuzzy controller, and sliding mode controller, resulting in successful outcomes [6,9-12].

Sliding mode control (SMC) stands out as a nonlinear control approach renowned for its ease of implementation and robustness [13]. The SMC is a variable structure control (VSC) based approach [14]. Following the popularization of SMC through the work of Vadim Utkin in the 1960s, its applications expanded, and studies were conducted combining the SMC law with different techniques [15]. SMC has garnered significant attention and utilization across various domains due to its robustness and ease of implementation. Its applicability extends to a wide array of complex systems, encompassing discrete-time, nonlinear, large-scale, and higher-order systems.

An example of the main benefits of SMC is that it is resistant to internal disturbances and parameter changes. However, unmodeled dynamics may destabilize the controller and damage the system, leading to a phenomenon known as chattering. Various approaches have been introduced to reduce the adverse effects of chattering [16].

Switching and equivalent control laws are used in the SMC design. In the process of crafting the switching control law, particular emphasis should be placed on the careful selection of the sliding surface coefficient and switching gain coefficients. These parameters play a crucial role in shaping the behavior and performance of the control system. A judicious choice of these coefficients can contribute significantly to the stability and effectiveness of the control law, ensuring robust performance in the face of uncertainties and disturbances. Insufficient attention to the meticulous selection of coefficients and the meticulous design of the control law can lead to a substantial deterioration in the controller's performance. This can also lead to the occurrence of chattering. The overarching aim of the control law is to guide the trajectory of the nonlinear system towards a user-defined surface. The control law attempts to maintain the trajectory at the target after the system trajectory drives onto the sliding surface. System states can change during the control process, and this event can be considered a type of VSC. The term SMC originates from the presence of a sliding surface. The purpose of using the equivalent control law in the SMC design is to limit the control gain of the switching control law.

With its robust developed features, SMC has often been used together with different practical control methods, such as fuzzy logic, adaptive approach, and integral and terminal approach, to represent a strategic endeavor aimed at augmenting the efficacy of control systems [5,17]. The conventional SMC method uses linear sliding surfaces with a non-finite convergence time. The terminal sliding mode control (TSMC) approach overcomes this problem by using a fractional exponent term in the definition of the sliding surface [18]. In the controller crafted using the TSMC approach, despite the absence of a nonlinear characteristic in the sliding surface, assured convergence to zero within a finite timeframe is achievable. When juxtaposed with conventional SMC, the TSMC method exhibits enhanced system performance and superior stability.

However, it's noteworthy that the chattering phenomenon persists to some extent and remains unresolved, indicating that complete elimination is not attained [19,20].

The TSMC method is prone to a singularity phenomenon that can adversely affect the system's performance. The singularity phenomenon can result in infinite control quantities or an inability to guarantee convergence [21]. If disturbances persist in the TSMC that prevent reaching equilibrium, it becomes challenging to maintain a consistent approach toward zero. To overcome these problems, the fast terminal sliding mode control (FTSMC) approach, which is derived from TSMC, has been proposed [22]. Similar to TSMC, the FTSMC approach ensures convergence to zero within a finite timeframe. However, noteworthy distinctions arise in their convergence behaviors: the convergence graph in FTSMC showcases a faster trajectory compared to controllers devised using the TSMC method. The system states of closed-loop systems have been observed to exhibit better performance in the FTSMC. While the FTSMC significantly reduces the chattering phenomenon, the singularity problem still exists and remains unsolved. Ongoing studies are exploring solutions to address this issue through the application of the FTSMC method [22,23].

This study focuses on developing both a terminal sliding mode controller and a fast terminal sliding mode controller tailored for regulating liquid levels within a coupled tank system. The primary objective here is to devise a resilient control signal capable of mitigating the chattering phenomenon commonly encountered in traditional SMCs and achieving the target within a finite timeframe. The stability of the proposed controllers was scrutinized employing the Lyapunov theorem, a cornerstone of stability analysis in control systems. Furthermore, a comparative assessment was conducted between the proposed terminal sliding mode controller and the fast terminal sliding mode controller vis-a-vis the conventional SMC. This evaluation aimed to gauge the efficacy of the simulation results obtained from each controller configuration.

2. COUPLED TANK SYSTEM

The coupled tank system refers to a setup consisting of identical tanks in which liquid circulation occurs. The system used in this study consists of two identical tanks with a reservoir positioned beneath them, as illustrated in Figure 1. The reservoir functions as a liquid-filled tank from which the pump draws liquid, while any surplus water in tank 2 is discharged into this reservoir to regulate the liquid level. The pump immersed in the reservoir fills the first tank with liquid. The speed of the liquid flowing through the pump may change. Through the open valve pipe between identical tanks, the liquid flows toward the second tank, and from the open outlet hole of the second tank, the liquid flows into the reservoir. Liquid flows freely between tanks and into the reservoir through open valved holes.

The control aim in this scenario is to attain and uphold the liquid level within the second tank to the desired level. Throughout the process, the flow rate of the liquid flowing through the pump is regulated to attain the desired liquid level.

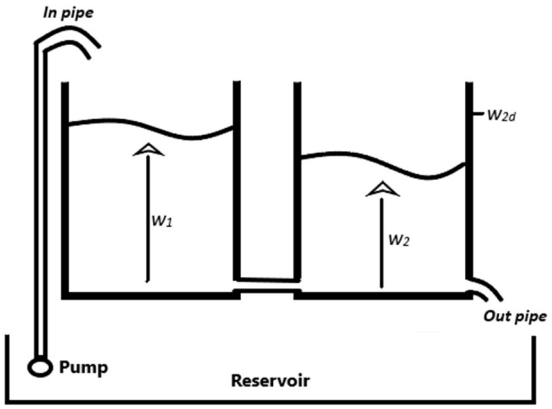


Figure 1. Coupled tank system

The rate of liquid flowing between the tanks f_{i1} and the rate at which liquid exits while flowing into the reservoir f_{i2} can be defined as follows (Equations 1 and 2) [6]

$$f_{i1} = p_{12}\sqrt{2g(w_1 - w_2)} \tag{1}$$

$$f_{i2} = p_2\sqrt{2gw_2} \tag{2}$$

where, w_1 and s w_2 represent the liquid levels in tanks 1 and 2, respectively; g denotes the gravitational acceleration, p_{12} signifies the area of the pipe between the coupled tanks, and p_2 stands for the area of the outlet in the 2nd tank. Utilizing (Equation 1 and 2), the equations governing the liquid flow balances can be expressed as (Equations 3 and 4) [6]:

$$P\frac{dw_1}{dt} = f_i - f_{i1} \tag{3}$$

$$P\frac{dw_2}{dt} = f_{i1} - f_{i2} \tag{4}$$

where f_i is the rate at which liquid flows into the system through the pump and P stands for the cross-sectional area encompassing both tanks.

Upon differentiating the (Equations 3 and 4) for the liquid levels are left on one side of the equation, the mathematical equation for coupled tanks can be written as (Equations 5 and 6) [6]

$$\frac{dw_1}{dt} = -b_1\sqrt{|w_1 - w_2|}\,\mathrm{sgn}(w_1 - w_2) + \frac{f_i}{P} \tag{5}$$

$$\frac{dw_2}{dt} = b_1\sqrt{|w_1 - w_2|}\,\mathrm{sgn}(w_1 - w_2) - b_2\sqrt{w_2} \tag{6}$$

where

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{p_{12}\sqrt{2g}}{P} \\ b_2 &= \frac{p_2\sqrt{2g}}{P} \end{aligned} \tag{7}$$

and the signum function for the coupled tank system can be described as (Equation 8)

$$\mathrm{sgn}(w_1 - w_2) = \begin{cases} 1 & w_1 - w_2 > 0 \\ 0 & w_1 - w_2 = 0 \\ -1 & w_1 - w_2 < 0. \end{cases} \tag{8}$$

The fact that the derivatives of w_1 and w_2 are zero indicates that the liquid levels are in balance, expressed as follows (Equation 9):

$$\begin{aligned} \frac{dw_1}{dt} &= \dot{w}_1 = 0 \\ \frac{dw_2}{dt} &= \dot{w}_2 = 0. \end{aligned} \tag{9}$$

With the information in (Equation 9), can be rearranged as follows (Equation 10):

$$f_i = b_1\sqrt{|w_1 - w_2|}\,\mathrm{sgn}(w_1 - w_2)P. \tag{10}$$

Because the liquid flow from the pump is directed to the 1st tank, the inequality $w_1 > w_2$ is acknowledged. Therefore, the system should satisfy $sgn(w_1 - w_2) \geq 0$ and This necessitates a rearrangement of the mathematical model of the system as follows (Equations 11 and 12):

$$\dot{w}_1 = -b_1\sqrt{w_1 - w_2} + \frac{f_i}{P} \tag{11}$$

$$\dot{w}_2 = b_1\sqrt{w_1 - w_2} - b_2\sqrt{w_2}. \tag{12}$$

System output and control input can be defined with the following transformations for use in subsequent equations [6]

$$\begin{aligned} y_1 &= w_2 \\ y_2 &= w_1 - w_2 \\ u &= f_{i.} \end{aligned} \tag{13}$$

The derivatives of y_1 and y_2 in (Equation 13) can be written as follows [6]:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= -b_1\sqrt{y_1} + b_2\sqrt{y_2} \\ \dot{y}_2 &= b_1\sqrt{y_1} - 2b_2\sqrt{y_2} + \frac{f_i}{P} \\ y &= y_1 = w_2. \end{aligned} \tag{14}$$

Consider $z = [z_1, z_2]^T$. Define a transformation $z = T(y)$, according to the following rule:

$$\begin{aligned} z_1 &= y_1 \\ z_2 &= -b_1\sqrt{y_1} + b_2\sqrt{y_2} \end{aligned} \tag{15}$$

The inverse transformation $y = T^{-1}(z)$

$$\begin{aligned} y_1 &= z_1 \\ y_2 &= \frac{\left(b_1\sqrt{z_1} + z_2\right)}{b_2} \end{aligned} \tag{16}$$

Upon inspection, the dynamic representation in (Equation 14) can be recast as:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= \frac{b_1 b_2}{2}\left(\frac{\sqrt{y_1}}{\sqrt{y_2}} - \frac{\sqrt{y_2}}{\sqrt{y_1}}\right) + \frac{b_1 b_1}{2} - b_2 b_2 + \frac{b_2 u}{2P\sqrt{y_2}} \end{aligned} \tag{17}$$

Consequently, the system dynamics can be compactly represented as:

$$\begin{aligned}\dot{z}_1 &= z_2\\ \dot{z}_2 &= f + gu\\ y &= z_1\end{aligned} \tag{17}$$

where

$$f = \frac{b_1 b_2}{2}\left(\frac{\sqrt{y_1}}{\sqrt{y_2}} - \frac{\sqrt{y_2}}{\sqrt{y_1}}\right) + \frac{b_1 b_1}{2} - b_2 b_2 \tag{18}$$

and

$$g = \frac{b_2}{2P\sqrt{y_2}}. \tag{19}$$

3. METHODS

3.1. Sliding Mode Control

The assertion regarding SMC as a robust nonlinear control method applicable to both linear and nonlinear systems resonates with established literature in control theory. SMC has become a popular method frequently used in modern control systems because of its easy application and fast response. The statement regarding the existence of two fundamental principles in sliding mode controller design aptly encapsulates a cornerstone of control theory discourse. Initially, the user needs to designate a suitable surface, termed the sliding surface, for the system. The second principle involves guiding the system trajectory onto the sliding surface and maintaining the system's dynamics and trajectory there [24].

Within the SMC framework, two distinct control units operate: switching control and equivalent control. Switching control is responsible for guiding the system trajectory onto the sliding surface. To ensure the highest level of performance, it is necessary to design the switching control correctly. The sliding surface pertaining to the switching control law can be rigorously delineated as [25,26]:

$$S_c = \beta_c e_c + \dot{e}_c \tag{20}$$

where β_c is a positive real number, e_c represents the tracking error, $\dot{e}_c$ while stands for its derivative.

Considering the tracking error as $e_c = w_2 - w_{2d}$ for the coupled tank system and its time derivative as $\dot{e}_c = \dot{w}_2 = \dot{z}_1$, the reformulation of the sliding surface in (Equation 21) yields (Equation 22):

$$S_c = \beta_c (w_2 - w_{2d}) + \dot{z}_1. \tag{21}$$

Using (Equations 17 and 18), the time derivative of the sliding surface can be obtained as (Equation 23)

$$\begin{aligned}\dot{S}_c &= \beta_c \dot{z}_1 + \ddot{z}_1\\ &= \beta z_2 + f + gu\end{aligned} \tag{22}$$

The SMC law, which includes switching and equivalent controls, can be defined as follows (Equation 24) [26]:

$$\begin{aligned}u_c &= u_{csw} + u_{ceq}\\ &= \frac{1}{g}(-f - \beta z_2 - k\,\mathrm{sgn}(S_c))\end{aligned} \tag{24}$$

where u_{csw} is switching control, u_{ceq} is equivalent control and k is a positive real number.

A Lyapunov function candidate, aimed at assessing the stability of the control system, can be identified as follows [26,27]:

$$V_c = \frac{S_c^2}{2}. \tag{25}$$

The time derivative of V_c is defined as (Equation 26)

$$\begin{aligned} \dot{V}_c &= S_c \dot{S}_c \\ &= S_c (f + g u_c + \beta_c z_2) \\ &= S_c (-k \operatorname{sgn}(S_c)) \\ &= -k |S_c| \\ &\leq 0. \end{aligned} \tag{26}$$

In this case, the solution to the equation yields a negative result. In accordance with the Lyapunov theorem, it is necessary for $\dot{V}_c$ to satisfy less than zero demonstrates that the stability of the system has been proven and also confirms that the system trajectory converges to the sliding surface and remains there.

3.2. Terminal Sliding Mode Control

A nonlinearity can be introduced into the system dynamics, potentially leading to improved performance compared to conventional SMC approaches [23,26,28]. The incorporation of the terminal attractor approach into the SMC has been demonstrated in previous studies to enable convergence in finite time, leading to the proposal of TSMC. The TSMC can be applied to control high-order systems and can be designed as follows for a coupled tank system characterized by a single input, single output configuration (Equation 27) [20]:

$$S_t = \beta_t e_t^{m/n} + \dot{e}_t \tag{27}$$

where β_t is a positive real number, represents the tracking error, while $\dot{e}_t$ stands for its derivative, m and n positive odd numbers and n must be greater than m.

Once the sliding surface is enforced $S_t = 0$, the closed-loop dynamics simplify to a nonlinear differential equation:

$$\dot{e}_t = -\beta_t e_t^{m/n} \tag{28}$$

Due to the presence of a fractional exponent, this equation exhibits finite-time convergence. Solving it via separation of variables yields the convergence time:

$$T = \frac{e_t(0)^{1-m/n}}{\beta_t (1 - m/n)} \tag{29}$$

The condition $0 < m/n < 1$ ensures $T < \infty$, establishing strict finite-time stability[32].

Considering the tracking error as $e_t = w_2 - w_{2d}$ for the coupled tank system and its time derivative as $\dot{e}_t = \dot{w}_2 = \dot{z}_1$, the reformulation of the sliding surface in (Equation 27) yield (Equation 30):

$$S_t = \beta_t (w_2 - w_{2d})^{m/n} + \dot{z}_1. \tag{30}$$

By employing (Equations 17 and 18), one can compute the time derivative of the sliding surface as (Equation 31):

$$\begin{aligned}\dot{S}_t &= \ddot{z}_1 + \frac{m}{n}\beta_t e_t^{\frac{m-n}{n}}\dot{z}_1 \\ &= f + gu_t + \beta_t \frac{m}{n}(w_2 - w_{2d})^{\frac{m-n}{n}} z_2\end{aligned} \tag{31}$$

The TSMC law can be selected as (Equation 32) [26]

$$\begin{aligned}u_t &= u_{tsw} + u_{teq} \\ &= \frac{1}{g}(-f - \beta_t \frac{m}{n}(w_2 - w_{2d})^{\frac{m-n}{n}} z_2 - k\,\mathrm{sgn}(S_c))\end{aligned} \tag{32}$$

where u_{tsw} is switching control, u_{teq} is equivalent control and k is a positive real number.

The Lyapunov function employed in the TSMC design can be specified as follows (Equation 33) [26,27]:

$$V_t = \frac{S_t^2}{2}. \tag{33}$$

V_t can be derived as (Equation 34)

$$\begin{aligned}\dot{V}_t &= S_t\dot{S}_t \\ &= S_t(f + gu_t + \frac{m}{n}\beta_t(w_2 - w_{2d})^{\frac{m-n}{n}} z_2) \\ &= S_t(-k\,\mathrm{sgn}(S_t)) \\ &= -k|S_t|.\end{aligned} \tag{34}$$

According to the theory of finite-time stability, the Lyapunov function derivative must fulfill the condition $\dot{V}_t \le -mV_t^n$, where $m > 0$ and $0 < n < 1$, in order to guarantee convergence within a finite time horizon. By introducing the variable transformation $S_t = \sqrt{2V_t}$, the derivative of the Lyapunov function takes the form:

$$\dot{V}_t = -k\sqrt{2}V_t^{1/2} \tag{35}$$

which is clearly consistent with the finite-time stability condition by identifying $m = k\sqrt{2}$ and $n = 1/2$. This confirms that, under the proposed the TSMC framework, the system trajectories reach the sliding surface $S_t = 0$ in finite time, thereby ensuring finite-time convergence properties.

3.3. Fast Terminal Sliding Mode Control

The statement suggests that the FTSMC possesses the capability to drive the system trajectory to zero within a finite timeframe. This assertion aligns with the fundamental objective of FTSMC, which is to expedite convergence towards the desired target, thus enhancing the overall performance of the control system. The ability to achieve such convergence within a finite time underscores the efficacy of the FTSMC approach, particularly in scenarios where rapid response and precise control are paramount.

The sliding surface, which is very important for shaping the performance characteristics, can be expressed as follows for FTSMC [29]:

$$S_f = \dot{e}_f + ae_f + \beta_f e_f^{\frac{m}{n}} \tag{37}$$

where a and β_f are positive real numbers, e_f represents the tracking error, while $\dot{e}_f$ stands for its derivative and m and n positive odd numbers and n must be greater than m.

Once the sliding manifold is reached ($S_f = 0$), the closed-loop error dynamics simplify to a combination of a nonlinear terminal attractor and a linear damping term. Specifically, the expression

$$\dot{e}_f = -\beta_f e_f^{\frac{m}{n}} - a e_f \tag{38}$$

ensures finite-time convergence by exploiting the fast settling behavior of the nonlinear term near the origin, while the linear term enhances transient performance. The convergence time is analytically given by [30, 31]:

$$T = \frac{1}{a(1-\frac{m}{n})} \ln\left(\frac{a e_f(0)^{1-\frac{m}{n}} + \beta_f}{\beta_f} \right) \tag{39}$$

which guarantees that the tracking error e_f reaches zero within a finite time interval[32].

In the context of the coupled tank system, (Equation 40) provides a representation of the sliding surface, which can be further reformulated as follows:

$$S_f = \beta_f (w_2 - w_{2d})^{\frac{m}{n}} + a(w_2 - w_{2d}) + \dot{z}_1. \tag{40}$$

derivating S_f in (Equation 41) yield

$$\dot{S}_f = f + g u_f + \beta_t \frac{m}{n} (w_2 - w_{2d})^{\frac{m-n}{n}} z_2 + a z_2. \tag{41}$$

The FTSMC law can be defined as [29]

$$u_f = \frac{1}{g}(-f - a z_2 - \beta \frac{m}{n} (w_2 - w_{2d})_f^{\frac{m-n}{n}} z_2 - k \operatorname{sgn}(S_f)) \tag{42}$$

The Lyapunov candidate for FTSMC stability can be selected as (Equation 43) [26-28]

$$V_f = \frac{S_f^2}{2}. \tag{43}$$

The derivative of V_f can be written as (Equation 44)

$$\begin{aligned} \dot{V}_f &= S_f \dot{S}_f \\ &= S_f \left(f + g u_f + \frac{m}{n} \beta_f (w_2 - w_{2d})^{\frac{m-n}{n}} z_2 - a z_2 \right) \\ &= S_f \left(-k \operatorname{sgn}(S_f) \right) \\ &= -k \left| S_f \right|. \end{aligned} \tag{44}$$

To establish finite-time stability, the Lyapunov function derivative must fulfill the condition $\dot{V}_f = -m V_f^n$, where $m > 0$ and $0 < n < 1$ [33]. By substituting the relation $S_f = \sqrt{2V_f}$ into the derivative expression, we obtain:

$$\dot{V}_f = -k\sqrt{2}S_f^{1/2} \tag{45}$$

This satisfies the required inequality with $m = k\sqrt{2}$ and $n = 1/2$, confirming that the proposed FTSMC strategy ensures convergence of system trajectories to the equilibrium point within a finite time interval.

4. RESULT AND DISCUSSION

The diagram shown in Figure 2 shows the signal flow between the controller (SMC/TSMC/FTSMC), the connected tank system and the signal processing blocks. Specifically, the diagram includes the reference signal input, the measured output from the plant, and the derivative of the output fed back to the controller.

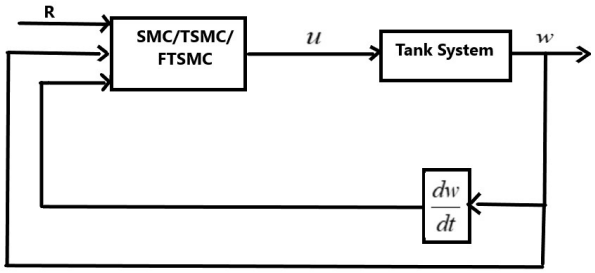


Figure 2. Block diagram of the controls

The SMC, TSMC, and FTSMC laws defined in (Equations 24, 32, and 42), respectively, are compared with each other. The saturation function can be used in these equations instead of the sign function to dampen the chattering effect resulting from the SMC law. The saturation function can be defined as follows (Equation 46):

$$sat(S) = \begin{cases} S & |S| < 1 \\ sgn(S) & |S| >= 1. \end{cases} \tag{46}$$

The primary goal of the controllers is to ensure that the liquid level in Tank 2 reaches and maintains 5 cm during the first 80 seconds, and subsequently tracks a reference of 10 cm for the remainder of the operation. The experiment duration was set as 300 seconds. The liquid level in the 1st tank is initially fixed at a precise measurement of 0.1 cm, and the 2nd tank is completely empty. In (Table 1), the parameters defining the coupled tank system outlined in (Equations 5 and 6) are presented.

Table 1. Coupled tank system parameters

Symbol	Value	Meaning
w_1	0.1 cm	Initial liquid level for tank 1
w_2	0 cm	Initial liquid level for tank 2
w_{2d}	5 cm	Desired liquid level for tank 2
g	981 cm/s^2	Acceleration due to gravity
P	208.2 cm^2	Cross-sectional area
p_{12}	0.58 cm^2	tank 2 Outlet Area
p_2	0.24 cm^2	Area of the interconnecting pipe between tanks 1 and 2

While applying the SMC law, the β_s parameter of the controller was set to 0.015 and the k parameter was set to 45. For the TSMC and FTSMC laws, the constant values used in the equation of the controller were chosen as β_t = 0.015, β_f = 0.015, $a = 0,015$ and $k = 45$ for comparison under the same conditions. The selection of constant parameters is determined through iterative experimentation and

refinement. In the simulation, the SMC, TSMC, and FTSMC methods were tested on coupled tanks. While Tank 1 is not the primary control target, its level is illustrated in (Figure 3) to highlight the influence of the interconnected dynamics and to support the interpretation of the overall system behavior. The outputs obtained after the tests of the SMC, TSMC, and FTSMC methods on the coupled tanks are combined in (Figure 4) for better observation.

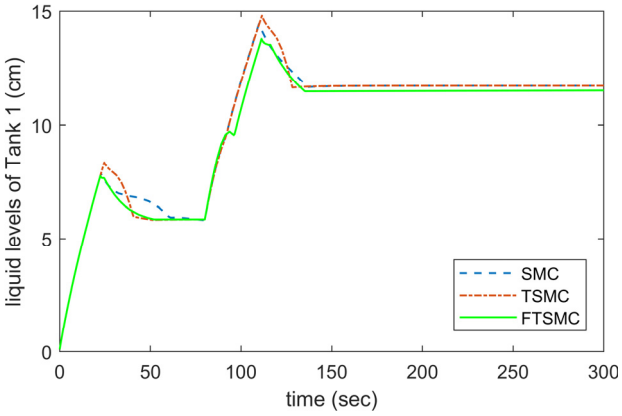


Figure 3. Evolutions of Tank 1 levels

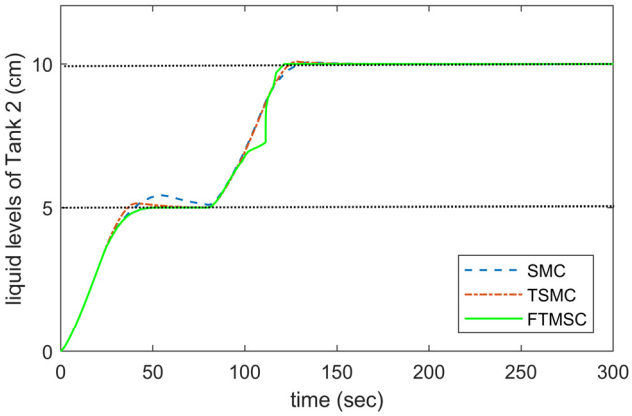


Figure 4. Evolutions of outputs

In order to examine the continuity and adaptation capability of the controllers, the reference level was increased from 5 cm to 10 cm at 80 seconds. This change enables the evaluation of controller performance under a varying setpoint condition and better reflects real-world operational scenarios.

A diagram showing the control signals of the three control laws on the coupled tanks is combined in (Figure 5) for better observation.

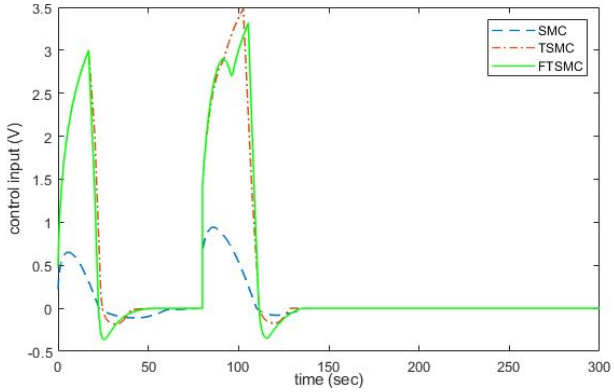


Figure 5. Evolution of the control signals

As illustrated in (Figures 3 and 4), while the conventional SMC was able to drive the system output to the desired reference level, the TSMC and FTSMC controllers demonstrated superior performance in terms of convergence speed and reduced steady-state error. The enhanced responsiveness and smoother control behavior of TSMC and FTSMC can be clearly observed in the transient and steady-state responses shown in these figures. Furthermore, (Table 2) presents a detailed comparison of the numerical performance indices obtained from the experimental tests, including Settling time, Overshoot, and Steady-state error values. These metrics quantitatively confirm that both TSMC and FTSMC outperform conventional SMC, with FTSMC yielding the best overall results.

Table 2. Performans results

	Settling time	**Overshoot**	**Steady-state error**
SMC	106.7073	7.8319	0.0056
TSMC	55.8702	2.7081	0.0005
FTSMC	44.3647	0.0231	0.0011

The performance indices presented in (Table 3) clearly demonstrate that the proposed FTSMC outperforms both SMC and TSMC in terms of tracking accuracy. With the lowest IAE (287.75) and ISE (968.57) values among all controllers, FTSMC effectively minimizes both the total and squared tracking errors. This indicates a faster and more precise convergence to the desired reference levels. While TSMC also shows improved performance over SMC, the superiority of FTSMC suggests that the incorporation of fractional powers enhances the robustness and error correction capabilities of the controller.

Table 3. Performans indices

	IAE	**ISE**
SMC	325.33	1268.33
TSMC	306.80	1157.28
FTSMC	287.75	968.57

5. CONCLUSION

In this study, controllers were designed using SMC-derived TSMC and FTSMC laws to manage the liquid level of the coupled tank system in the SISO structure. The differences and advantages of these approaches were observed by comparing the examined TSMC and FTSMC laws with the conventional SMC law. Simulation tests were conducted to evaluate the efficacy of the designed controllers for the coupled tank system within the simulated environment. From the evolution of outputs, TSMC and FTSMC, it is observed that the conventional SMC tends to approach zero in finite time, but if we interpret the performance results table, it is clear that the overshoot, settling time and steady-state error values are better. According to the results, the proposed methods are compatible with the system and provide more effective outputs than the conventional SMC. The next goal after the liquid level control of the SISO coupled tank system, which will be a light for future studies, is to examine the proposed methods on the cross-coupled four-tank system with simulation and experimental results.

As a potential extension of this study, the robustness of the proposed FTSMC approach can be further evaluated by introducing external disturbances to the system. For instance, a disturbance scenario involving a sudden opening of an external valve connected to Tank 1 could be implemented to simulate unexpected variations in flow dynamics. Such an intervention would allow assessment of the controller's ability to reject disturbances and maintain output tracking accuracy. Future work will focus on incorporating this type of disturbance into both simulation and experimental setups to investigate the disturbance rejection performance and overall resilience of the controller under more realistic operating conditions.

6. REFERENCES

1. Pan, H., Wong, H., Kapila, V. & Queiroz, M.S. (2005). Experimental validation of a nonlinear backstopping liquid level controller for a state coupled two tank systemç *Control Engineering Practice, 13*(1), 27-40.

2. Le, H.T., Lee, C.Y. & Lee, S.R. (2010). Dynamic adaptive backstepping and saturated proportional integral sliding mode control for uncertain nonlinear systems. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 11*(4), 527-537.

3. Shamily, S., Praveena & Bhuvaneswari, N.S. (2015). Intelligent control and adaptive control for interacting system. *IEEE Technological Innovation in ICT for Agriculture and Rural Development (TIAR)*.

4. Kadri, M.B. (2017). Model-free fuzzy adaptive control for MIMO systems. *Arabian Journal for Science and Engineering, 42*, 2799-2808.

5. Geylani, O. & Ata, B. (2022). Adaptive sliding mode control of a coupled tank system. *2022 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, IEEE.

6. Almutairi, N.B. & Zribi, M. (2006). Sliding mode control of coupled tanks. *Mechatronics, 16*, 427-441.

7. Khan, M.K. & Spurgeon, S.K. (2006). Robust MIMO water level control in interconnected twin tanks using second-order sliding mode control. *Control Engineering Practice, 14*, 375-386.

8. Abbas, H., Asghar, S. & Qamar, S. (2012). Sliding mode control for coupled-tank liquid level control system. *10th International Conference on Frontiers of Information Technology, 4*, 4.

9. Malmborg, J. & Eker, J. (1997). Hybrid control of a double tank system. *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Control Applications.*

10. Dharamniwas, Ahmad, A., Redhu, V. & Gupta, U. (2012). Liquid level control by using fuzzy logic controller. *International Journal of Advances in Engineering & Technology, 4*(1), 537-549.

11. Meng, X., Yu, H., Wu, H. & Xu, T. (2020). Disturbance observer-based integral backstepping control for a two-tank liquid level system subject to external disturbances. *Mathematical Problems Engineering*, 1-22.

12. Yasar, O. (2024). Climbing with robots: a second order controller design for accurate wheel motion positioning. *Cukurova University Journal of the Faculty of Engineering, 39*(1), 175-187.

13. Qureshi, M.S., Das, S., Swarnkar, P. & Gupta, S. (2018). Design and implementation of sliding mode control for uncertain systems. *Materials Today: Proceedings, 5*(2), Part 1, 4299- 4308.

14. Utkin, V.I., Young, K.D. & Özgüner, Ü.A. (1996). Control engineer's guide to sliding mode control. *IEEE Transactions*.

15. Sabanovic, A. (2011). Variable structure systems with sliding modes in motion control. *IEEE Transactions on Industrial Informatics, 7*(2), 212- 223.

16. Suryawanshi, P.V., Shendge, P.D. & Phadke, S.B. (2016). A boundary layer sliding mode control design for chatter reduction using uncertainty and disturbance estimator. *International Journal of Dynamics and Control,* 456-465.

17. Wang, S., Hou, L., Dong, L. & Xiao, H. (2011). Adaptive fuzzy sliding mode control of uncertain nonlinear SISO systems. *2011 International Conference on Advances in Engineering, Procedia Engineering, 24*, 33-37.

18. Yorgancıoğlu, F. & Redf, S. (2019). Fast nonsingular terminal decoupled sliding-mode control using time-varying sliding surfaces. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 27*(3), 1922-1937.

19. Zhang, Q., Yu, H. & Wang, X. (2013). Integral terminal sliding mode control for a class of nonaffine nonlinear systems with uncertainty. *Mathematical Problems Engineering*, 1-11.

20. Burange, P.R., Parvat, B.J. & Kadu, C.B. (2015). Design of TSMC for coupled tank process. *International Conference on Energy Systems and Applications*.

21. Chen, Z., Yuan, X., Wu, X., Yuan, Y. & Lei, X. (2019). Global fast terminal sliding mode controller for hydraulic turbine regulating system with actuator dead zone. *Journal of the Franklin Institute-engineering and Applied Mathematics, 356*(15), 8366-8387.

22. Ghogare, M.G., Patil, S.L., Patil, C.Y. & Chaudhari, L.R. (2023). Experimental application of global fast terminal sliding mode controller to TITO system. *Ecti Transactions On Electrical Engineering, Electronics, And Communications, 21*(2), 249727.

23. Ghogare, M.G., Patil, S.L. & Patil, C.Y. (2022). Experimental validation of optimized fast terminal sliding mode control for level system. *ISA Transactions, 26*, 486-497.

24. Kayisli, K., Tuncer, S. & Poyraz, M. (2008). Active power factor correction using a sliding mode controller. *Pamukkale University Journal of Engineering Science, 14*(3), 253-260.

25. Sancak, C., Coskun, M.Y. & Itik, M. (2016). Vision based sliding mode control of micro displacement of a conjugated electroactive polymer actuator. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 22*(8), 629-635.

26. Shtessel, Y., Edwards, C., Fridman, L. & Levant, A. (2014). Sliding mode control and observation. *Control Engineering.* New York: Springer New York.
27. Ata, B. (2020). Bir top ve bir çubuk sisteminin ayrıklaştırılmış geri adımlamalı kayan kipli kontrolü. *Cukurova University Journal of the Faculty of Engineering, 35*(3), 659-668.
28. Zhongqiang, W.U. (2016). Terminal sliding mode control of MIMO linear time delay systems. *2nd International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics (AMEII 2016*).
29. Parvat, B.J. & Patre, B.M. (2017). Fast terminal sliding mode controller for square multivariate processes with experimental application. *International Journal of Dynamics and Control, 5*, 1139-1146.
30. Amirkhani, S., Mobayen, S., Iliaee, N., Boubaker, O. & Hosseinnia, H. (2019). Fast terminal sliding mode tracking control of nonlinear uncertain mass–spring system with experimental verifications. *International Journal of Advanced Robotic Systems,* 1-10.
31. Fang, Q., Mao, P., Shen, L. & Wang, J. (2022). A global fast terminal sliding mode control for trajectory tracking of unmanned aerial manipulation. *Measurement and Control, 56*(3-4), 763-776.
32. Yu, X. & Zhihong, M. (2002). Fast terminal sliding-mode control design for nonlinear dynamical systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 49*(2), 261-264.
33. Song, Y. & Su, J. (2022). A unified lyapunov characterization for finite time control and prescribed time control. *International Journal of Robust and Nonlinear Control, 33*, 2509-2949.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 1 MART/MARCH 2026

Büyük Veri ile Türkiye'de Hane İnternet Erişim Durumunun Makine Öğrenmesi ve Açıklanabilir Yapay Zekâ ile Analizi

Tolga TUNÇEL [1,a], **Emre KILINÇ** [2,b]

[1]*Ankara Üniversitesi, Bilişim Teknolojileri Meslek Yüksekokulu, Büyük Veri Analistliği Programı, Ankara Türkiye*
[2]*Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Patnos Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Ağrı, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0002-7427-2071; [b]**ORCID**: 0000-0002-5250-9322*

Makale Bilgileri
Geliş : 02.08.2025
Kabul : 30.01.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1755138

Sorumlu Yazar
Tolga TUNÇEL
tolgatuncel@ankara.edu.tr

Anahtar Kelimeler
Büyük veri analizi
XAI
SHAP
LIME
Açıklanabilir yapay zekâ

***Atıf şekli:** TUNÇEL, T., KILINÇ, E., (2026). Büyük Veri ile Türkiye'de Hane İnternet Erişim Durumunun Makine Öğrenmesi ve Açıklanabilir Yapay Zekâ ile Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(1), 89-100.*

ÖZ

Bu çalışmada, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından 2024 yılında gerçekleştirilen Hanehalkı Bilişim Teknolojileri Kullanım Araştırması (HBTKA) mikro verileri kullanılarak, hanehalkı internet erişim durumunu belirleyen temel faktörler makine öğrenmesi ve açıklanabilir yapay zekâ (AYZ) yaklaşımlarıyla analiz edilmiştir. CatBoost, LightGBM, Lojistik Regresyon, Rastgele Orman ve XGBoost modelleri ile yüksek sınıflandırma başarımı elde edilmiş; model çıktıları SHapley Additive exPlanations (SHAP) ve Local Interpretable Model-agnostic Explanations (LIME) yöntemleri kullanılarak hem küresel hem de yerel düzeyde yorumlanmıştır. Elde edilen bulgular, hane aylık gelir düzeyi, hane birey sayısı ve dijital cihaz sahipliğinin internet erişimi üzerinde belirleyici rol oynadığını ortaya koymaktadır. Bölgesel değişkenlerin etkisi sınırlı kalmıştır. Sonuçlar, Türkiye'de dijital uçurumun azaltılmasında ekonomik kapasite ve dijital donanım odaklı politika müdahalelerinin kritik önem taşıdığını göstermektedir.

Analysis of Household Internet Access Status in Turkey with Big Data Using Machine Learning and Explainable Artificial Intelligence

Article Info
Received : 02.08.2025
Accepted : 30.01.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1755138

Corresponding Author
Tolga TUNÇEL
tolgatuncel@ankara.edu.tr

Keywords
Big data analysis
XAI
SHAP
LIME
Explainable artificial intelligence

***How to cite:** TUNÇEL, T., KILINÇ, E., (2026). Analysis of Household Internet Access Status in Turkey with Big Data Using Machine Learning and Explainable Artificial Intelligence. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(1), 89-100.*

ABSTRACT

This study investigates the key determinants of household internet access in Turkey using microdata from the 2024 Household Information Technologies Usage Survey conducted by the Turkish Statistical Institute (TurkStat). Advanced machine learning models, including CatBoost, LightGBM, Logistic Regression, Random Forest, and XGBoost, were employed to achieve high classification performance. Model predictions were interpreted at both global and local levels using explainable artificial intelligence (XAI) techniques, namely SHapley Additive exPlanations (SHAP) and Local Interpretable Model-agnostic Explanations (LIME). The results indicate that monthly household income, household size, and digital device ownership are the most influential factors affecting internet access status. Regional variables exhibit a comparatively limited effect. These findings demonstrate that household internet access in Turkey is primarily driven by economic capacity and digital equipment availability, highlighting the importance of income- and device-oriented policy interventions to effectively reduce the digital divide.

1. GİRİŞ

Geçmiş yıllarda lüks bir araç olarak görülen internet, günümüzde lüks bir araçtan temel bir ihtiyaca dönüşmüştür. Eğitim, iletişim, sağlık ve kamu hizmetleri gibi temel alanlar başta olmak üzere birçok farklı alanda aktif olarak kullanılmaktadır. İnternet erişimi giderek yaygınlaşsa da evrensel değildir. Özellikle gelişmemiş ve gelişmekte olan ülkelerde birçok hanenin internet bağlantısı bulunmamaktadır. Genellikle dijital uçurum olarak isimlendirilen bu olgu, sosyoekonomik, coğrafi, gelir gibi birçok parametreye bağlıdır. Bu kapsamda, dijital uçurumun makine öğrenmesi yöntemleriyle analiz edildiği çalışmalarda bulunmaktadır. Örneğin Indo-Myanmar bölgesi için internet erişiminin dijital okuryazarlığa etkisi makine öğrenmesi yöntemleri ile incelenmiştir [1]. Çalışmada, Indo-Myanmar bölgesinde 342 katılımcıdan toplanan mikro veriler farklı makine öğrenmesi yöntemleri ile analiz edilmiş ve internet erişimi ile dijital okuryazarlığın birbirini desteklediği gözlemlenmiştir. Nepal'de bulunan 15000 haneyi içeren bir veri seti üzerinden dijital eşitsizliği incelemek için Rastgele Orman modeli kullanılmıştır [2]. Dijital eşitsizliğin hane düzeyinde bilgi ve iletişim teknolojilerine erişim olarak değerlendirilen bu çalışmada, elde edilen sonuçlara göre bilgi ve iletişim teknolojilerine erişimin en güçlü belirleyicileri olarak zenginlik ve eğitim düzeyi olduğu ortaya çıkmıştır. Kore'de yaşlı bireylerin dijital uçurum durumunu incelemek için makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmıştır [3]. Dijital uçurumu belirlemede en önemli değişkenlerin, yaş, eğitim, internet kullanım düzeyi, dijital teknolojileri öğrenme konusundaki eğilim ve çevrimiçi sosyal bağlılık olduğu görülmüştür. Dijital uçurum literatürüne ek olarak, internet erişiminin sonuç değişkenleri üzerindeki etkisini inceleyen çalışmalar da mevcuttur. Covid-19 pandemisi öncesi ve sonrasında hanelerin internet kullanım talebindeki değişimi ve bu talebin etkili parametreleri analiz edilmiştir [4]. Parametrelerin tamamı anlamlı olsa da özellikle hane geliri ve hane büyüklüğünün internet kullanım olasılığını artırdığı, yaş parametresinin yüksek olmasının kullanım olasılığını azalttığı gözlemlenmiştir. İnternet erişim olasılığı düşük olan bireylerin, internet erişimi ve kullanımından elde edilen bilgi kazanımının fayda sağladığı gözlemlenmiştir [5].

İnternet erişimiyle ilgili faktörleri araştırmak için geleneksel istatistiksel yaklaşımlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar yorumlanabilir olsa da, genellikle karmaşık, doğrusal olmayan yapıları ve yüksek boyutlu veri kümelerini ele almada sınırlıdır. Buna karşılık makine öğrenmesi, bu tür karmaşıklıkları modellemek ve verilerdeki karmaşık ilişkileri ortaya çıkarmak için güçlü araçlar sunar. Karmaşıklık dışında farklı alanlarda da aktif olarak kullanılmaktadır [6,7]. Ancak makine öğrenmesi araçları, kara kutu gibi çalıştıkları için yüksek doğruluk sağlasa da yapılan tahminlerin neden yapıldığı konusunda belirsizlik öne çıkmaktadır. Bu belirsizlik özellikle yorumlanabilirliğin önemli olduğu konular için bir engeldir.

Yorumlanabilirlik ve tahmin gücü arasındaki bu boşluğu kapatmak için AYZ alanı ortaya çıkmıştır. AYZ, makine öğrenmesi modellerini performanslarından ödün vermeden belirsizlikleri kaldırmak için farklı yöntem ve araçlar sunmaktadır. Bu sayede kullanıcılar için birçok şey daha anlaşılır hale gelecektir. Finansal risk yönetimi için yapay zekâ, doğal dil işleme ve AYZ birleştirilmiştir [8]. Siber zorbalık içeren yorumları belirlemek için önerilen modelin yorumlanabilmesi için AYZ kullanılmıştır [9]. Parkinson hastalarındaki bilişsel gerilemeye etki eden bilişsel ve bilişsel olmayan değişkenler tahmin edilmiştir [10]. Bilişsel gerilemeyi en çok etki eden değişkenleri anlamak için AYZ kullanılmıştır. Perioperatif majör istenmeyen kardiyovasküler olayları tahmin etmek için yorumlanabilir bir makine öğrenmesi modeli geliştirilmiştir [11]. Her bir değişkenin modelin tahminlerine katkısını ölçmek için AYZ kullanılmıştır. Eski konutlarda enerji kullanımını tahmin etmek için enerji simülasyonu ve makine öğrenmesini entegre eden yeni bir yaklaşım önerilmiştir [12]. Enerji tüketimindeki en etkili değişkenleri belirlemek için AYZ kullanılmıştır. İran genelinde, yüzey toprak neminin mekânsal etkenlerini ortaya çıkarmak için AYZ kullanmıştır [13]. Lityum iyon pillerinin ömürlerini uzatmak için doğru şarj durumunu tahmin etmek için içerisinde AYZ'nin de bulunduğu makine öğrenmesine dayalı yeni bir yöntem önerilmiştir [14]. Bu araçlar arasında SHAP ve LIME, model tahminlerini, hem model genelinde hem de yerel düzeyde açıklayabilmesiyle oldukça yaygın kullanılmaktadır. SHAP değerleri, işbirlikçi oyun teorisine dayalı olarak her bir özelliğe katkı puanları sunarken, LIME, belirli gözlemler etrafında orijinal modelin karar sınırını, yaklaşık olarak belirlemek için yerel vekil modeller oluşturmaktadır.

Mevcut çalışmalar dijital uçurumu çoğunlukla belirli alt gruplar üzerinden ele almaktadır. İnternet erişimini ya dolaylı bir değişken olarak kullanmakta ya da dijital beceri, çevrimiçi öğrenme talebi veya çevresel bilgi düzeyi gibi farklı sonuç değişkenlerine odaklanmaktadır. Buna karşın Türkiye özelinde, resmi büyük ölçekli HBTKA verilerini kullanarak hane internet erişiminin doğrudan bağımlı değişken olarak

sınıflandırıldığı, birden fazla makine öğrenmesi algoritması ile analiz edilerek karşılaştırıldığı ve model kararlarının SHAP ve LIME gibi AYZ araçları ile ayrıntılı olarak açıklandığı bir çalışmaya rastlanmamaktadır. Literatürdeki bu eksiklik, hem dijital uçurumun ülke düzeyinde kanıta dayalı biçimde ortaya konmasını hem de politika yapıcılar için hangi parametrelerin kritik öneme sahip olduğunun şeffaf bir şekilde belirlenmesini zorlaştırmaktadır.

Bu çalışmada, söz konusu boşluğu doldurmak için, büyük veri olarak değerlendirilen, TÜİK tarafından toplanan HBTKA veri seti üzerinden hane halkı düzeyinde internet erişiminin temel belirleyicilerini bulmak ve bu belirleyicileri şeffaf bir şekilde açıklamak için makine öğrenmesi ve AYZ kullanılmıştır. Tahminleme yapmak için Rastgele Orman, XGBoost, LightGBM, CatBoost ve Lojistik Regresyon, açıklanabilirliği için SHAP ve LIME kullanılmıştır.

2. YÖNTEM

Bu bölümde, hanehalkı internet erişimini analiz etmek için kullanılan veri seti, makine öğrenimi yöntemleri ve modelden bağımsız açıklanabilirlik için kullanılan yöntemler özetlenmiştir.

2.1. Veri Seti ve Ön İşleme

Bu çalışmada kullanılan veri seti 519207 talep numarasına istinaden TÜİK tarafından sağlanmıştır [15]. Veri seti, 12159 haneye ait, teknolojik cihazların sahipliği, hane halkı gelir durumları, internet erişim, bölgesel tanımlayıcılar ve hedef değişken olan internet erişimi gibi parametreleri içermektedir. Çizelge 1'de veri kümesinde bulunan parametreler ve açıklamaları gösterilmiştir.

Çizelge 1. HBTKA veri setinin parametreleri ve parametre açıklamaları

Parametreler	Açıklamalar
BT_BILG_MASAUSTU	Hanede masaüstü bilgisayar var mı?
BT_BILG_DIZUSTU	Hanede dizüstü bilgisayar var m?
BT_TABLET	Hanede tablet var mı?
BT_TEL_CEP	Hanede cep telefonu var mı?
BT_AKILLITV	Hanede akıllı televizyon var mı?
BT_AKILLISAAT	Hanede akıllı saat var mı?
BT_OYUNKONSOL	Hanede oyun konsolu var mı?
BT_DIGER_CIHAZ	Hanede diğer internet kullanılan cihazlar var mı?
HANE_AYLIK_GELİR_GRP_5	Hanenin aylık toplam net geliri nedir?
HHB	Hanede bulunan kişi sayısı kaçtır?
IBBS_1	İstatistiki bölge birimlerinin sınıflandırılması
HANE_FAKTOR	Ağırlık katsayısı
HANE_INTERNET_ERISIM_DURUMU	Hanenin internet erişim durumu nedir?
REFERANS_YIL	Anketin uygulandığı yıl
BULTEN_NO	Rastgele üretilmiş hane ve fert soru formuna ilişkin anahtar

Veri seti üzerinden yapılacak eğitimlerden önce veri setine ön bir işlem uygulanmıştır. Başlangıçta hedef değişken olan "HANE_INTERNET_ERISIM_DURUMU" parametresinin değerleri incelendiğinde, "erişim var", "erişim yok" ve "bilinmiyor" olmak üzere üç farklı kategori içerdiği belirlenmiştir. Bu değişkende yalnızca 9 gözlem "bilinmiyor" kategorisinde yer aldığından, ikili sınıflandırma yapısını korumak ve belirsiz etiketli örneklerin modele dâhil edilmesini önlemek amacıyla söz konusu gözlemler veri setinden çıkarılmıştır. Böylece analizler toplam 12150 gözlem üzerinden yürütülmüştür. Ayrıca, modelleme sürecine doğrudan katkı sağlamayan ve yalnızca zaman ile anahtar bilgisi içeren "REFERANS_YIL" ve "BULTEN_NO" değişkenleri veri setinden çıkarılmıştır. Hanede masaüstü bilgisayar, dizüstü bilgisayar, tablet, cep telefonu, akıllı televizyon, akıllı saat, oyun konsolu ve diğer dijital cihazların varlığını gösteren "BT_BILG_MASAUSTU", "BT_BILG_DIZUSTU", "BT_TABLET", "BT_TEL_CEP", "BT_AKILLITV", "BT_AKILLISAAT", "BT_OYUNKONSOL" ve "BT_DIGER_CIHAZ" değişkenleri, ham veri setinde "1 = var" ve "2 = yok" biçiminde kodlanmışken, bu çalışma kapsamında ikili gösterime dönüştürülerek "1 = var" ve "0 = yok" şeklinde yeniden kodlanmıştır. İstatistiki Bölge Birimleri Sınıflandırmasını temsil eden "IBBS_1" değişkeni ise makine öğrenmesi modellerine uygunluk sağlamak amacıyla tekil gösterge (one-hot encoding) yöntemi kullanılarak yeni

sütunlara ayrılmış; ilgili hanenin bulunduğu bölge için değer "1", diğer bölgeler için "0" olarak atanmıştır. Bu ön işlemler sonucunda analize hazır nihai veri kümesi oluşturulmuş ve veri seti, modelleme aşamasında rastgele olarak %80 eğitim ve %20 test alt kümelerine ayrılmıştır.

2.2. Makine Öğrenmesi Modelleri

İnternet erişim durumunu modellemek için hem açıklanabilir modellerle uyumlu olması hem de güçlü modeller olması nedeniyle Rastgele Orman, XGBoost, LightGBM, CatBoost ve Lojistik Regresyon modelleri seçilmiştir.

2.2.1. Rastgele Orman

Rastgele orman, hem sınıflandırıcı hem de regresyon için kullanılan bir topluluk öğrenme yöntemidir [16,17]. Önyükleme ve paketleme olarak isimlendirilen bir işlemle birlikle birden fazla karar ağacı oluşturarak çalışır. Karar ağaçları, rastgele örnekleme yoluyla oluşturulur ve ağaçtaki her düğümde, rastgele seçilen özellik alt kümleri tekrar bölünür. Bu rastgelelik, ağaçlar arasındaki çeşitliliği artırırken aralarındaki ilişkiyi azaltır. Bu sayede ormanın genel performansı artmış olur. Rastgele Orman için oluşturulan karar ağaçları topluluğunun matematiksel modeli Eşitlik (1)'deki gibi ifade edilebilir.

$$T_1(x), T_1(x), \dots, T_B(x) \tag{1}$$

Regresyon uygulamasında ise tek tek ağaçların tahminlerinin ortalamasına göre belirlenir ve Eşitlik (2)'de gösterilmiştir:

$$\hat{\gamma} = \frac{1}{B}\sum_{i=1}^{B} T_i(x) \tag{2}$$

Burada $\hat{\gamma}$, bir gözlem vektörü x için Rastgele Orman modelinin nihai tahminini göstermektedir. $T_i(x)$ değeri, x girdisi için i'inci ağacın tahminini gösterir. B, ormandaki toplam ağaç sayısıdır. Sınıflandırmanın gerekli olduğu durumlarda, sınıf tahmini ağaçlar arasındaki çoğunluk oya göre belirlenir. Rastgele Ormanın temel avantajlarından bir tanesi de yüksek boyutlu verileri ve büyük veri kümelerini etkili bir şekilde işleyebilmesidir. Esnekliği sayesinde hiperparametre ayarlarına karşı yüksek toleransa sahip olması, kullanım kolaylığı ve fazla ayar gerektirmemesi gibi nedenlerden dolayı birçok makine öğrenimi probleminde oldukça fazla kullanılmaktadır.

2.2.2. XGBoost

XGBoost, Gradient Boosting Machine (GBM) algoritmasının farklı düzenlemeler ile optimize edilerek oluşturulan güçlü bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır. Yüksek tahmin gücü, gereksiz verileri düzeltebilmesi, hızlı işlem yapabilmesi gibi yeteneklere sahip olması nedeniyle diğer yöntemlerden ayrışabilmektedir. İlk kez kullanıldığı çalışmada döneminin popüler yöntemlerinden 10 kat daha hızlı çalıştığı gözlemlenmiştir [18]. XGBoost matematiksel olarak modellendiğinde Eşitlik (3)'deki gibidir.

$$f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x) \tag{3}$$

Burada $f_k(x)$, x girdisi için k'ıncı karar ağacının çıktısıdır ve her f_k bir karar ağacıdır.

XGBoost modelinin toplam tahmini Eşitlik (4):

$$\hat{\gamma}_i = \sum_{k=1}^{K} f_k(x_i), \quad f_k \epsilon\ F \tag{4}$$

Burada $\hat{\gamma}_i$, x_i özellik vektörüne sahip i. gözlem için modelin toplam tahminini göstermektedir. $f_k(x)$, x girdisi için k'ıncı karar ağacının çıktısıdır ve her f_k bir karar ağacıdır. K, modelde yer alan toplam ağaç sayısını gösterirken F ise tüm karar ağaçlarının ait olduğu karar ağaçları kümesini ifade eder.
XGBoost kayıp fonksiyonu Eşitlik (5)'deki gibidir.

$$Obj = \sum_{i=1}^{n} l(y_i, \hat{\gamma}_i) + \sum_{k=1}^{K} \Omega(f_k) \tag{5}$$

Burada $l(y_i, \hat{y}_i)$: Gerçek değer y_i ile model tahmini $\hat{y}_i$ arasındaki kayıp fonksiyonudur. $\Omega(f_k)$ ise k'ıncı ağacın karmaşıklığını ve düzenliliğini ölçen ceza fonksiyonudur. n' toplam gözlem sayısını ifade eder. Yeni ağaç ekleme Eşitlik (6)'da verilmiştir.

$$\hat{y}_i^{\,t} = \hat{y}_i^{\,t-1} + f_t(x_i) \tag{6}$$

Burada her adımda güncellenen model verilmektedir. $\hat{y}_i^{\,t}$, t. iterasyon sonunda, x_i gözlemi için modelin güncel tahmini gösterirken, $\hat{y}_i^{\,t-1}$, bir önceki iterasyondaki tahmini ifade eder. f_t, t. iterasyonda eklenen yeni karar ağacını ve $f_t(x_i)$ bu ağacın x_i üzerindeki katkısını göstermektedir.

Büyük veri setlerinde çalışmak için optimize edilen XGBoost, Rastgele Orman'dan farklı olarak hem sapmayı hem de varyansı en aza indirmek için ağaçları sıralı olarak oluşturur. Optimizasyon içinse ikinci dereceden Taylor yaklaşımını kullanır. Aşırı öğrenmeyi engellemek ve modelin performansını artırmak için ağaç budama, sütun örnekleme ve L1/L2 düzenlemesi gibi teknikleri kullanmaktadır. XGBoost, bu çalışmada kullanıldığı gibi yapılandırılmıştır ve tablo veri setleri için oldukça uygundur.

2.2.3. LightGBM

Microsoft tarafından geliştirilen LightGBM, makine öğrenmesi teknikleri ile gösterdiği başarıları sayesinde veri bilimi ve uzaktan algılama araştırmacılarının dikkatini çekmiştir [19,20]. LightGBM, eğitimleri hızlandırmak ve bellek kullanımlarını azaltmak için histogram tabanlı bir gradyan artırma çerçevesidir. Karar ağaçlarında ki seviyesel büyümenin aksine, ağaçları yaprak bazlı büyüterek daha düşük kayıp ve daha hızlı yakınsama sağlamaktadır. Yaprak tabanlı büyüme Eşitlik (7)'de verilmiştir.

$$Gain = \frac{1}{2}\left(\frac{G_L^2}{H_L+\lambda} + \frac{G_R^2}{H_R+\lambda} - \frac{(G_L+G_R)^2}{H_L+H_R+\lambda}\right) - \gamma \tag{7}$$

Burada, G_L ve G_R sol ve sağ dalların toplam gradientini temsil ederken H_L ve H_R toplam hessianı temsil etmektedir. λ, L2 regularizasyonu γ, ceza parametresidir.

Büyük veri setlerini işleme verimliliğini artıran gradyan tabanlı tek taraflı örnekleme ve ayrıcalıklı öznitelik destekleme gibi yenilikler sunmaktadır. Gradyan tabanlı tek taraflı örnekleme sayesinde verinin tamamını ele almadan veriden ürettiği alt veri kümesini kullanır. Ayrıcalıklı öznitelik destekleme ile seyrek öznitelikleri yoğun özniteliklere dönüştürerek işlem karmaşıklığını azaltır [19-21].

2.2.4. CatBoost

CatBoost, kategorik özellikleri işlemek için özel olarak tasarlanmış bir gradyan güçlendirme algoritmasıdır. Doğruluğu ve hesaplama verimliliğini artıran sıralı güçlendirme ve habersiz karar ağaçlarını kullanır. Ardışık bir şekilde ağaçları birleştirerek, bir önceki ağacın hatalarını gidererek modelin hata oranını azaltır ve performans artışına neden olmaktadır [22]. Kategorik özelliklerin işlenmesi Eşitlik (8)'deki gibidir.

$$Encoded(x_{i,j}) = \frac{\sum_{k<i}[x_{k,j} = x_{i,j}] \,.\, y_k + a \,.\, p}{\sum_{k<i}[x_{k,j} = x_{i,j}] + a} \tag{8}$$

Burada, $x_{i,j}$ için i. gözlemdeki j. kategorik özelliği temsil ederken y_k hedef değeri temsil etmektedir. $a,\ p$ ise sıfır bölme ve yumuşatma için kullanılan sabitlerdir.

Model, kategorik değişkenleri kodlamak için permütasyon odaklı bir şema kullanarak sızıntıları azaltır. Bu sayede değişkenlerin yoğunlukta olduğu veri setlerinde avantajlıdır. Ek olarak aşırı öğrenme sorunlarına karşı güçlü olması ve daha az hiperparametre ayarı gerektirmesi sebebi ile kullanımı kolaydır [23].

2.2.5. Lojistik Regresyon

Lojistik Regresyon, özellikle sınıflandırma problemleri için yorumlanabilirliğinin güçlü olması nedeniyle temel modellerden bir tanesidir. Girdi özelliklerinin doğrusal kombinasyonuna lojistik sigmoid fonksiyonu uygulayarak sınıf üyeliğinin olasılığını modeller. Olasılık tahmini Eşitlik (9) ve Eşitlik (10)'daki gibi ifade edilebilir.

$$P(y = 1|x) = \sigma(z) = \frac{1}{1+e^{-z}} \quad (9)$$

$$z = B_0 + B_1x_1 + B_2x_2 + \cdots + B_px_p \quad (10)$$

Burada, $P(y = 1|x)$ için x özellikleri verildiğinde $y = 1$ olasılığı ifade edilirken, $\sigma(z)$ sigmoid fonksiyonu, B'ler modelin katsayıları, x'ler bağımsız değişkenler olarak temsil edilir.

Basit bir yapıda olmasına rağmen, özellikler ve hedefin olasılığı arasındaki ilişki doğrusalsa oldukça iyi performans gösterir. Lineer ilişkilere dayalı tahminleri genellikle hızlı yapması ve yorumlanabilir sonuçlar üretmesine rağmen karmaşık verilerde doğruluğu sınırlı kalabilmektedir [24].

2.3. Değerlendirme Metrikleri

Çalışma kapsamında kullanılan makine öğrenmesi modellerinin performansını değerlendirmek için, çeşitli istatistiksel metrikler kullanılmıştır. Bu metrikler, modelin ne kadar doğru ve tutarlı bir şekilde çalıştığını anlamak için kritik öneme sahiptir. Çalışmada kullanılan performans metrikleri kesinlik (precision), duyarlılık (recall), F1-skoru, doğruluk (accuracy) gibi temel ölçütlerdir.

2.3.1. Keskinlik

Keskinlik, modelin pozitif olarak tahmin ettiği durumların, gerçekten de pozitif olanların oranını ölçer. Yüksek bir keskinlik değeri, modelin yanlış pozitif sayısının düşük olduğunu gösterir, yani model, olmayan bir şeyi varmış gibi işaret eder. Eşitlik (11)'de keskinlik hesabı gösterilmiştir.

$$Keskinlik = \frac{TP}{TP+FP} \quad (11)$$

TP, doğru pozitifi yani tahmin edilen değerin doğru olduğunu temsil ederken, FP, yanlış pozitifi temsil eder. Yanlış pozitif ise yanlış tahmin değeridir. Keskinlik metriği, modelin ne kadar "hassas" olduğunu yansıtır. Özellikle, yasaklı faaliyetlerin tespiti gibi kritik uygulamalarda yüksek keskinlik, önemsiz hatalardan kaçınmak için önemlidir.

2.3.2. Duyarlılık

Duyarlılık, gerçekte pozitif olan örneklerin ne kadarının model tarafından doğru olarak pozitif olarak işaretlendiğini ölçer. Yüksek bir duyarlılık değeri, modelin gerçek pozitifleri kaçırmadığını, yani az sayıda yanlış negatif hata yaptığını gösterir. Eşitlik (12)'de duyarlılık hesabı gösterilmiştir.

$$Duyarlılık = \frac{TP}{TP+FN} \quad (12)$$

2'de TP, doğru pozitifi belirtirken FN, yanlış negatifi gösterir.

2.3.3. F1-Skoru

F1-skoru, keskinlik ve duyarlılığın harmonik ortalamasıdır ve iki metriği dengeli bir şekilde birleştirir. Bu metrik, özellikle veri seti dengesiz olduğunda yani bir sınıf diğerlerinden çok daha az ya da çok daha fazla örneğe sahip olduğunda modelin genel performansını değerlendirmek için kullanılır. Eşitlik (13)'te F1-skor hesabı gösterilmiştir.

$$F_1 - skor = 2\ x\ \frac{Precision\ x\ Recall}{Precision + Recall} \quad (13)$$

F1-skoru, her iki metriği eşit ağırlıkta hesaba katarak, modelin genel doğruluk ve güvenilirlik dengesini sunar.

2.3.4. Doğruluk

Doğruluk, modelin doğru olarak sınıflandırdığı örneklerin, toplam örnek sayısına oranıdır ve Eşitlik (14)'te gösterilmiştir.

$$Doğruluk = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (14)$$

Modelin genel başarısını ölçen bir metriktir.

2.4. Açıklanabilir Yapay Zekâ Teknikleri

İnternet erişim durumunun analizi için kullanılan makine öğrenmesi yöntemleri güçlü tahminler yapsa da kara kutu gibi davranmasından dolayı yorumlanabilirliği zordur. Bu nedenle, bu çalışmada internet erişim durumunu etkileyen faktörlerin tahmin gerekçelerini anlayabilmek için SHAP ve LIME AYZ araçları kullanılmıştır.

2.4.1. SHapley Additive exPlanations

SHAP, her bir özelliğe, tüm olası özellik alt kümelerindeki katkıya bağlı olarak bir önem değeri atayarak tahminleri yorumlayan ve işbirlikçi oyun teorisine dayanan bir AYZ yöntemidir. Bu yöntem, doğruluk, tutarlılık, esneklik ve eksiklik gibi temel teorik özellikleri karşılamaktadır. Bu sayede, modelin hangi değişkene ne kadar dikkat ettiği bilinebilmekte ve tahmin süreçleri daha anlamlı ve daha açıklanabilir hale gelmektedir [25]. Ayrıca yerel ve küresel açıklamalarda kullanılabilmektedir.

2.4.2. Local Interpretable Model-Agnostic Explanations

LIME, literatürdeki birçok makine öğrenmesi yöntemleri ile çalışabilen ve model tahminlerini yorumlayarak modelin açıklanabilmesini sağlayan görsel bir tekniktir [26]. Temel olarak, açıklanmak istenen örneğin etrafında rastgele örnekler üretir ve bu örnekleri orijinal modele sunarak tahminler alır. Daha sonra bu yerel veri üzerinde basit ve yorumlanabilir açıklamalar üretir. Bu sayede, modelin kararında, hangi özelliklerin ne ölçüde etkili olduğu anlaşılır bir hale gelir. Önemli avantajlarından bir tanesi modelden bağımsız olarak çalışabilmesidir. Hem doğrusal hem de doğrusal olmayan sınıflandırma veya regresyon fark etmeksizin tüm modeller için uygulanabilir.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde, çalışma kapsamında kullanılan Rastgele Orman, LightGBM, Lojistik Regresyon, CatBoost ve XGBoost makine öğrenmesi yöntemleri ile sınıflandırma performansları, SHAP ve LIME ile açıklanabilirlik analizleri ve örnek veri noktaları üzerindeki çıkarımları detaylı bir şekilde sunulmuştur. Bulgular, yalnızca model tabanlı verilmemiş, görsel analizlerle desteklenmiştir.

3.1. Sınıflandırma Modellerinin Performans Karşılaştırılması

Çalışma kapsamında kullanılan Rastgele Orman, LightGBM, Lojistik Regresyon, CatBoost ve XGBoost sınıflandırma modelleri, veri setinin %80 eğitim %20 test bölünmesi ile değerlendirilmiştir. Her model için doğruluk, f1-skoru, keskinlik ve duyarlılık performans metrikleri elde edilmiştir. Çizelge 2'de bu sonuçlar gösterilmiştir.

Çizelge 2. Makine öğrenmesi sınıflandırma modellerinin performans karşılaştırması

Model	Sınıf	Keskinlik	Duyarlılık	F1-Skor	Doğruluk	ROC-AUC
Rastgele Orman	1	0.99	0.82	0.90	0.82	0.936 ± 0.009
	0	0.21	0.91	0.34		
XGBoost	1	0.99	0.82	0.90	0.82	0.936 ± 0.011
	0	0.20	0.89	0.33		
LightGBM	1	0.99	0.81	0.89	0.82	0.932 ± 0.010
	0	0.20	0.91	0.33		
CatBoost	1	0.99	0.81	0.89	0.82	0.934 ± 0.010
	0	0.20	0.91	0.33		
Lojistik Regresyon	1	0.99	0.80	0.89	0.81	0.936 ± 0.011
	0	0.19	0.80	0.89		

Her model için her iki sınıf içinde, Sınıf 1 internet erişimi olan haneleri Sınıf 0 internet erişimi olmayan haneleri, doğruluk, f1-skoru, keskinlik ve duyarlılık değerleri ayrı ayrı verilmiştir. Tüm modellerin genel doğruluk oranları %81-82 arasındadır. Sınıf 1 için keskinlik ve duyarlılık değerleri yüksek olsa da Sınıf 0 için keskinlik değeri düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, Sınıf 0'a ait gözlemler üzerine yapılan tahminlerde modellerin yeterince hassas olmadığına işaret etmektedir. Ancak, Sınıf 0 gözlemlerinin çoğu doğru şekilde sınıflandırılabilmiştir. Bu düşük keskinlik, veri setindeki dengesizliği ve internet erişimi olan hanelerin sayısının fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Sınıf dengesizliklerinin modellenmesi için gelecekte SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique) gibi veri artırma yöntemlerinin veya sınıf ağırlıklarının yeniden düzenlenmesi gibi stratejilerin kullanılması faydalı olabilir. Çizelge 2 genel olarak incelendiğinde, modellerin performans metrik değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Bu nedenle aşırı öğrenme riski ayrıca incelenmiştir. Aşırı öğrenme eğilimi, 5 katlı katmanlı çapraz doğrulama ile eğitim ve test kümeleri üzerindeki performans farkları incelenerek kontrol edilmiştir. Bu kapsamda, özellikle dengesiz sınıflar için ayırt ediciliği ile öne çıkan ROC (Receiver Operating Characteristic) – AUC (Area Under the Curve) değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan ROC–AUC değerlerinin tamamı 0.93'ün üzerinde olduğu görülmüştür. Rastgele Orman, Lojistik Regresyon ve XGBoost 0.936 ile en yüksek ayırt ediciliğe ulaşırken, CatBoost ve LightGBM yalnızca çok küçük bir farkla geride kalmıştır. Ek olarak, PR (Precision–Recall) – AUC, F1-macro (Macro-averaged F1 Score) ve Dengeli Doğruluk (Balanced Accuracy) metrikleri de eğitim ve test kümeleri üzerinde değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, bu metriklerdeki farkların %1–%5 aralığında olduğu görülmüştür. Sonuçlar belirgin bir aşırı öğrenme olmadığını göstermiştir. Sonuçların birbirine yakın çıkma sebebi olarak veri setinde, internet erişimi olan hanelerin olmayan hanelere göre sayısının fazla olması öngörülmektedir.

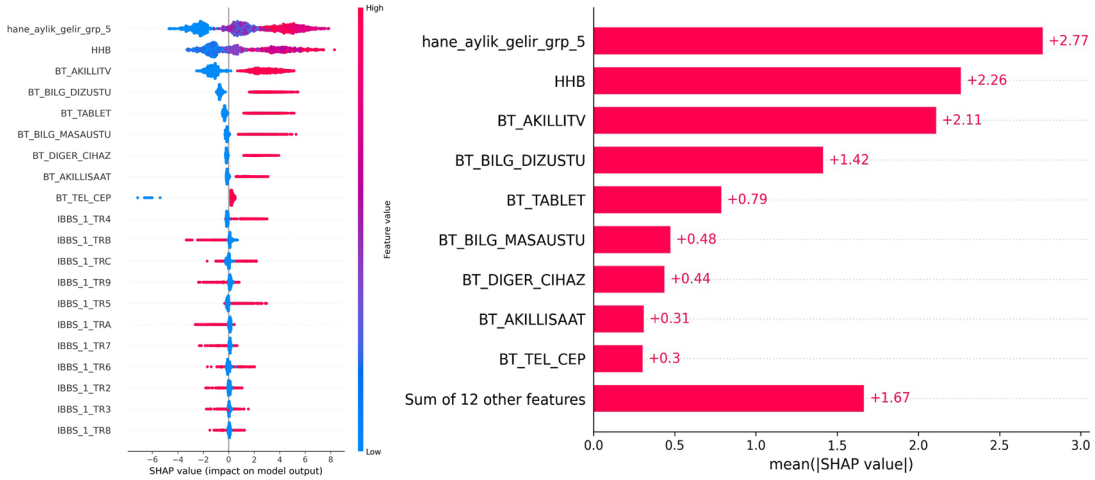
3.2. SHAP Tabanlı Özellik Etki Analizi

Çalışma kapsamında kullanılan Rastgele Orman, XGBoost, LightGBM, CatBoost ve Lojistik Regresyon gibi makine öğrenmesi modellerinin karar verme mekanizmalarını açıklayabilmek amacıyla bu çalışmada AYZ tekniklerinden biri olan SHAP yöntemi kullanılmıştır. SHAP ile kara kutu olarak görülen makine öğrenmesi modellerinin tahminlerinde hangi bağımsız değişkenlerin ne kadar etkili olduğu belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan Rastgele Orman, XGBoost, LightGBM, CatBoost ve Lojistik Regresyon olmak üzere beş farklı makine öğrenmesi modeli için SHAP temelli özellik etki analizi gerçekleştirilmiştir. Her bir model için en etkili 10 değişken belirlenmiş ve Çizelge 3'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Çizelge 3. Model temelli ilk 10 önemli değişkenin SHAP değerleri

Model	İlk 10 Değişken: SHAP değeri	
CatBoost	1. HANE_AYLIK_GELİR_GRP_5: **2.77** 2. HHB: **2.26** 3. BT_AKILLITV: **2.11** 4. BT_BILG_DIZUSTU: **1.42** 5. BT_TABLET: **0.79**	6. BT_BILG_MASAUSTU: **0.48** 7. BT_DIGER_CIHAZ: **0.44** 8. BT_AKILLISAAT: **0.31** 9. BT_TEL_CEP: **0.30** 10. IBBS_1_TR4: **0.23**
LightGBM	1. HANE_AYLIK_GELİR_GRP_5: **2,46** 2. HHB: **2,06** 3. BT_AKILLITV: **1,71** 4. BT_BILG_DIZUSTU: **1,47** 5. BT_TABLET: **0,73**	6. BT_BILG_MASAUSTU: **0,46** 7. BT_DIGER_CIHAZ: **0,42** 8. IBBS_1_TR5: **0,32** 9. BT_AKILLISAAT: **0,29** 10. IBBS_1_TR4: **0,26**
Lojistik Reg.	1. BT_BILG_DIZUSTU: **1,85** 2. BT_TABLET: **1,34** 3. BT_AKILLITV: **0,98** 4. BT_BILG_MASAUSTU: **0,96** 5. HHB: **0,88**	6. HANE_AYLIK_GELİR_GRP_5: **0,87** 7. BT_DIGER_CIHAZ: **0,79** 8. BT_AKILLISAAT: **0,63** 9. IBBS_1_TR2: **0,26** 10. IBBS_1_TR7: **0,24**
Rastgele Orman	1. HANE_AYLIK_GELİR_GRP_5: **0,13** 2. BT_AKILLITV: **0,12** 3. HHB: **0,11** 4. BT_BILG_DIZUSTU: **0,07** 5. BT_TABLET: **0,04**	6. BT_BILG_MASAUSTU: **0,02** 7. BT_AKILLISAAT: **0,02** 8. BT_DIGER_CIHAZ: **0,02** 9. BT_TEL_CEP: **0,01** 10. IBBS_1_TR5: **0,01**
XGBoost	1. HANE_AYLIK_GELİR_GRP_5: **1,49** 2. BT_AKILLITV: **1,01** 3. HHB: **0,99** 4. BT_BILG_DIZUSTU: **0,8** 5. BT_TABLET: **0,36**	6. IBBS_1_TR9: **0,24** 7. IBBS_1_TRB: **0,24** 8. BT_BILG_MASAUSTU: **0,21** 9. IBBS_1_TRA: **0,18** 10. IBBS_1_TR7: **0,17**

Çizelge 3 incelendiğinde, farklı modeller olmalarına rağmen belirleyici değişkenlerin büyük oranda örtüştüğü görülmektedir. Özellikle "HANE_AYLIK_GELİR_GRP_5" değişkeninin, Lojistik Regresyon modelinin dışında kalan tüm modellerde SHAP değeri en yüksek olduğu görülmüş ve hanehalkı internet erişim durumunu belirleyen en etkili faktör olduğu belirlenmiştir. Bu değişken, beş gelir grubunu temsil etmektedir. 1. ve 2. gelir grupları daha düşük, 4. ve 5. gelir grupları ise daha yüksek aylık gelir düzeylerini ifade etmektedir. Lojistik Regresyon modelinde ise en önemli değişkenin "BT_BILG_DIZUSTU" olarak öne çıktığı görülmüştür. Bu durumun, Lojistik Regresyon'un doğrusal ve parametre-temelli yapısı nedeniyle, hedef değişkenle güçlü ve doğrudan doğrusal ilişki gösteren değişkenlere daha yüksek ağırlık atamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, hane geliri ile dizüstü bilgisayar sahipliği arasındaki güçlü ilişki, gelir etkisinin bu modelde dolaylı olarak "BT_BILG_DIZUSTU" değişkeni üzerinden temsil edilmesine yol açmış olabilir. Bununla birlikte, "HANE_AYLIK_GELİR_GRP_5" değişkeni Lojistik Regresyon modelinde de üst sıralarda yer almakta ve gelir düzeyinin tüm modellerde tutarlı biçimde kritik bir belirleyici olduğunu göstermektedir. Bu durumu sırasıyla hane büyüklüğünü temsil eden "HHB" ve dijital cihaz sahipliği ile ilgili olan "BT_AKILLITV", "BT_BILG_DIZUSTU", "BT_TABLET", "BT_BILG_MASAUSTU" değişkenleri takip etmektedir. Tüm modellerde ekonomik ve teknolojik cihaz sahipliğinin ön planda olması, internet erişim durumunun bu parametrelerle güçlü bir ilişki içerisinde olduğunu göstermektedir. Ayrıca, "IBBS_1_TR4", "IBBS_1_TR5" gibi bölgesel değişkenlerin de ilk 10 arasında yer aldığı görülse de SHAP değerlerinin diğer değişkenlere göre nispeten düşük kaldığı görülmüştür. Örnek olarak Şekil 1'de CatBoost modeli için değişkenlerin etkileri verilmiştir.

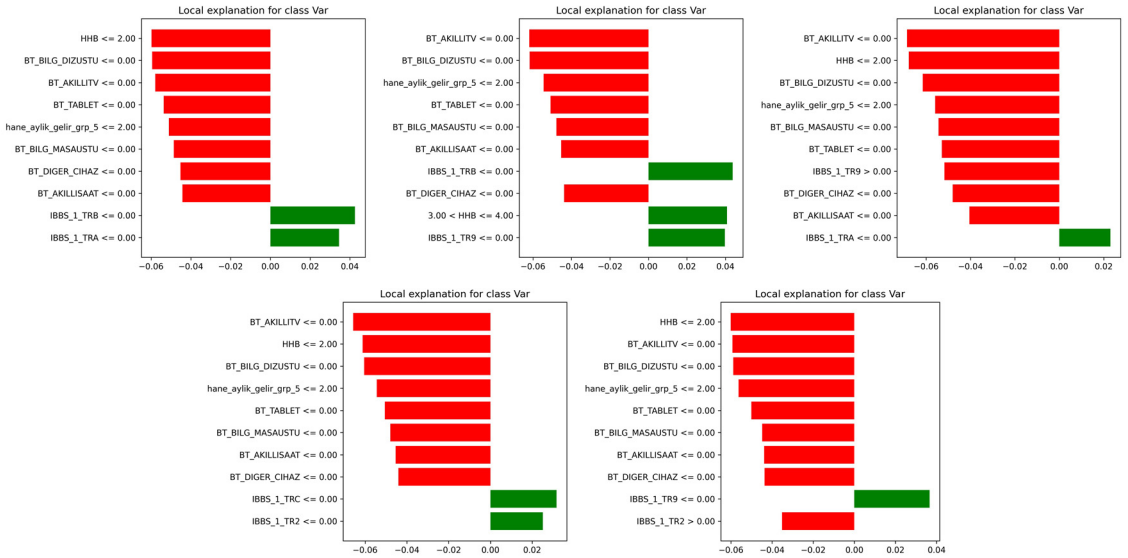


Şekil 1. CatBoost modeli için değişkenlerin SHAP grafikleri

Şekil 1 incelendiğinde hem değişkenlerin genel olarak model üzerindeki etkisi hem de her bir gözlem için bu etkilerin dağılımı ayrıntılı bir şekilde göstermektedir. Bar grafiği incelediğinde, CatBoost modeli için "HANE_AYLIK_GELİR_GRP_5" değişkeninin hane internet durumu tahmininde en yüksek etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bunu sırasıyla "HHB" ve "BT_AKILLITV" gibi dijital cihaz sahipliklerine ait değişkenler takip etmektedir. Bu değişkenlere göre kalan değişkenliklerin etkileri daha azdır. Değişken etki özeti grafiği incelendiğinde sadece değişkenlerin SHAP değerlerini değil, aynı zamanda bu değişkenlerin gözlemler üzerindeki olumlu veya olumsuz olarak ne kadar değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Özellikle "HANE_AYLIK_GELİR_GRP_5" parametresine bakıldığında, yüksek gelire sahip hanelerde SHAP değerlerinin pozitif olduğu ve modelin bu gözlemleri hanenin internet erişim olasılığını yüksek olarak tahmin ettiği görülmektedir. Benzer şekilde "HBB", "BT_AKILLITV", "BT_BILG_DIZUSTU" gibi parametrelere bakıldığında bu değişkenlerin model tahmininde olumlu katkı sağladığı görülmektedir. Her iki grafik birlikte değerlendirildiğinde, hanehalkı internet erişim durumunun, ekonomik, hanehalkı birey sayısı ve teknolojik aletlere sahipliğin merkez parametreler olduğu görülmüştür.

3.3. LIME ile Yerel Açıklama Analizi

Bu çalışmada kullanılan makine öğrenmesi modelleri ile elde edilen tahminlerin nasıl şekillendiğini değerlendirmek için kullanılan bir diğer AYZ tekniği olan LIME kullanılmıştır. LIME, her bir gözlem için modelin kararını hangi değişkenlerin nasıl etkilediğini görselleştirir. Bu kapsamda, CatBoost modeli için veri seti içinden rastgele seçilen beş farklı hane için yapılan LIME analizleri Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. CatBoost modeli için seçilen beş farklı hanede LIME ile elde edilen yerel açıklama grafiği

Şekil 2 incelendiğinde kırmızı çubukların ilgili gözlemde değişkenin aldığı değerlerin modelin hanehalkı internet erişim durumunu tahminine olumsuz yönde katkı sağladığını, yeşil çubukların ise olumlu yönde katkı sağladığını göstermektedir. Örneğin "HHB <= 2.00" ifadesi kırmızı ile gösterilmiştir. Bu gözlem, hanehalkının 2 kişi veya daha az olmasının, modelin, hanehalkı internet erişim durum tahminini azalttığını belirtmektedir. Bu, insan sayısının az olduğu hanelerde internet erişim durumu olasılığının daha düşük olduğunu, 2 den fazla kişinin bulunduğu hanelerin modelde, tahmini artırıcı etkiye sahip olduğunu belirtir. Benzer şekilde, "HANE_AYLIK_GELİR_GRP_5 <= 2.00" şeklinde gösterilen kırmızı bar, düşük gelire sahip olmanın internet erişimine sahip olma olasılığını düşürdüğünü göstermektedir. "BT_AKILLITV <= 0.00", "BT_BILG_DIZUSTU <= 0.00" gibi değişkenlerin kırmızı olması, akıllı tv veya dizüstü bilgisayar sahibi olmayan hanelerde modelin, olumsuz tahmin ürettiğini, teknolojik cihaz sahipliğinin ise olumlu katkı sağladığını göstermektedir. Genel olarak incelendiğinde, hane büyüklüğü, dijital cihaz sahipliği ve hane aylık geliri değişkenlerinin model tahmininde baskın olduğu görülmüştür. Ek olarak, bazı gözlemlerde bölgesel değişkenlerin tahminler üzerinde anlamlı etkileri olduğu gözlemlenmiştir. Haneler için bu parametrelerin yada katkılarının farklı olması, modelin tahminlerinde bireysel koşulları dikkate aldığını ve esnek bir şekilde farklı değişkenlere ağırlık verdiğini göstermektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, beş farklı makine öğrenmesi yöntemi ve AYZ teknikleri ile hanehalkı bilişim teknolojileri kullanımında internet erişim durumunu etkileyen faktörler kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, CatBoost, XGBoost, LightGBM, Rastgele Orman ve Lojistik Regresyon modelleri yüksek ve birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Özellikle dengesiz sınıf yapısını daha sağlıklı değerlendirebilmek için hesaplanan ROC–AUC değerlerinin tamamının 0.93'ün üzerinde olması, modellerin internet erişimi olan ve olmayan haneleri ayırt etme konusunda güçlü bir sınıflandırma başarısına ulaştığını göstermektedir.

Açıklanabilirlik sonuçları incelendiğinde, hem SHAP ile küresel hem de LIME ile yerel düzeyde hanehalkı internet erişim durumunun en etkili belirleyicisinin, hane gelirini yansıtan "HANE_AYLIK_GELİR_GRP_5" olduğu görülmüştür. Bunu hane büyüklüğünü yansıtan "HHB" ve dijital cihaz sahipliğini temsil eden "BT_AKILLITV", "BT_BILG_DIZUSTU", "BT_TABLET", "BT_BILG_MASAUSTU" gibi değişkenler takip etmektedir. Bu sonuçlar, internet erişiminin yalnızca teknik altyapı meselesi değil, aynı zamanda ekonomik kapasite ve dijital donanım sahipliğiyle yakından ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Bazı modellerde bölgesel değişkenlerin de ilk 10 değişken arasında yer alması, mekânsal farklılıkların tamamen önemsiz olmadığını, ancak gelir ve cihaz sahipliği gibi değişkenlerin gerisinde kaldığını göstermektedir.

Elde edilen bulgular, politika ve uygulama açısından da önemli çıkarımlara sahiptir. Düşük gelir gruplarındaki ve sınırlı dijital cihaz sahipliğine sahip hanelerde internet erişim olasılığının daha düşük olması, destek programlarının bu gruplara öncelik verecek şekilde tasarlanması gerektiğini göstermektedir. Hanehalkı internet erişim oranlarını artırmak için yalnızca altyapı yatırımları değil, aynı zamanda gelir düzeyi düşük hanelere yönelik hedeflenmiş cihaz destekleri ve dijital kapsayıcılığı artırmaya yönelik sosyal programlar planlanabilir. Bu bulgular belirli sınırlılıklar çerçevesinde değerlendirilmelidir. Çalışma yalnızca TÜİK tarafından yayımlanan 2024 yılı HBTKA verisine dayanmaktadır ve bu nedenle sonuçlar tek bir seneye ait durumu yansıtmaktadır. Hedef değişkenin dengesiz dağılımı nedeniyle internet erişimi olmayan haneler için keskinlik değerleri görece düşük kalmıştır. Bu çalışmada sınıf dengesizliğini gidermeye yönelik SMOTE gibi ileri dengeleme yöntemleri yalnızca öneri düzeyinde tartışılmış, ancak uygulanmamıştır. Gelecek çalışmalarda birden fazla yıla ait HBTKA verisinin kullanılmasıyla zaman içindeki değişimin incelenmesi, veri dengeleme tekniklerinin modele entegre edilmesi, dijital uçurumun daha ayrıntılı ve genellenebilir biçimde ortaya konulmasına katkı sağlayabilir. Çalışma, resmi HBTKA veriseti üzerinde gelişmiş makine öğrenmesi ve AYZ yöntemlerinin birlikte kullanılmasının, dijital uçurumun yapısal belirleyicilerini sayısal ve şeffaf bir biçimde ortaya koymak için güçlü ve tekrarlanabilir bir çerçeve sunduğunu da göstermektedir.

5. KAYNAKLAR

1. Lalmuanawma, S., Laltlankimi, H., Bolchhim, L., Lalmalsawma, R., Lalnunthari, Dawngliani, M.S. & Rosangliana, D. (2025). Exploring the digital divide: A statistics and machine learning analysis of internet penetration and IT literacy in the Indo-Myanmar region. *One Village, Collective Perspective: A Collaborative Research Endeavor*, 1-19.
2. Regmi, N. (2023). A random forest-based analysis of household survey data to infer insights on digital inequality. *Iran Journal of Computer Science, 6*(4), 333-344.
3. Park, J.R. & Feng, Y. (2023). Trajectory tracking of changes digital divide prediction factors in the elderly through machine learning. *PloS one, 18*(2), 1-20.
4. Mhlanga, D. & Dunga, H.M. (2023). Demand for internet services before and during the Covid-19 pandemic: what lessons are we learning in South Africa? *International Journal of Research in Business and Social Science, 12*(7), 626-640.
5. Cheng, X. (2023). Estimating heterogeneous effects of internet use on environmental knowledge: Taking population heterogeneity into consideration. *PloS one*, *18*(7), 1-23.
6. Alpsalaz, F., (2025). Detection of imbalance faults in industrial machines by means of frequency-based feature extraction using machine learning and deep learning approaches. *Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40*(3), 581-592.
7. Tolun, Ö.C., Zor, K. ve Tutsoy, Ö. (2025). Akıllı şebekelerde elektrik hırsızlığı tespiti için gelişmiş makine öğrenmesi yöntemlerinin uygulanması. *Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40*(3), 627-641.
8. Hussain, N.Y., Babalola, F.I., Kokogho, E. & Odio, P.E. (2025). A robust model for integrating artificial intelligence into financial risk management: Addressing compliance, accuracy, and scalability issues. *International Journal of Research and Innovation in Social Science, 9*(2), 3651-3668.
9. Checkin, A., Pleshakova, E. & Gataullin, S. (2025). A hybrid KAN-BiLSTM transformer with multi-domain dynamic attention model for cybersecurity. *Technologies, 13*(6), 223.
10. Colautti, L., Casella, M., Robba, M., Marocco, D., Ponticorvo, M., Iannello, P., Antonietti, A., Marra, C. & for the CPP Integrated Parkinson's Database. (2025). Predicting cognitive decline in Parkinson's disease using artificial neural networks: An explainable AI approach. *Brain Sciences, 15*(8), 782.
11. Golubovic, M., Peric, V., Stosic, M., Stojiljkovic, V., Zivic, S., Kamenov, A., Milic, D., Dinic, V., Stojanovic, D. & Lazarevic, M. (2025). Predicting major adverse cardiovascular events after cardiac surgery using combined clinical, laboratory, and echocardiographic parameters: A machine learning approach. *Medicina, 61*(8), 1323.
12. Fan, C., Liu, R. & Liao, Y. (2025). Archetype identification and energy consumption prediction for old residential buildings based on multi-source datasets. *Buildings, 15*(14), 2573.
13. Nikraftar, Z., Parizi, E., Saber, M., Boueshagh, M., Tavakoli, M., Esmaeili Mahmoudabadi, A., Ekradi, M. H., Mbuvha, R. & Hosseini, S.M. (2025). An interpretable machine learning framework for unraveling the dynamics of surface soil moisture drivers. *Remote Sensing, 17*(14), 2505.

14. Hu, P., Li, C. Y. & Lee, C.C. (2025). SOC estimation of lithium-ion batteries utilizing EIS technology with SHAP–ASO–LightGBM. *Batteries, 11*(7), 272.
15. Türkiye İstatistik Kurumu, (2024). *Hanehalkı bilişim teknolojileri kullanım araştırması.* (Özel talep ile elde edilmiştir.)
16. Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning, 45*(1), 5-32.
17. Liaw, A. & Wiener, M. (2002). Classification and regression by randomForest. *R News, 2*(3), 18-22.
18. Chen, T. & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining,* 785-794.
19. Ke, G., Meng, Q., Finley, T., Wang, T., Chen, W., Ma, W., Ye, Q. & Liu, T.Y. (2017). LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree. *In Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS 2017),* 3146-3154.
20. Ustuner, M. & Balik Sanli, F. (2019). Polarimetric target decompositions and light gradient boosting machine for crop classification: A comparative evaluation. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 8*(2), 97.
21. Li, W., Ding, S., Chen, Y., Wang, H. & Yang, S. (2019). Transfer learning-based default prediction model for consumer credit in China. *The Journal of Supercomputing, 75*(2), 862-884.
22. Patrous, Z.S. (2018). Evaluating XGBoost for user classification by using behavioral features extracted from smartphone sensors. *Master's thesis* KTH Royal Institute of Technology, School of Computer Science and Communication, Sweden.
23. Ibrahim, A.A., Ridwan, L.R., Muhammed, M.M., Abdulaziz, R.O. & Saheed, G.A. (2020). Comparison of the catboost classifier with other machine learning methods. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 11*(11), 738-748.
24. Salem A.M., Subhi Al-Batah, M., Alqaraleh, M., Abuashour, A. & Hamadah Bader, A.F. (2023). Early diagnosis of fiabetes: a comparison of machine learning methods. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE), 19*(15), 144-165.
25. Sevimli Deniz, S. (2025). Shap analizi ile sosyal medya bağımlılığı dinamiklerinin açıklanması: temel etkenler ve önleyici stratejiler. *Firat University Journal of Social Sciences, 35*(2), 643-657.
26. Ribeiro, M.T., Singh, S. & Guestrin, C. (2016). Why should I trust you? *Explaining the predictions of any classifier Marco. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD 2016),* 1135-1144.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 1 MART/MARCH 2026

Yüksek Binalarda Burkulması Önlenmiş Çaprazların Kullanımının Sismik Performansa Etkisi

Arslan UÇAR [1,a], **Seda ÖNCÜ-DAVAS** [2,b]

[1]*Rüya Dizayn İnşaat San. Tic. Ltd. Şti., İstanbul, Türkiye*
[2]*İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0009-0003-6440-0863;* [b]***ORCID**: 0000-0001-5023-1980*

Makale Bilgileri
Geliş : 09.11.2025
Kabul : 30.01.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1757157

Sorumlu Yazar
Seda ÖNCÜ-DAVAS
seda.oncu@iuc.edu.tr

Anahtar Kelimeler
Burkulması önlenmiş çapraz
Yüksek bina
Sismik performans

***Atıf şekli:** UÇAR, A., ÖNCÜ-DAVAS, S., (2026). Yüksek Binalarda Burkulması Önlenmiş Çaprazların Kullanımının Sismik Performansa Etkisi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(1), 101-113.*

ÖZ

Deprem performansının iyileştirilmesine yönelik yapısal sistemler olarak yaygın biçimde kullanılan burkulması önlenmiş çapraz (BÖÇ) sistemleri, süneklik ve enerji sönümleme kapasitesini artırarak yapısal güvenliği artırmaktadır. BÖÇ elemanların stratejik yerleşiminin kesme kuvveti, moment ve yer değiştirme taleplerini anlamlı ölçüde azalttığı birçok çalışmada gösterilmiştir. Bu kapsamda, biri referans olmak üzere, farklı BÖÇ yerleşimlerine sahip iki modeli içeren toplam üç yüksek bina modeli oluşturulmuş ve Perform-3D yazılımı ile doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri gerçekleştirilmiştir. Her bir model için elde edilen veriler, tescilli bir veri işleme yazılımı aracılığıyla değerlendirilmiş; göreli kat ötelemesi, kesme kuvveti, enerji tüketimi ve talep/kapasite oranı gibi performans göstergeleri açısından karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. Bulgular, BÖÇ sistemlerinin yapının enerji sönümleme kapasitesini artırarak, taşıyıcı elemanlardaki plastik şekil değiştirme taleplerini azalttığını ve yapının sismik performansını artırmada başarı sağladığını göstermektedir.

The Effect of Using Buckling-Restrained Braces on the Seismic Performance of High-Rise Buildings

Article Info
Received : 09.11.2025
Accepted : 30.01.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1757157

Corresponding Author
Seda ÖNCÜ-DAVAS
seda.oncu@iuc.edu.tr

Keywords
Buckling restrained brace
High-rise building
Seismic performance

***How to cite:** UÇAR, A., ÖNCÜ-DAVAS, S., (2026). The Effect of Using Buckling-Restrained Braces on the Seismic Performance of High-Rise Buildings. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(1), 101-113.*

ABSTRACT

Buckling-restrained brace (BRB) systems, which are widely used as structural systems for seismic performance enhancement, enhance structural safety by increasing ductility and energy dissipation capacity. Numerous studies have demonstrated that the strategic placement of BRB elements leads to significant reductions in shear force, moment, and displacement demands. In this context, three high-rise building models were developed, including one reference model and two models with different BRB configurations. Nonlinear time history analyses were conducted using the Perform-3D software. The data obtained for each model were processed using registered data analysis software, and comparative evaluations were carried out based on performance indicators such as inter-story drift, shear force, energy dissipation, and demand to capacity ratios. The findings indicate that BRB systems enhance the structure's energy dissipation capacity, reduce plastic deformation demands on structural members, and contribute effectively to improving the seismic performance of the building.

1. GİRİŞ

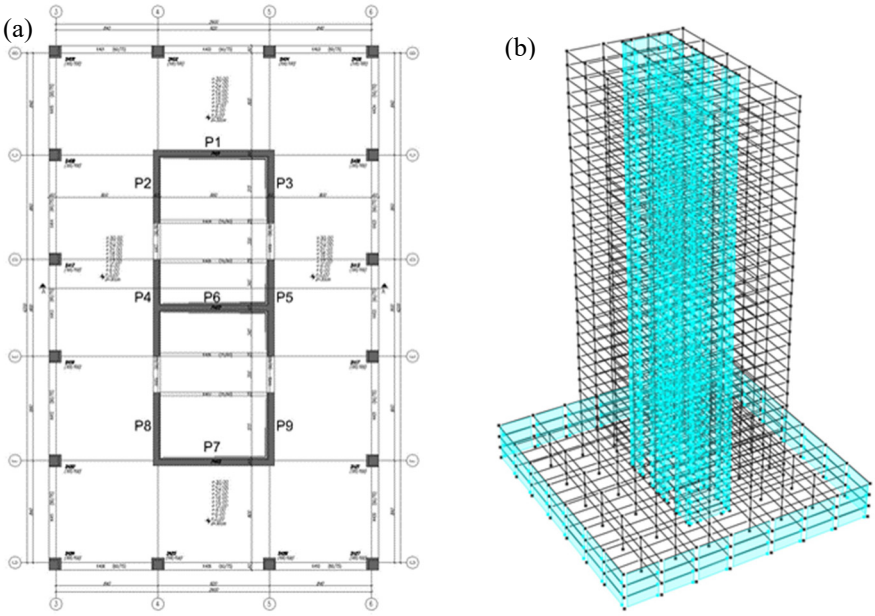
Son yıllarda farklı deprem yönetmelikleri ve taşıyıcı sistem tipleri esas alınarak gerçekleştirilen çalışmalar, betonarme yapıların sismik davranışının ve performans düzeyinin, taşıyıcı sistem seçimine ve yapısal özelliklere güçlü biçimde bağlı olduğunu ortaya koymuştur [1-4]. Bu doğrultuda, deprem etkilerine maruz kalan yapıların dinamik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla sismik izolasyon [5] ve enerji sönümleme [6-8] gibi etkin yapısal kontrol yöntemleri geliştirilmiş ve uygulanmaya başlanmıştır. Bu yöntemler hem yeni yapıların sismik performansının artırılmasında hem de mevcut yapıların güçlendirilmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında, burkulması önlenmiş çaprazlar (BÖÇ) etkinliği kanıtlanmış ve dünya çapında yaygın bir biçimde kullanılan bir sönümleme elemanıdır [9]. İlk olarak 1980'lerde Japonya'da geliştirilen bu sistemler [10], 1994 Northridge depremi sonrası ABD'de yaygınlaşmıştır [11]. BÖÇ elemanlar, geleneksel çaprazlama sistemlerine kıyasla katlar arası ötelenme, taban kesme kuvveti ve maksimum ivme gibi sismik talepleri önemli ölçüde azaltır. Kumar ve arkadaşları [12] çalışmasında, BÖÇ sistemlerinin geleneksel çelik çaprazlara kıyasla genel sismik davranım açısından üstün performans sergilediğini ve bu nedenle sismik bölgelerde yer alan modern yüksek katlı yapılarda tercih edilen bir çözüm olduğunu belirtmiştir. Basınç altında burkulmayı önleyen kararlı histeretik davranışları sayesinde, yapısal güvenilirliği artırır ve olası deprem hasarlarını azaltır [12]. Ayrıca, sismik enerjiyi etkili bir şekilde sönümleyerek yatay yer değiştirmeleri ve katlar arası ötelemeleri yönetmelik sınırları içerisinde kontrol altında tutar. Bu sayede, şiddetli depremler sırasında ana taşıyıcı yapı elemanlarında oluşabilecek hasarlar azaltılır [13].

BÖÇ elemanların yüksek katlı betonarme perde duvarlı binalara entegrasyonu, sismik performansı önemli ölçüde artırmaktadır. Örneğin, 43 katlı BÖÇ ile güçlendirilmiş betonarme çekirdekli yüksek bir yapı, doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizi ile incelenmiş ve bu sayede BÖÇ elemanların büyük depremler altında yatay yer değiştirmeleri ve sismik talepleri etkin bir şekilde kontrol ettiği doğrulanmıştır [13]. 40 katlı betonarme bir bina üzerine yapılan bir çalışmada [14], BÖÇ kullanılan sistemlerde kesme kuvveti taleplerinde yaklaşık %10, eğilme momentlerinde %45 ve şekil değiştirme taleplerinde yine %45 oranında azalma sağlandığını belirtmiştir. Özellikle, maksimum yatay kesme kuvveti ve iç kuvvet taleplerinin yoğunlaştığı katlarda BÖÇ elemanların yerleştirilmesinin sismik performansın artırılmasına fayda sağladığı belirtilmiştir. Sy ve arkadaşları [15] tarafından, 50 katlı bir betonarme binaya, farklı deprem şiddetlerine karşı optimum yapısal tepki elde etmek amacıyla BÖÇ elemanlar entegre edilmiş ve doğrusal olmayan zaman tanım analizleri sonucunda güçlü yer hareketi koşullarında etkili performans sergilediği gösterilmiştir. Ayrıca, BÖÇ elemanların sayısının ve yerleşiminin optimize edilmesi amacıyla kullanılan optimizasyon algoritmaları ile yapılan çalışmalar da [16-18] literatürde yer almaktadır. Bunların yanı sıra, BÖÇ elemanlarda akma çekirdeği uzunluğunun, elemanın artık yer değiştirmeleri ve akma sonrası rijitliği üzerinde belirleyici olduğu; daha kısa çekirdek uzunluklarının artırılmış rijitlik ve böylece yatay ötelenmelerin bir miktar daha indirgenmesini sağladığı belirtilmiştir [19]. Bu çalışmalar, BÖÇ sistemlerinin genel etkinliğini, eleman sayısının artırılması, optimizasyon algoritmaları veya farklı taşıyıcı sistem tipleri bağlamında ortaya koymakla birlikte; yüksek bina ölçeğinde, taşıyıcı sistem geometrisi, eleman özellikleri ve deprem girdileri sabit tutularak, yalnızca BÖÇ yerleşim stratejisinin değiştirilmesinin yapısal davranış üzerindeki etkilerini irdeleyen çalışmaların oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Mevcut literatürde BÖÇ elemanların varlığı ya da sayısı üzerinden yapılan değerlendirmeler ağırlık kazanırken, yerleşim stratejisinin eleman bazında sismik talep dağılımı, enerji tüketim mekanizmaları ve sünek elemanların zorlanma düzeyleri üzerindeki rolü, bütüncül ve karşılaştırmalı bir çerçevede ele alınmamıştır. Bu bağlamda, BÖÇ yerleşiminin yalnızca global yapı tepkisi değil, aynı zamanda hangi elemanların ne ölçüde enerji tükettiği ve hangi taşıyıcı elemanlarda sismik talep düzeylerinin yeniden dağılımına yol açtığı açısından da sistematik olarak incelenmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada, yüksek katlı binalarda burkulması önlenmiş çapraz (BÖÇ) uygulamasının yapısal performansa etkileri değerlendirilmiştir. Bu amaçla, biri referans olmak üzere üç farklı yapı modeli oluşturulmuş (REF-M, BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M) ve her model, Perform-3D yazılımı [20] kullanılarak, 11 adet ölçeklendirilmiş deprem kaydı, hem 0° hem de 90° döndürülerek uygulandığı doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizine (NLTHA) tabi tutulmuştur. BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M modelleri, BÖÇ yerleşim konfigürasyonlarına göre birbirinden ayrılmaktadır. Elde edilen yapısal analiz çıktıları, tescilli bir veri işleme yazılımı [21] aracılığıyla otomatik olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, göreli kat öteleme oranları, kesme kuvveti dağılımları, enerji tüketim yüzdeleri ve talep/kapasite oranları gibi temel performans göstergeleri üzerinden karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

2. YÜKSEK BİNA MODELİ VE BURKULMASI ÖNLENMİŞ ÇAPRAZ UYGULAMASI

Bu çalışma kapsamında ele alınan yapı, yüksek yapı kriterlerini sağladığından dolayı, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'in (TBDY 2018) "Yüksek Binaların Tasarımı"na ilişkin esaslarını içeren Bölüm 13 kapsamında değerlendirilmiş ve ilgili koşullara uygun şekilde tasarlanmıştır. Yapı, 3 bodrum kat, 30 tip kat ve 1 çatı kat olmak üzere toplam 34 kattan oluşmaktadır (Şekil 1). Tüm kat yükseklikleri 3 m olarak belirlenmiştir. Bodrum katlar, dört kenarından 40 cm kalınlığındaki rijit bodrum perdeleri ile çevrelenmiş olup, bu katlarda 30 cm kalınlığında kirişsiz döşeme sistemi uygulanmıştır. Tip katlar ise çevresel kirişli kirişsiz döşeme sistemiyle düzenlenmiş ve döşeme kalınlığı yine 30 cm olarak tasarlanmıştır. Tüm katlarda çevre kirişler 60×75 cm boyutlarında olup yapı boyunca süreklilik arz etmektedir. Kat planı ve taşıyıcı sistem boyutları, yapısal davranışı etkileyebilecek plan düzensizlikleri ve ikincil parametrelerin sonuçlar üzerindeki etkisini en aza indirecek şekilde düzenli ve simetrik olarak seçilmiştir. Bu tercih, çalışmanın temel amacı olan burkulması önlenmiş çaprazların yapısal performans üzerindeki etkilerinin, başka değişkenlerden bağımsız olarak değerlendirilebilmesini sağlamak amacıyla yapılmıştır.



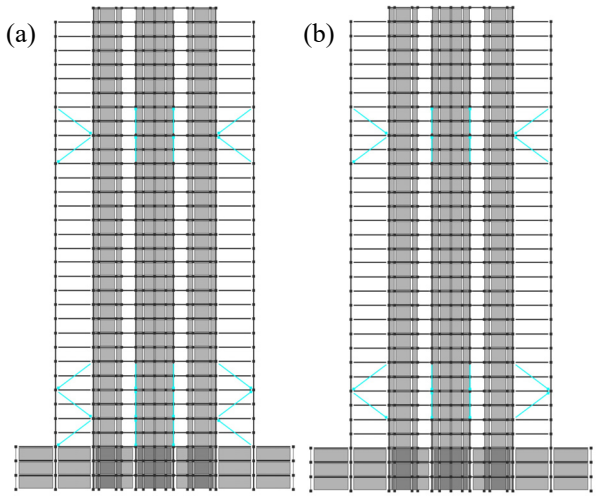
Şekil 1. (a) Tip kat planı (b) yapı modelinin üç boyutlu görünümü

Tip katlar, yapı yüksekliği boyunca her biri 3 m kat yüksekliğine sahip 10'ar katlık üç bölgeye ayrılmış ve bu bölgeler A, B ve C olarak adlandırılmıştır. Kolon boyutları bodrum katlarda, yükselen blok izi dışındaki bölgelerde 80×80 cm, blok izinde ise 120×120 cm'dir. Tip katlar için kolon boyutları A bölgesinde 100×100 cm, B bölgesinde 80×80 cm ve C bölgesinde 70×70 cm olarak belirlenmiştir. Çekirdek perde kalınlıkları, bodrum katlar ve A bölgesinde 60 cm, B bölgesinde 50 cm ve C bölgesinde ise 40 cm'dir. Çekirdek perdeler arasındaki bağ kirişleri, perde kalınlığına eşit genişlikte ve 60 cm yükseklikte düzenlenmiştir.

Yapının taşıyıcı sistemi C60 sınıfı beton ve B420C sınıfı donatı kullanılarak tasarlanmıştır. Doğrusal olmayan analizler, Perform 3D yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Betonarme elemanlar için doğrusal olmayan "Trilinear sargılı beton modeli" ve "Elastic Perfectly Plastic sargısız beton modeli" tanımlamaları yapılmıştır [22, 23]. Donatı için doğrusal olmayan "Trilinear optimizasyon modeli" kullanılmıştır [24]. Betonarme kolon ve kirişler çubuk eleman olarak modellenmiş, her iki uçlarına eleman boyutu ve donatı özelliklerine göre tanımlanan "Yayılı Plastik Mafsal (Fiber)" özellikleri atanmıştır. Perdeler ise doğrusal olmayan perde (inelastic shear wall) elemanlarla modellenmiş; başlık bölgelerinde sargılı beton modeline sahip fiber mafsallar, gövde bölgelerinde ise sargısız beton modeline sahip fiber mafsallar tanımlanmıştır. Döşeme kaplama yükü 2 kN/m², döşeme duvar yükü 2 kN/m² ve döşeme hareketli yükü 2 kN/m² olarak kabul edilmiştir. Döşemeler, Perform 3D modelinden çıkarılmış ve bu elemanlardan gelen tüm düşey yükler ilgili taşıyıcı sistem elemanlarına aktarılmıştır.

Zaman tanım alanında yapılan doğrusal olmayan analizlerde (NLTHA), yapısal elemanların doğrusal olmayan deformasyonları nedeniyle sistem rijitliği her analiz adımında değişmektedir. Bu durum, her bir adımda yapı mod şekillerinin de değişmesine yol açmaktadır. Ancak her bir mod şeklinin tekrar tekrar hesaplanması, çözüm süresini önemli ölçüde artırdığından, doğrusal olmayan analizlerde mod bazlı sönümleme uygulaması pratik değildir [25]. Bu nedenle, analizlerde Rayleigh sönümü tercih edilmiştir. Rayleigh sönümleme yaklaşımında, sönüm oranı; yapının birinci mod periyodunun 0,2 ve 1,5 katı olan iki mod için %2,5 olarak tanımlanmıştır. Bu doğrultuda belirlenen kütle orantılı ve rijitlik orantılı sönüm katsayıları ile elde edilen sönüm eğrisi, seçilen periyot aralığında sabit sönüm davranışına yakın bir dağılım göstererek doğrusal olmayan analizler için uygun bir sönümleme karakteristiği sunmuştur.

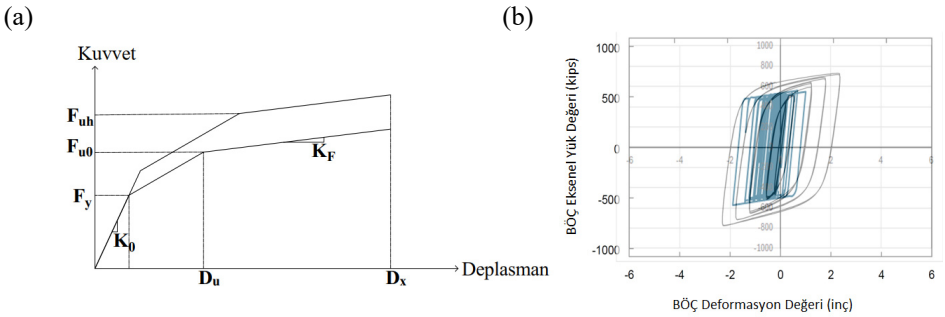
Bu çalışmada, burkulması önlenmiş çapraz (BÖÇ) elemanların yapının sismik performansı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, farklı yerleşim senaryoları geliştirilmiştir. Bu kapsamda, Şekil 1'de sunulan yalın yapı modeli esas alınarak, BÖÇ elemanlarının farklı konumlarda taşıyıcı sisteme entegre edilmesiyle iki yeni model geliştirilmiştir. Bu modeller, yerleştirilen BÖÇ konfigürasyonlarına bağlı olarak sırasıyla BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M olarak isimlendirilmiştir. Şekil 2a-b'de, BÖÇ elemanlarının farklı konfigürasyonlarına sahip bu iki modele ait kesit görünümleri sunulmaktadır.



Şekil 2. (a) BÖÇ1-M ve (b) BÖÇ2-M modelleri kesit görünümleri.

Bu çalışmada kullanılan burkulması önlenmiş çaprazlar (BÖÇ), Perform-3D yazılımında "İnelastik Bileşen (Inelastic Component)/BRB (Buckling Restrained Brace- Burkulması Önlenmiş Çapraz)" tanımı kullanılarak modellenmiştir. Her bir BÖÇ elemanı, enerji sönümleyici çekirdek çubuğu, bu çubuğu taşıyıcı elemanlara bağlayan elastik bağlantı elemanları ve uç başlıklardan oluşmaktadır. BÖÇ1-M modelinde, çekirdek perdeler ile kolonlar arasına yerleştirilen çapraz elemanlar 4-9 ve 24-27. katlar arasında konumlandırılmıştır. Bu elemanlar için belirlenen çekirdek uzunluğu 3352,8 mm'dir. BÖÇ2-M modelinde ise çaprazlar 6-9 ve 24-27. katlar arasında yer almakta olup, eşit çekirdek uzunluğu kullanılmıştır. Her iki modelde de BÖÇ elemanları için kesit alanı 7741,92 mm² (Core Brace-Specimen1G-12in²) olarak seçilmiştir. BÖÇ'lerin eksenel davranışının ilk çevrimsel yükleme durumu alttaki üçlü doğrusal modelle; tam şekil değiştirme sertleşmesi (full strain hardening) ise üstteki üçlü doğrusal (trilinear) modelle temsil edilmiştir (Şekil 3 (a)). Bu model ile elemanın çevrimsel yükleme altında dayanımının artmasını temsil eden izotropik pekleşme etkisi dikkate alınmaktadır. Bu çalışmada, akma dayanımı, F_y=1921,5 kN olarak belirlenmiş ve bu değer elemanın elastik sınırdaki taşıma kapasitesini temsil etmektedir. İlk çevrimsel yükleme sonucunda elde edilen dayanım F_{u0} olarak tanımlanmakta olup, bu değer çekme için F_{u0}=1,04F_y, basınç için ise F_{u0}=1,04F_y ilişkisi ile ifade edilmektedir. Tam şekil değiştirme sertleşmesinden sonra ulaşılan nihai dayanım F_{uh} ise çekme yönünde F_{uh}=1,62F_y, basınç yönünde F_{uh}=1,71F_y şeklinde tanımlanmaktadır. D_u, ilk çevrimsel yükleme dayanımı olan F_{u0} seviyesindeki yer değiştirme değerini ifade etmekte olup, hem çekme hem de basınç yönleri için aynı alınmıştır (D_u=5,58 mm). BÖÇ elemanının maksimum yer değiştirmesi ise D_x ile gösterilmekte olup, çekme ve basınç yönlerinde sırasıyla D_x=0,04L_c olarak tanımlanmaktadır. Burada L_c çekirdek elemanın uzunluğunu temsil etmekte ve değeri 3352,8 mm'dir. Modellemede kullanılan idealize üçlü doğrusal histeretik davranış kapsamında, K_0 çekirdek çapraz elemanın elastik bölgede gösterdiği başlangıç rijitliğini ifade eder ve değeri 455,73 kN/mm'dir. Plastik şekil değişimi sonrası rijitlik seviyesini temsil eden üçüncü doğrunun eğimi

K_f=0,015K_0 olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, akma sonrası oluşan elastik olmayan yer değiştirme taleplerine karşılık olarak, F_{u0} ile F_{uh} arasındaki ortalama yer değiştirme değerinin 2,5 katı, F_{uh} noktasındaki yer değiştirme değeri ise 3,0 katı olarak tanımlanmıştır. NLTHA sonuçlarından elde edilen dış BÖÇ elemana ait tipik eksenel kuvvet-şekil değiştirme ilişkisi de Şekil 3(b)'de sunulmuştur. Modelleme sonucunda elde edilen histeretik döngülerin, deneysel çalışmalarda elde edilen enerji sönümleme karakteristikleriyle uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 3. Burkulması önlenmiş çaprazlar için: (a) üçlü doğrusal eğri (b)eksenel kuvvet-eksenel deplasman ilişkisi grafiği

3. YÖNTEM

Çalışma kapsamında, yüksek binalarda BÖÇ uygulamasının yapısal performansa etkilerini değerlendirmek amacıyla üç farklı yapı modeli Perform-3D yazılımı kullanılarak oluşturulmuş ve REF-M (referans model), BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M olarak isimlendirilmiştir. Bu kapsamda, her bir model için on bir adet ölçeklendirilmiş deprem kaydı, hem Referans Eksen-1 (0°) doğrultusunda hem de 90° döndürülerek Referans Eksen-2 doğrultusunda uygulanarak toplamda yirmi iki doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizi (NLTHA) gerçekleştirilmiştir. Yapısal analiz çıktıları, özel geliştirilmiş ve tescilli (STB P. Kodu 102970) bir veri işleme aracı [21] ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, göreli kat öteleme oranları, kesme kuvveti dağılımları, enerji tüketim yüzdeleri ve talep/kapasite oranları üzerinden karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

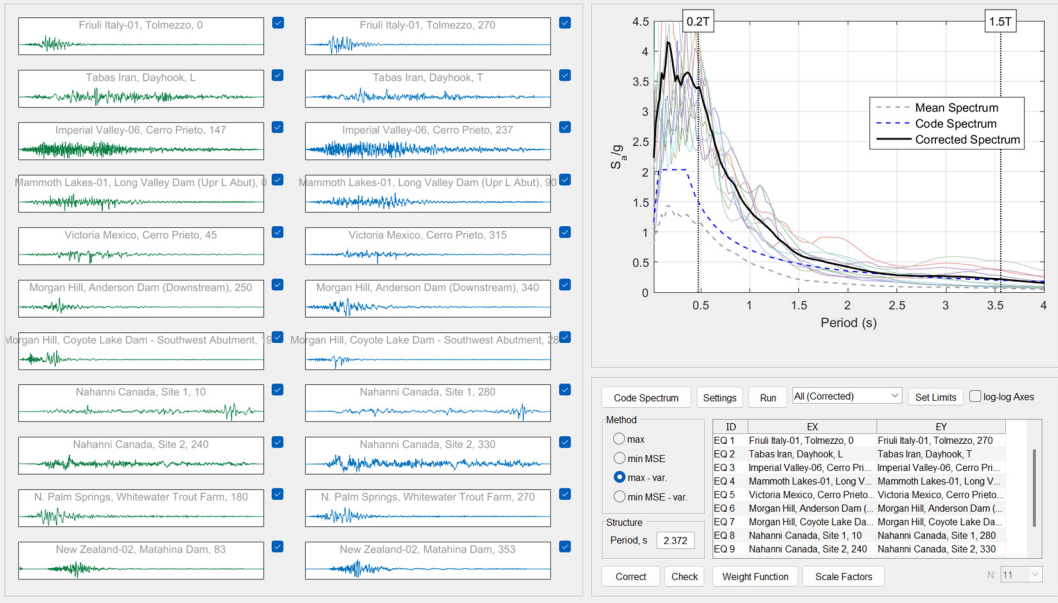
3.1. Deprem Kayıtları

Deprem kayıtları, TBDY 2018'de tanımlanan hedef ivme spektrumuna uygun şekilde Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) NGA-West2 veri tabanından seçilmiştir. ZC zemin sınıfına karşılık gelen kayma dalgası hızı aralığı olan V_{s30} = 360-760 m/s dikkate alınarak, moment büyüklüğü (M_w) 6 ile 8 arasında olan ve fay yüzeyine en yakın noktaya olan en kısa yatay uzaklığı R_{jb}<20 km olan depremlere ait yer hareketleri tercih edilmiştir. Kayıtlar, analizlerin gerçekleştirildiği bölgeyi temsil etmesi amacıyla 41,096604° enlem ve 29,015661° boylam koordinatları esas alınarak belirlenmiştir. Seçilen yer hareketlerine ilişkin temel bilgiler Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Seçilen yer hareketi kayıtlarına ait özellikler

RSN	Ölçek faktörü	Deprem	Yıl	İstasyon	M_w	Mekanizma	R_{jb} (km)
125	2,8170	"Friuli_ Italy-01"	1976	"Tolmezzo"	6,5	Reverse	14,97
139	4,1612	"Tabas_ Iran"	1978	"Dayhook"	7,35	Reverse	0
164	4,2602	"Imperial Valley-06"	1979	"Cerro Prieto"	6,53	Strike Slip	15,19
231	4,0081	"Mammoth Lakes-01"	1980	"Long Valley Dam (Upr L Abut)"	6,06	Normal Oblique	12,56
265	2,5325	"Victoria_ Mexico"	1980	"Cerro Prieto"	6,33	Strike Slip	13,8
448	2,9008	"Morgan Hill"	1984	"Anderson Dam (Downstream)"	6,19	Strike Slip	3,22
451	1,2884	"Morgan Hill"	1984	"Coyote Lake Dam - Southwest Abutment"	6,19	Strike Slip	0,18
495	2,6824	"Nahanni_ Canada"	1985	"Site 1"	6,76	Reverse	2,48
496	3,6453	"Nahanni_ Canada"	1985	"Site 2"	6,76	Reverse	0
540	2,4839	"N. Palm Springs"	1986	"Whitewater Trout Farm"	6,06	Reverse Oblique	0
587	3,9586	"New Zealand-02"	1987	"Matahina Dam"	6,6	Normal	16,09

TBDY-2018 kapsamında, Çizelge 1'de verilen yer hareketlerinin basit ölçekleme işlemleri de söz konusu tescilli yazılım [21] aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Referans bina hâkim periyodu T_p = 2,72 s dikkate alınarak, $0{,}2T_p$ ile $1{,}5T_p$ aralığında basit ölçekleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ölçeklenmiş ivme spektrumları ile bunların ortalama spektrumu ve hedef spektrumla karşılaştırmaları Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 4. Seçilen yer hareketlerinin basit ölçekleme yöntemine göre ölçeklenmesi

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

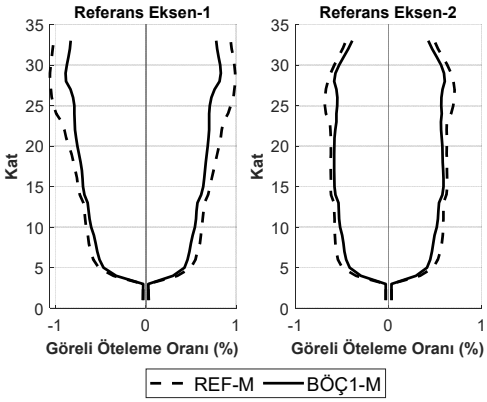
Çalışma kapsamında, I. Aşama'da ön tasarımı tamamlanan ve II. Aşama'da Sınırlı Hasar (SH) performans hedefini sağladığı doğrulanan yüksek bina taşıyıcı sisteminin, DD-1 deprem yer hareketi etkisi altında Kontrollü Hasar (KH) ve Göçmenin Önlenmesi (GÖ) performans hedeflerini sağlayıp sağlamadığı incelenmiştir. Değerlendirmelerde, TBDY-2018'de yüksek binalar için tanımlanan performans esasları ile betonarme elemanlara ilişkin plastik şekil değiştirme sınırları esas alınmış; sargılı ve sargısız beton için birim şekil değiştirme limitleri ile kiriş ve kolon plastik dönme sınırları belirlenmiştir. BÖÇ elemanlarının akma yerdeğiştirmesine ilişkin limit değerler, doğrusal olmayan analizlerde kullanılan modelleme yaklaşımı kapsamında tanımlanmış olup, SH performans düzeyi için sıfır kabul edilen plastik talepler yazılımın sayısal gereklilikleri nedeniyle ihmal edilebilir büyüklükte değerlerle temsil edilmiştir. Tüm bu sınır değerler analizde kullanılmak üzere Çizelge 2'de derlenerek sunulmuştur.

Çizelge 2. Performans düzeylerine göre şekil değiştirme limitleri

Eleman/Durum	SH	KH	GÖ
Sargılı beton/Eksenel basınç birim şekil değiştirme	0,001	0,001	0,001
Sargılı beton/Eksenel çekme birim şekil değiştirme	0,0025	0,0129	0,0172
Sargısız beton/Eksenel basınç birim şekil değiştirme	0,001	0,001	0,001
Sargısız beton/Eksenel çekme birim şekil değiştirme	0,001	0,002625	0,0035
Kiriş/Plastik dönme (rad)	0,001	0,009375	0,0125
Kolon/Plastik dönme (rad)	0,001	0,009375	0,0125
BÖÇ/Akma yer değiştirmesi (mm)	0,001	41,15	54,86

Yapılan analizler sonucunda, tüm modeller (REF-M, BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M) için göreli kat öteleme oranları, perde duvarlarda oluşan kat kesme kuvvetlerinin dağılımı, yapı elemanlarında meydana gelen enerji tüketim değerleri ile uç dönme ve eksenel şekil değiştirmelerine ait Talep/Kapasite (D/C) oranları detaylı biçimde [21] aracılığıyla değerlendirilmiştir. Ayrıca, BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M modelleri arasında oluşan yapısal tepki farklılıklarını belirleyebilmek amacıyla, sadece kolon, kiriş ve perde elemanlarına ait ortalama D/C oranları ile eleman bazında enerji tüketim dağılımları karşılaştırılmıştır.

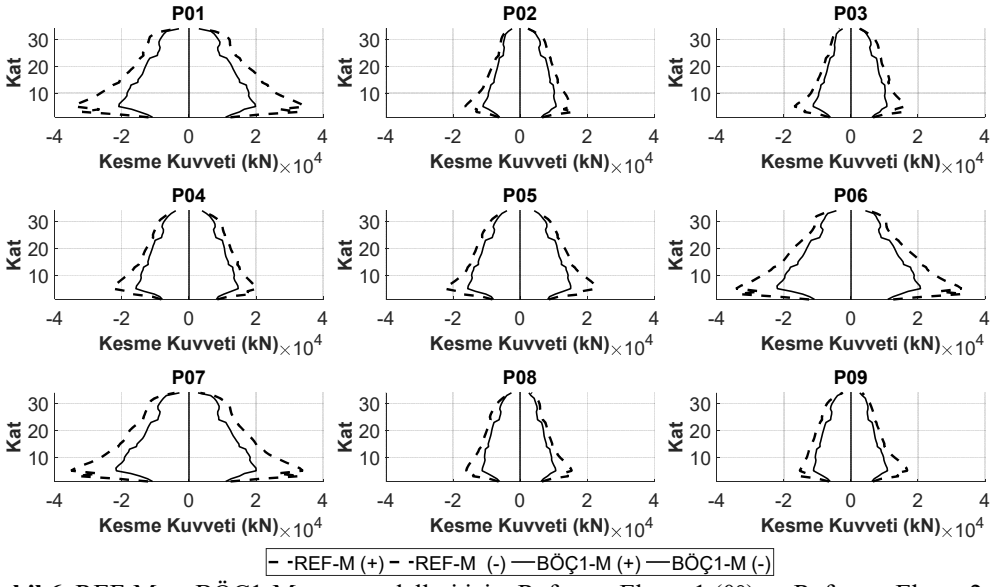
REF-M ve BÖÇ1-M yapı modelleri (Şekil 2) için Referans Eksen-1 ve Referans Eksen-2 NLTHA'dan elde edilen pozitif ve negatif göreli kat öteleme oranlarının kat seviyelerine göre dağılımı sunulmuştur.



Şekil 5. REF-M ve BÖÇ1-M yapı modelleri için Referans Eksen-1 (0°) ve Referans Eksen-2 (90°) doğrultularında elde edilen göreli kat öteleme oranlarının katlara göre dağılımı

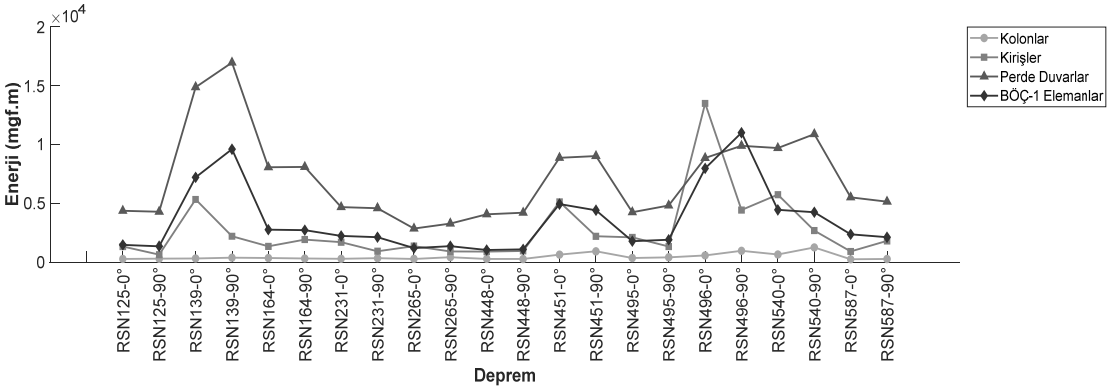
Şekil 5'te sunulan göreli kat ötelenmesi sonuçlarına göre, BÖÇ1-M modelinde belirli kat aralıklarında göreli kat ötelemesi taleplerini REF-M modeline göre tüm deprem doğrultuları için önemli ölçüde azaltmıştır. REF-M modeli için her kat için 2×11=22 yer hareketinden elde edilen ortalama göreli kat ötelemesi oranının pik değeri, %3 limit değerinin (TBDY-2018 Bölüm 13) altındadır. Ayrıca, herhangi bir tek kayıttan elde edilen maksimum göreli kat ötelemesi oranı ise %4.5 limitinin altında kalmıştır. REF-M modelinde maksimum göreli ötelenme oranı yaklaşık %1, BÖÇ1-M modelinde ise yaklaşık %0,83 seviyesinde kalmıştır. Bu, yaklaşık %17 oranında bir göreli kat ötelemesi indirgenmesine karşılık gelmektedir. BÖÇ elemanların yerleştirildiği 4-9. katlar ile 24-27. katlar arasında ötelenme eğrisinde bariz kırılmalar ve ötelenme eğiminin yavaşladığı gözlemlenmiştir. Bu durum, BÖÇ elemanların yerel rijitlik artışı sağladığını ve bu katlarda göreli kat ötelemesi kontrolü sağladığını göstermektedir. Öte yandan, BÖÇ elemanların bulunmadığı orta kat aralığında (örneğin 10-23. katlar), REF-M ve BÖÇ1-M modelleri arasındaki ötelenme farkı daha azdır. Ancak üst katlarda, ikinci BÖÇ grubu (24-27. katlar) sayesinde göreli kat ötelemesi eğrisi yeniden bastırılmış ve yapının tepe deplasmanı sınırlanmıştır.

Perde duvarlarda oluşan kat kesme kuvvetlerinin dağılımı Referans Eksen-1 (0°) ve Referans Eksen-2 (90°) doğrultularında yirmi iki ölçekli deprem kaydı için pozitif ve negatif yönlerdeki ortalama $\pm 1\sigma$ değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. REF-M ve BÖÇ1-M yapı modelleri için, Referans Eksen-1 (0°) ve Referans Eksen-2 (90°) doğrultularında perde duvarlarda oluşan kat kesme kuvvetlerinin dağılımı

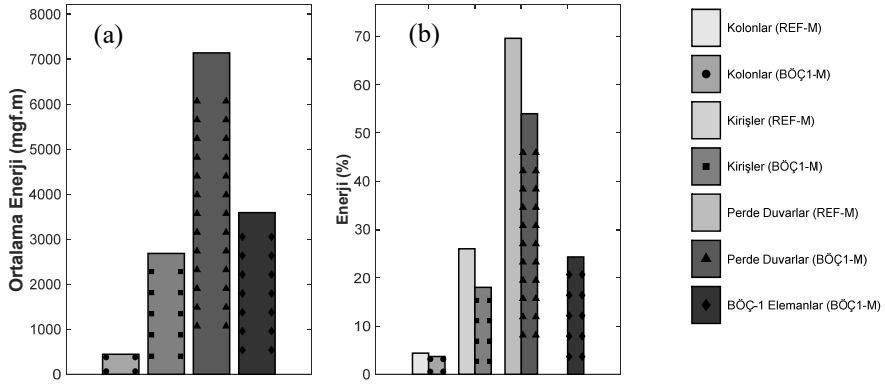
Şekil 6 incelendiğinde, BÖÇ elemanların bulunduğu 4-9. ve 24-27. kat aralıklarında, özellikle bazı perdelerde (örneğin P05, P08, P09), kesme kuvvetlerinde ani bir düşüş gözlenmiştir. Bu da BÖÇ elemanların yatay yük taşıma sistemine aktif katılım sağladığını göstermektedir. REF-M modelinde bu kat aralıklarında, örneğin P05 perde kesme kuvveti 18102 kN'ye kadar ulaşırken, BÖÇ1-M modelinde aynı aralıklarda bu değerler 16995 kN seviyelerine düşmüştür. Bu da yaklaşık %6 oranında bir azalmayı işaret etmektedir. BÖÇ yerleşimi dışında kalan katlarda (özellikle 10-23 arası), iki model arasındaki fark daha sınırlıdır. Bu da BÖÇ elemanların etkisinin yerel olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, BÖÇ elemanlar genel kesme dağılımını da bazı katlarda bir miktar azaltırken bazı katlarda bir miktar artırabildiğini de göstermektedir.



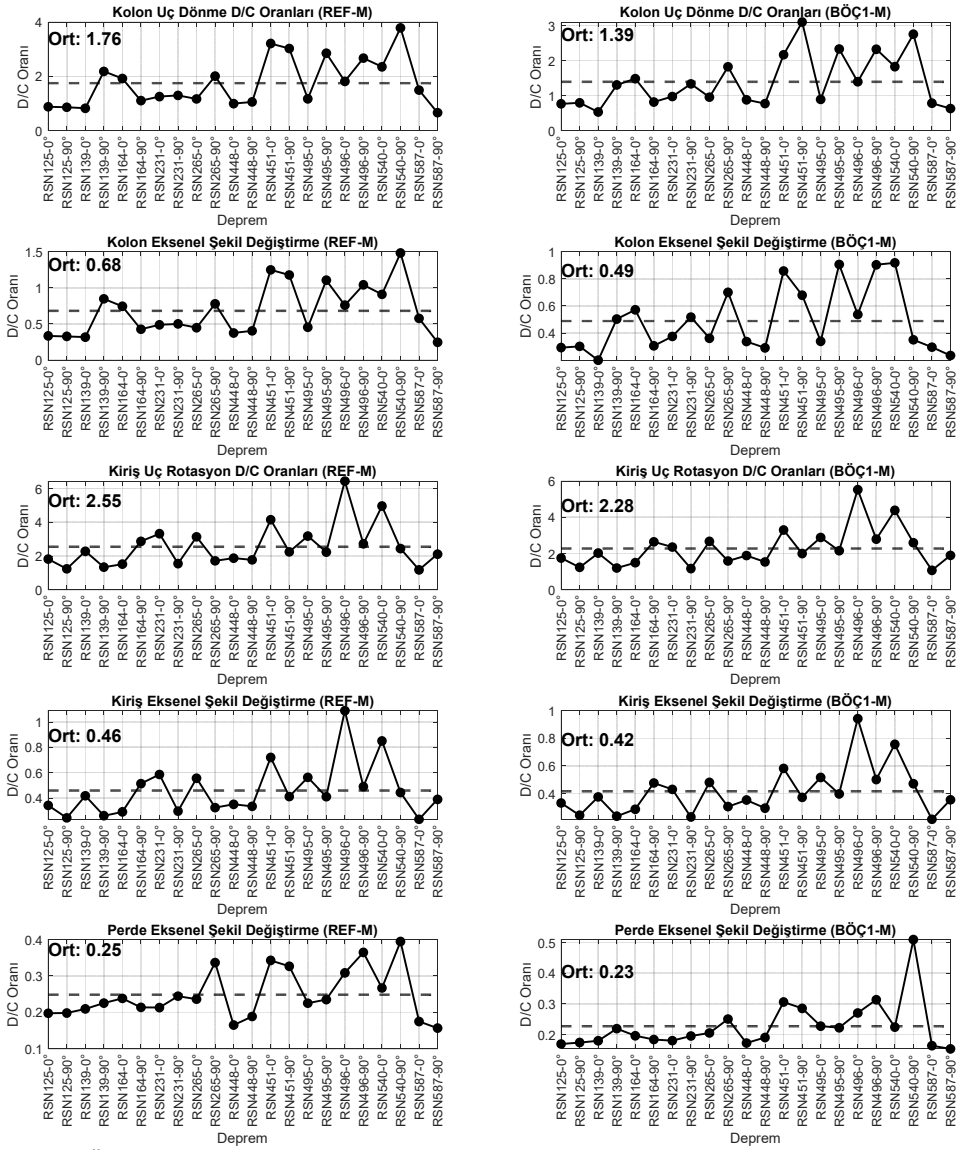
Şekil 7. Deprem kayıtlarının Referans Eksen-1 (0°) ve Referans Eksen-2 (90°) yönlerinde uygulanması sonucunda, yapı elemanlarının enerji tüketim dağılımları

Enerji tüketim dağılımları incelendiğinde (Şekil 7), perde duvarların hemen hemen tüm deprem kayıtları altında en yüksek enerji tüketimini gerçekleştiren başlıca taşıyıcı elemanlar olduğu görülmektedir. Örneğin, pik değer açısından RSN 139 deprem kaydının her iki doğrultusu için perde duvarlar tarafından karşılanan enerjinin 147099,75 kN·m değerini aştığı görülmüştür. Kirişler, perde duvarlara kıyasla daha düşük enerji tüketimi göstermekte olup, genel olarak 51955,25 kN·m seviyelerinde kalmaktadır. Bu durum, plastik şekil değiştirmenin perde duvarlarda yoğunlaştığını göstermektedir. Kolonlar, diğer eleman türlerine kıyasla daha sınırlı enerji tüketmiştir. Değerler genellikle 24516,63 kN·m düzeyindedir ve bu da kolonların sınırlı plastikleşmeye uğradığını işaret etmektedir. BÖÇ elemanların enerji tüketimi, birçok deprem kaydı altında 9806,65 ile 99235,22 kN·m aralığında gerçekleşmiş ve bu değerler, kolon ve kiriş taşıyıcı sistem elemanlarının oldukça üzerindedir. BÖÇ elemanlarının enerji tüketiminde gösterdiği bu yüksek performans, sistemin sismik enerjisinin önemli bir kısmının bu elemanlar tarafından sünek davranışla sönümlendiğini ve böylece diğer taşıyıcı sistem elemanlarının daha az plastik deformasyona maruz kaldığını göstermektedir.

Şekil 8 (a)'da, BÖÇ1-M modeline ait kolon, kiriş, perde duvar ve BÖÇ elamanlarının tükettiği toplam plastik enerji miktarını göstermektedir. Şekil 8 (b)'de ise, BÖÇ1-M modelindeki yapısal elemanların enerji tüketim oranlarındaki göreli değişim yüzdeleri referans modele (REF-M) göre karşılaştırılmıştır. Buna göre, BÖÇ1-M modelinde BÖÇ (burkulması önlenmiş çapraz) elemanları sistemin toplam plastik enerji tüketiminin yaklaşık %24'ünü karşılamaktadır. Ayrıca, REF-M modeline kıyasla BÖÇ1-M modelinde perde duvarların enerji tüketiminde yaklaşık %22 azalma gözlenmiştir. Bu, perde duvarların plastikleşme gereksiniminin büyük ölçüde azaldığını ve yapının rijitliğinin BÖÇ'ler tarafından artırıldığını göstermektedir. Kirişlerin enerji tüketimi ise yaklaşık %31 azalmıştır. Bu durum, yatay yük dağılımının bir kısmının BÖÇ elemanlara aktarılmasıyla kirişlerin sünek davranış gereksiniminin azaldığını ifade etmektedir. Kolonlarda ise enerji tüketimi diğer taşıyıcı elemanlara göre minimum düzeyde, yaklaşık %16 azalma göstermiştir. Bu sonuçlar, BÖÇ elemanların başarılı bir şekilde enerji tüketimini sağlama potansiyelini ve aynı zamanda sistemin diğer elemanlarının plastikleşme düzeylerini düşürerek yapısal hasarı indirgediğini ortaya koymaktadır.



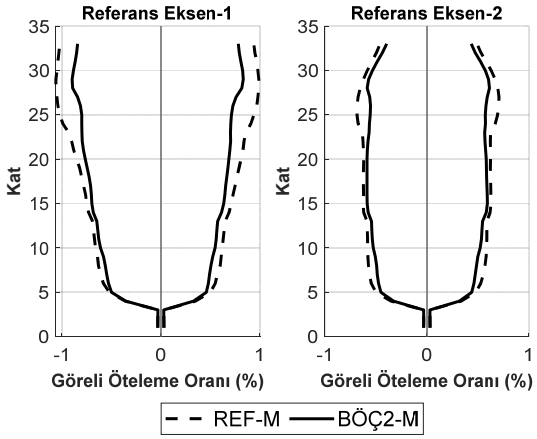
Şekil 8. Yapı elemanlarının enerji tüketim profilleri: (a) Eleman bazında ortalama enerji dağılımı, (b) Enerji yüzdesi



Şekil 9. BÖÇ1-M ve REF-M sistemleri için, Referans Eksen-1 (0°) ve Referans Eksen-2 (90°) doğrultularında uygulanan deprem etkileri altında, kolon, kiriş ve perde elemanlarında oluşan uç dönme ve eksenel şekil değiştirme taleplerine ait D/C (Talep/Kapasite) oranları

BÖÇ1-M ve REF-M sistemlerinin kolon, kiriş ve perde elemanlarında meydana gelen uç dönme ve eksenel şekildeğiştirme taleplerine ilişkin Talep/Kapasite (D/C) oranlarının karşılaştırmalı dağılımı ölçekli yirmi iki adet deprem kaydı için Şekil 9'da gösterilmektedir. Her bir grafik, ilgili eleman türü için iki modelde oluşan D/C oranlarını ayrı ayrı sunarak, BÖÇ uygulamasının yapısal talepler üzerindeki etkisini değerlendirmeye olanak sağlamaktadır. Buna göre, kolonlar için uç plastik dönme D/C ortalama değeri REF-M için 1,76 iken; BÖÇ1-M için 1,39'dur. BÖÇ elemanların dâhil edilmesiyle kolon uçlarında meydana gelen plastik dönmelerin kapasiteye oranı %21 azalmıştır. Bu azalma, kolonların plastikleşme eğilimlerinin sınırlandırıldığını ve daha kontrollü dönme taleplerine maruz kaldığını göstermektedir. Kolon eksenel şekildeğiştirme D/C ortalama değerlerinin BÖÇ elemanı ilave edilmesi ile %28 oranında azalarak 0,68'den 0,49'a düştüğü görülmüştür. BÖÇ1-M modeli REF-M'e göre kiriş uçlarında plastik dönme D/C değeri yaklaşık %11 oranında düşerken; kirişlerdeki eksenel deformasyon D/C değerinde %9 civarında bir azalma gözlenmiştir. Perde duvarlardaki eksenel şekil değiştirme D/C değerinde yaklaşık %8 oranında azalma mevcuttur.

Şekil 10'da REF-M ve BÖÇ2-M modellerinin tüm katları için sunulan göreli kat öteleme oranlarının ortalamaları Referans Eksen-1 ve Referans Eksen-2 için sunulmuştur. REF-M ve BÖÇ2-M modelleri için sırasıyla %0,70 ve %0,62 olarak belirlenmiştir. BÖÇ2-M modelinde ortalama öteleme oranı REF-M modeline göre %6,3 oranında bir azalırken; BÖÇ1-M modelinde REF-M modeline kıyasla yaklaşık %7,8 oranında bir azalma sağlamıştır.



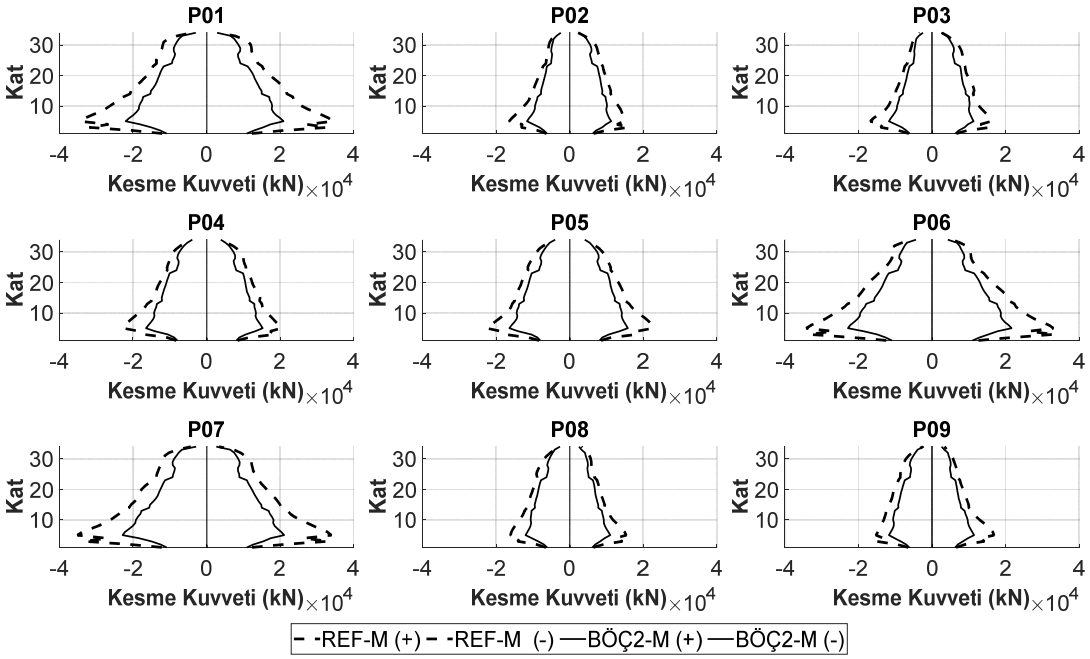
Şekil 10. REF-M ve BÖÇ2-M yapı modelleri için Referans Eksen-1 (0°) ve Referans Eksen-2 (90°) doğrultularında elde edilen göreli kat öteleme oranlarının katlara göre dağılımı

Çizelge 3'te REF-M, BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M yapı modelleri için pozitif maksimum göreli kat öteleme oranlarının bazı katlardaki değerleri ve bu değerlere göre BÖÇ bulunan modellerin referans modele göre farkları (REF-M ile BÖÇ1-M; REF-M ile BÖÇ2-M) sunulmuştur. Buna göre, BÖÇ1-M modeli, maksimum göreli kat ötelemesi oranı bakımından daha özellikle ilk katlarda daha başarılı sonuçlar üretmiştir. BÖÇ2-M modeli ise üst katlarda ve maksimum öteleme değerleri açısından BÖÇ1-M ile çok yakın performans göstermiştir. Maksimum göreli kat ötelemesi oranlarının indirgenmesi açısından, özellikle 25.-30. katlar arasında, her iki model REF-M modeline göre %15-25 arasında iyileşme sağlamıştır.

Çizelge 3. REF-M, BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M modellerinin maksimum göreli kat ötelemesi oranı yüzde farkları

Kat	REF-M (%)	BÖÇ1-M (%)	BÖÇ2-M (%)	REF-M ile BÖÇ1-M fark (%)	REF-M ile BÖÇ2-M fark (%)
5	0,50	0,43	0,46	14,4	8,10
15	0,71	0,64	0,64	10,4	10,5
25	0,94	0,71	0,71	24,6	24,1
30	0,98	0,82	0,83	16,0	15,7

Şekil 11, REF-M ve BÖÇ2-M yapı modellerine ait perde duvarlarda meydana gelen kat kesme kuvvetlerinin pozitif ve negatif yönlerdeki ortalama $\pm 1\sigma$ değerlerini sunmaktadır. Buna göre, BÖÇ2-M modeli REF-M modeline göre olumlu katkı sağlasa da, kesme kuvvetinin indirgenmesi bakımından BÖÇ1-M modeline göre (Şekil 6) daha düşük etkinlik gösterdiği görülmektedir.



Şekil 11. REF-M ve BÖÇ2-M yapı modelleri için, Referans Eksen-1 (0°) ve Referans Eksen-2 (90°) doğrultularında perde duvarlarda oluşan kat kesme kuvvetlerinin dağılımı

REF-M, BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M yapı modellerinde farklı taşıyıcı eleman türlerine ait toplam enerji tüketim yüzdelerini ve BÖÇ uygulamasının, referans modele göre enerji dağılımında sağladığı değişim oranları Çizelge 4'te özetlenmektedir. BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M modelinde BÖÇ elemanları toplam enerjinin sırasıyla %24 ve %21'ini karşılamıştır. Kolonlar için REF-M modelinde %4,40 olan enerji tüketim oranı, BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M modellerinde sırasıyla %3,70 ve %3,80'e düşmüştür. Enerji tüketimi kirişler açısından değerlendirildiğinde, REF-M modelinde oldukça yüksek olan %26'lık enerji tüketiminin, BÖÇ elemanlarıyla yaklaşık %18 düşürüldüğü görülmektedir. Her iki modelde de yaklaşık %30'a varan enerji azalması, kirişlerin daha az plastikleştiğini ve yatay yüklerin bir kısmının BÖÇ elemanlar tarafından karşılandığını göstermektedir. REF-M modelinde enerji büyük oranda (%69) perdeler duvarlar ile tüketilmiştir. BÖÇ uygulaması bu oranı BÖÇ1-M modelinde %22 düşürerek %54,0'e, BÖÇ2-M'de ise %18,7 düşürerek %56'ya indirgemiştir.

Çizelge 4. REF-M, BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M modellerinin eleman bazında plastik enerji tüketimi ve karşılaştırılması

Eleman türü	REF-M (%)	BÖÇ1-M (%)	BÖÇ2-M (%)	REF-M ile BÖÇ1-M fark (%)	REF-M ile BÖÇ2-M fark (%)
Kolonlar	4,40	3,70	3,80	15,9	13,6
Kirişler	26,0	18,0	18,4	30,8	29,2
Perde duvarlar	69,6	54,0	56,6	22,4	18,7
BÖÇ	0,00	24,3	21,2	24,3	21,2

Çizelge 5, REF-M, BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M modellerine ait Referans Eksen-1 (0°) ve Referans Eksen-2 (90°) doğrultularında uygulanan yirmi iki adet ölçeklendirilmiş deprem kaydı altında, kolon, kiriş ve perde elemanlarında meydana gelen plastik dönme ve eksenel şekil değiştirme taleplerine ilişkin ortalama D/C oranlarını sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, her iki BÖÇ modelinin performansı REF-M modeli ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, kolon uç dönme talepleri BÖÇ1-M modelinde %21, BÖÇ2-M modelinde ise %18,2 oranında azalmıştır. Kolon eksenel şekil değiştirme taleplerinde her iki modelde de REF-M modeline kıyasla %27,9 oranında azalma elde edilmiştir. Kiriş uç dönme talepleri, BÖÇ1-M modelinde %10,6; BÖÇ2-M modelinde ise %10.2 oranında azaltılmıştır. Kiriş eksenel şekil değiştirme talepleri her iki modelde de REF-M modeline göre %8,7 oranında düşürülmüştür. Benzer şekilde, perde eksenel şekil değiştirme taleplerinde her iki BÖÇ modelinde %8 oranında azalma sağlanmıştır.

Çizelge 5. REF-M, BÖÇ1-M ve BÖÇ2-M modellerine ait ortalama D/C oranları ve REF-M modeline göre yüzde azalma oranları

Eleman tipi/ Davranış	REF-M	BÖÇ1-M	REF-M ile BÖÇ1-M fark (%)	BÖÇ2-M	REF-M ile BÖÇ2-M fark (%)
Kolon/Plastik Dönme	1,76	1,39	21	1,44	18,2
Kolon/Eksenel Şekildeğiştirme	0,68	0,49	27,9	0,49	27,9
Kiriş/Plastik Dönme	2,55	2,28	10,6	2,29	10,2
Kiriş/Eksenel Şekildeğiştirme	0,46	0,42	8,7	0,42	8,7
Perde Eksenel Şekildeğiştirme	0,25	0,23	8	0,23	8

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, iki farklı BÖÇ (Burkulması Önlenmiş Çapraz) konfigürasyonlarının yüksek binalarda deprem etkisi altındaki sismik performansa olan katkısı kapsamlı olarak değerlendirilmiştir. NLTHA sonuçları, göreli kat ötelemesi, D/C (talep/kapasite) oranları, kat kesme kuvveti dağılımları ve enerji tüketim yüzdeleri bakımından incelenmiştir. Buna göre;

- BÖÇ uygulaması, tüm katlarda göreli öteleme oranlarını azaltarak yapısal deplasman taleplerini sınırlamıştır. Özellikle 25. ile 30. kat aralığında elde edilen %15-25'lik azalmalar, BÖÇ sistemlerinin üst katlardaki yatay deplasman kontrolünde etkili olduğunu ortaya koymuştur. BÖÇ içeren her iki model benzer genel eğilimler sergilese de, BÖÇ1-M modelinde özellikle alt katlardaki göreli öteleme taleplerinin biraz daha etkin şekilde sınırlandığı görülmüştür.
- BÖÇ sistemlerinin taşıyıcı sisteme dâhil edilmesiyle, tüm eleman türlerinde talep/kapasite oranlarında düşüş gözlemlenmiştir. En yüksek oransal azalma kolon eksenel deformasyonlarında (%28), ardından kolon uç dönmelerinde (%18-21) ve perde eksenel deformasyonlarında (%8) meydana gelmiştir. BÖÇ1-M modeli, kolon uç dönmelerinde BÖÇ2-M modeline göre daha yüksek azalma sağlamıştır. Her iki konfigürasyon da yapısal talepleri azaltarak deprem performansının iyileştirilmesine önemli katkı sağlamıştır.
- Bu sonuçlar, BÖÇ elemanlarının yapının enerji tüketiminden bir pay üstlenerek sünek elemanlar üzerindeki plastik şekil değiştirme taleplerini azalttığını göstermektedir. Ayrıca, BÖÇ elemanlarının çerçeve sistemdeki kiriş ve kolonların hem dönme hem de eksenel taleplerini azaltarak daha dengeli bir deformasyon dağılımı sağladığı söylenebilir.
- Kesme kuvvetleri dağılımı açısından, BÖÇ1-M modeli kesme kuvvetlerinin indirgenmesi bakımından daha etkin bir performans sergilemiş; perde elemanlarının deprem taleplerini sınırlamada BÖÇ2-M modeline kıyasla daha verimli bir çözüm ortaya koymuştur.
- Enerji tüketimi açısından değerlendirildiğinde, BÖÇ uygulamasının perdeler ve kirişler arasında daha dengeli bir enerji dağılımı sağladığı ve bu elemanlardaki plastikleşme taleplerini önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. BÖÇ içeren modellerde toplam enerjinin yaklaşık dörtte biri bu elemanlar tarafından tüketilmiştir. Bu durum, BÖÇ elemanı içeren her iki modelin yatay yük aktarımı üzerindeki etkinliğini açıkça ortaya koymaktadır.
- Tüm bu bulgular, BÖÇ sistemlerinin yapının enerji sönümleme kapasitesini artırarak taşıyıcı elemanlardaki plastik talepleri azalttığını ve yapının sismik performansını artırmada başarı sağladığını göstermektedir.

6. KAYNAKLAR

1. Ahmed, A.A., Öztürk, H. ve 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.
2. Nomanoğlu, 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.
3. Ünsal, İ. ve Şahan, M.F. (2022). Bodrum katlarda rijit bodrum perde tasarımının yapı davranışı üzerindeki etkisi. *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 25*(3), 305-307.

4. Ünsal, İ., Balca, N. ve Şahan, M.F. (2022). Orta yükseklikteki binalar için TBDY 2018 yönetmeliğinde verilen taşıyıcı sistem tiplerinin doğrusal analiz yöntemi ile karşılaştırılması. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *17*, 431-446.

5. Xu, G., Guo, T., Ni, X.Y., Zhi, G.L., Zhang, H.Y. & Dang, L.J. (2024). Breakthroughs in seismic isolation technologies for engineering structures. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2650062.

6. Symans, M.D. & Constantinou, M.C. (1999). Semi-active control systems for seismic protection of structures: A state-of-the-art review. *Engineering Structures*, *21*(6), 469-487.

7. Saaed, T.E., Nikolakopoulos, G., Papadopoulos, E. & Tzes, A. (2015). A review of the state of the art in structural control. *Journal of Vibration and Control*, *21*(5), 919-937.

8. Javidan, M., Assefa, J.D. & Kim, J. (2023). Seismic retrofit of low-rise structures using rotational viscoelastic dampers. *Structures, 58*, 105403.

9. Li, T., Shu, S., Atasever, K., Dai, K., Çelik, O.C. & Tang, X. (2025). Seismic performance and fragility assessment of BRBFs subjected to earthquake main shock-aftershock sequences. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 199*, 109672.

10. Mochizuki, N., Murata, Y., Andou, N. & Takahashi, S. (1980). Studies on steel braces with hysteretic damper (in Japanese). *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting*, *Architectural Institute of Japan, Kinki Area, 3*, 1913-1914.

11. Rezazadeh, F. & Talatahari, S. (2020). Seismic energy-based design of BRB frames using multi-objective vibrating particles system optimization. *Structures, 24*, 227-239.

12. Kumar, N.K., Kumuda, V., Sunny, K. & Pravin, G. (2021). Comparative study of conventional steel braces and buckling restrained braces in a high-rise RC building. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET), 9*(7), 3363-3370.

13. Zhai, Z., Liu, Y., Mercan, O., Zou, S. & Zhou, F. (2024). A hybrid buckling-restrained brace for enhancing the seismic performance of steel moment resisting frames. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 178*, 108464.

14. Binzet, R., Tüzün, C. & Erdik, M. (2014). Buckling-restrained braced frames for cost-effective retrofit: A case study. *2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (2ECEES)*, İstanbul, Türkiye.

15. Ahmed, M., Tayyaba, S. & Ashraf, M.W. (2016). Effect of buckling restrained braces locations on seismic responses of high-rise RC core wall buildings. *Shock and Vibration, 2016*(1), 6808137.

16. Sy, J.A., Anwar, N., Aung, T.H. & Rayamajhi, D. (2014). Application of buckling restrained braces in a 50-storey building. *International Journal of High-Rise Buildings, 3*(1), 81-87.

17. Kaveh, A., Mahdipour Moghanni, R. & Javadi, S.M. (2021). Optimal design of 3D special steel buckling-restrained braced structures. *Structural Design of Tall and Special Buildings, 30*(17), e1893.

18. Hoseini, S.M., Parastesh, H., Hajirasouliha, I. & Ferdowsi, A. (2021). Structural design optimization of all-steel buckling-restrained braces using intelligent optimizers. *International Journal of Steel Structures, 21*(6), 2055-2070.

19. Tunca, O. (2022). Design of buckling restrained steel braces using application programming interface between simulation and discrete optimization. *Structures, 43*, 752-766.

20. Meshaly, M.E. & Abou-Elfath, H. (2022). Seismic response of RC frames equipped with buckling-restrained braces having different yielding lengths. *AIMS Materials Science, 9*(3), 359-381.

21. Computers and Structures, Inc. (2006). *PERFORM-3D: Nonlinear analysis and performance assessment for 3D structures-User guide.* Version 4. Walnut Creek, CA.

22. T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı. (t.y.). *Yapı analiz süreçlerine yönelik yüksek performanslı veri işleme ve rapor görselleştirme sistemi* (Faz-1) [Bilgisayar yazılımı]. STB P. Kodu 102970.

23. Mander, J.B., Priestley, M.J.N. & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering, 114*(8), 1804-1826.

24. Kent, D.C. & Park, R. (1971). Flexural members with confined concrete. *Journal of the Structural Division, 97*(7), 1969-1990.

25. Park, R. & Paulay, T. (1991). *Reinforced concrete structures* (Cilt 1). John Wiley & Sons, New York, 769.

26. Powell, G.H. (2006). Nonlinear dynamic analysis capabilities and limitations. *The Structural Design of Tall and Special Buildings, 15*(5), 547-552.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 1 MART/MARCH 2026

Optimization of Vertical Machining Parameters of DIN 1.0038 Steels Using Hybrid Taguchi Based Grey-Fuzzy Algorithm in CNC Pocket Milling Process

Kaan Emre ENGİN [1,a], **Uğur EŞME** [2,b], **Mustafa Kemal KÜLEKÇİ** [2,c]

[1]*Adıyaman University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Adıyaman, Türkiye*
[2]*Tarsus University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Mersin, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0002-6439-7700; [b]**ORCID**: 0000-0002-0672-7943; [c]**ORCID**: 0000-0002-5829-3489*

Article Info
Received : 26.05.2025
Accepted : 06.01.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1706626

Corresponding Author
Kaan Emre ENGİN
kengin@adiyaman.edu.tr

Keywords
CNC machining
Grey fuzzy algorithm
Milling
Optimization
Surface roughness

***How to cite:** ENGİN, K.E., EŞME, U., KÜLEKÇİ, M.K., (2026). Optimization of Vertical Machining Parameters of DIN 1.0038 Steels Using Hybrid Taguchi Based Grey-Fuzzy Algorithm in CNC Pocket Milling Process. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(1), 115-128.*

ABSTRACT

In CNC pocket milling, surface quality, material removal rate and production time are critical parameters. However, setting the optimum parameters related to the process is problematic due to the presence of many factors. In this study, a hybrid grey-based fuzzy algorithm with a Taguchi L16 orthogonal array experimental design was used to determine the optimum results by combining factors such as cutting speed, feed rate, cutting depth and cutting path strategy. The optimum results were found as 0.36 µm surface roughness, 10 s machining time and 120 mm³/min material removal rate. These results were achieved by using 1500 rpm cutting speed, 2.0 mm/rev feed rate, 1.25 mm cutting depth and zigzag cutting path strategy. In the analysis made using the Analysis of Variance (ANOVA), it was concluded that the process was affected by feed rate, cutting depth, cutting speed and cutting path strategy, respectively.

CNC Cep Frezeleme Prosesinde Hibrit Taguchi Tabanlı Gri-Bulanık Algoritma Kullanılarak DIN 1.0038 Çeliklerinin Dikey İşleme Parametrelerinin Optimizasyonu

Makale Bilgileri
Geliş : 26.05.2025
Kabul : 06.01.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1706626

Sorumlu Yazar
Kaan Emre ENGİN
kengin@adiyaman.edu.tr

Anahtar Kelimeler
CNC işleme
Gri bulanık mantık
Frezeleme
Optimizasyon
Yüzey pürüzlülüğü

***Atıf şekli:** ENGİN, K.E., EŞME, U., KÜLEKÇİ, M.K., (2026). CNC Cep Frezeleme Prosesinde Hibrit Taguchi Tabanlı Gri-Bulanık Algoritma Kullanılarak DIN 1.0038 Çeliklerinin Dikey İşleme Parametrelerinin Optimizasyonu. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(1), 115-128.*

ÖZ

CNC cep frezelemede, yüzey kalitesi, talaş kaldırma oranı ve üretim süresi kritik parametrelerdir. Ancak prosese ilişkin optimum parametrelerin ayarlanması, çok sayıda faktörün bir arada bulunması nedeniyle sorun teşkil etmektedir. Bu çalışmada; kesme hızı, ilerleme oranı, kesme derinliği ve kesme yolu stratejisi gibi faktörler birleştirilerek optimum sonuçları belirlemek için bir Taguchi L16 ortogonal dizi deneysel tasarımına sahip hibrit gri tabanlı bulanık algoritma kullanılmıştır. Optimum sonuçlar 0,36 µm yüzey pürüzlülüğü, 10 sn işleme süresi ve 120 mm³/dk talaş kaldırma oranı şeklinde bulunmuştur. Bu sonuçlara 1500 rpm kesme hızı, 2,0 mm/dev ilerleme oranı, 1,25 mm kesme derinliği ve zikzak kesme yolu stratejisi kullanılarak ulaşılmıştır. Varyans Analizi (ANOVA) yöntemi kullanılarak yapılan analizlerde prosesin sırasıyla ilerleme oranı, kesme derinliği, kesme hızı ve kesme yolu stratejisinden etkilendiği sonucuna ulaşılmıştır.

1. INTRODUCTION

CNC milling is often regarded as a highly favored process in the field of industrial applications. However, improper selection of cutting settings may result in issues such as diminished surface quality and reduced production speed. Given the capabilities of CNC milling machines, it is essential to ensure a superior surface finish in CNC milling operations. The assessment of the manufactured components' quality is contingent upon the presence of form defects and the efficacy of surface finishing procedures used throughout the milling processes [1,2]. Surface quality considerations during milling processes are a critical requirement that must not be disregarded. Additionally, it has a substantial influence on several characteristics, including the product's resistance to wear, ductility, and fatigue resistance in the final fabrication of components. Material resistance to friction, temperature, corrosion, and stress is substantially influenced by the surface properties of machined components [1,3-7].

Advancements in industries such as automotive, aviation, and die manufacturing have heightened the need for goods with improved specifications. To enhance their competitiveness within their respective sectors, manufacturers need to simultaneously improve surface quality, reduce manufacturing time, increase production rates and efficiency [4,5,8-10]. Numerous studies indicate that the control of surface roughness of the manufactured workpiece is a crucial aspect that directly influences the overall quality. The fatigue life of manufactured components is diminished because of substantial surface roughness [4,5,10-12]. Manufacturing time and material removal rate (MRR) are additional parameter outputs that should be considered in addition to surface roughness. The rapidness and efficiency of the process are affected by these parameters. Manufacturers have an incentive to get top-notch products at the lowest possible cost for a certain production method [13].

The task of determining the optimal settings in milling processes is multifaceted and determined by a variety of variables, such as the cutting parameters, workpiece material, and the properties of the cutting tool. [4,5,14]. While the workpiece material characteristics and the properties of the cutting tool are significant, cutting parameters exert a predominant influence, encompassing numerous sub-parameters that directly impact the overall cutting quality in the milling process. These include the conditions during cutting (wet or dry), cutting fluid, machine vibrations, feed rate, depth of cut, cutting speed, and cutting path strategy. Among these cutting parameters, cutting depth, cutting path strategy, feed rate and speed of cutting have the most dominant effects on the roughness of the workpiece surface [3,4,15]. Therefore, choosing the cutting parameters to optimize cutting performance, reduce energy and time consumption, and implement the milling process to achieve the highest possible surface quality is a necessity [16]. General approaches to selecting accurate cutting parameters are usually determined through practical experience or by referencing catalogs or handbooks [17]. Conversely, when optimization approaches are necessary, mathematical models using neural computing and statistical regression analysis are often applied to delineate the link between performance and machining parameters [18]. Achieving the optimal parameters then requires the formulation of a constrained objective function utilizing optimization techniques. In addition, an adequate number of cutting experiments must be conducted to construct mathematical models precisely. As a result, the process of constructing the necessary model requires significant expenses in terms of both labor and resources.

The Taguchi method is a systematic approach used across multiple processes to enhance performance, efficiency, quality, and cost-effectiveness of experimental designs by reducing the number of necessary runs while applying a simple but efficient methodology [19,20]. The Taguchi method has been extensively employed in numerous applications [18,21].

A comprehensive examination of the relevant literature indicates that several studies have been conducted to examine the cutting parameters in CNC milling. These studies have used many cutting settings, materials, and cutting instruments, as well as experimental and optimization methodologies. Mantle et al. [22] performed a study using a Taguchi orthogonal array to assess the surface properties created by the end milling tool. Benardos and Vosniakos [23] employed the Taguchi experimental design approach to estimate the roughness of workpieces through CNC face milling. Ertekin et al. [24] put forward the prevalent and useful sensory characteristics to measure roughness of the surface and dimensional accurateness during CNC milling.

Paris et al. examined the effect of vibration during the process of cutting on the surface roughness of the manufactured components. [25]. Franco et al. [26] proposed a model to approximate a surface's textural characteristic and roughness during the process of surface milling utilizing round-tipped cutting tools. Ozcelik and Bayramoglu [15] put forth a model of statistics in order estimate the surface roughness occurrence under wet cutting conditions in high-speed end milling. The researchers used several values of feed rate, cut depth, spindle speed and step over. The determination of optimal conditions of cutting DIN 1.2738 die steel was determined by a series of studies conducted by Gologlu and Sakarya. [7] utilizing end mills made of high-speed steel. Shamsuddin et al. [27] utilized visual charts for comparing diverse machining strategies to identify more effective cutting path strategies for end milling process of aluminum alloy components with thin walls. Using three distinct materials, Ali et al. [28] examined the various cutting tool path strategies on face milling through the implementation of optimization studies utilizing Taguchi grey relational analysis. In addition, they noted that the strategy for the tool path has a substantial effect on face milling. Allocating population-based meta-heuristic learning to an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) and interval type 2 neuro-fuzzy network, Asadi et al. [29] assessed the average level of surface roughness and the cutting force that was created in surface milling process of aluminum alloys.

The process parameters that impact rapidness directly influence the total time of the manufacturing, and the generation of roughness generated during the CNC milling of the insole rubber foam used in the soles of the shoes worn by diabetic patients were optimized by Bawono et al. [30] using Taguchi's method. The Taguchi method was used by Daniel et al. [31] to examine the impact of individual control factors on response variables during the milling process of Al5059/SiC/MoS_2 material. In the study conducted by Kar et al. [17] a fuzzy-based desirability function was used to optimize several responses in the context of CNC milling of the Inconel 718 alloy. These responses included the MRR, the generated axial force, and the surface roughness obtained. Machinability of austenitic stainless steel AISI 316 under dry circumstances was studied by Mashinini et al. [32] using the Taguchi and grey entropy methods to examine the impacts of cut depth and speed along with feed rate.

The literature study indicates that there are studies investigating the parameters of the CNC milling process using various experimental and computational methodologies. However, there is a scarcity of research employing grey fuzzy algorithm and Taguchi method in CNC pocket milling process. This work aims to integrate the grey fuzzy algorithm with the Taguchi method in the CNC pocket milling process to identify the most critical parameters and address a gap in the existing literature.

For this purpose, the study employed the Taguchi L16 orthogonal array to design experiments for the CNC pocket milling of DIN 1.0038 medium carbon steel. The experimental design was constructed by taking into account the following control factors: depth of cut (d, mm), feed rate (f, mm / rev), cutting speed (V, rpm), and cutting path strategy (p). Then, grey-based fuzzy algorithm combined with Taguchi experimental design was employed to acquire optimal vertical CNC pocket milling parameters for minimum surface roughness (R_a, µm), lowest machining time (t, s), and highest material removal rate (MRR, mm^3/min). Subsequently, the study performed analysis of variance (ANOVA) and confirmation tests in the final phase to evaluate the most significant cutting values, validate the findings, and compare the optimal results with the expected outcomes.

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE AND ANALYTICAL METHOD

2.1. Material and Equipment

The workpiece material was a 180x320x20 mm piece of DIN 1.0038 medium carbon steel plate. Table 1 shows the workpiece's mechanical properties and chemical content (wt.%). Figure 1 illustrates the C-TEK brand CNC vertical machining center that was employed to conduct pocket milling experiments in accordance with the selected parameters. The cutting path strategy is an essential parameter in the manufacture of workpieces that meet specified tolerances and surface quality. As illustrated in Figure 2, two distinct cutting path strategies—zigzag and spiral—were chosen and simulated by the MASTERCAM software. After verifying the simulation results, the experimental phase was accomplished in accordance with the selected parameters.

A surface roughness analyzer (Phynix TR-100) was employed to calculate six surface roughness measurements. Then, the average of these six values was calculated.

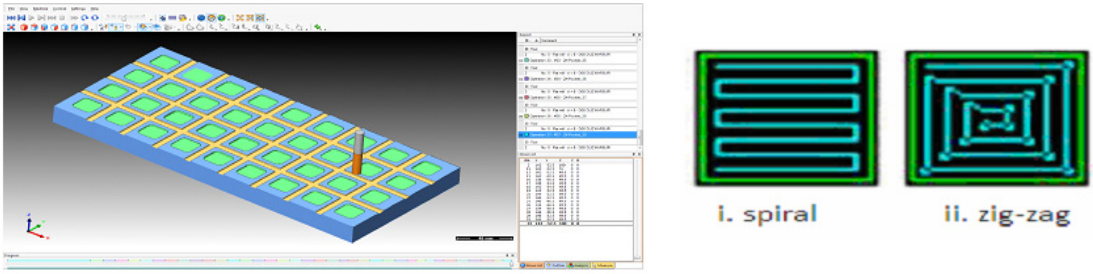
Table 1. Chemical composition (wt.%) and mechanical properties of DIN 1.0038 medium carbon steel

Chemical composition (wt. %)	**C**	**P**	**S**	**Mn**	**Cr**	**Al**	**Si**	**N**
	0.17	0.03	0.04	0.50	0.11	-	0.20	0.008
Mechanical properties	**Yield strength (Mpa)**		**Tensile strength (Mpa)**		**Elongation (%)**		**Vickers hardness (HV)**	
	230		450		26		261	



(a) (b)

Figure 1. (a) CNC vertical machining set-up used for experiments, (b) process of pocket milling



(a) (b)

Figure 2. Simulation images taken from MASTERCAM software, (b) employed cutting path strategies

2.2. Experimental Details and Process Parameters

The essential benefit of Taguchi experimental design is its ability to facilitate the design and execution of necessary experiments with minimal trial requirements [33]. This lowers the quantity of trials, their expenses, and the duration needed. The machining parameters for the CNC pocket milling process were organized using the four level L16 orthogonal design matrix, which comprised 16 sets of coded experimental data. Table 2 presented the input parameters and their respective levels.

Table 2. The variables used in CNC milling and their respective levels

Parameters	**Notation**	**Unit**	**Levels of factors**			
			1	**2**	**3**	**4**
Cutting speed	V	rpm	1000*	1500	2000	2500
Feed rate	f	mm/rev	0.5*	1.0	1.5	2.0
Depth of cut	d	mm	0.5*	0.75	1.0	1.25
Cutting path strategy	p	-	zig-zag*	spiral	-	-

*Initial settings for CNC pocket milling

The formula provided in Equation 1 was employed to calculate the material removal rate [34]:

$$MRR = \frac{f * d_{tool} * V * d * n}{1000} \quad (1)$$

where f: feed rate (mm/rev), d_{tool}: diameter of tool (mm), V: cutting speed (rpm), d: depth of cut (mm), n: flute number.

During the experiments an 8 mm High Speed Steel (HSS) end mill tool with four flutes was employed. To avert tool dullness resulting from elevated temperatures cutting tool was replaced after two successive rounds of each experiment. Compressed air was applied to cool the tool and to remove chips from the pocket milled area. The specified experimental conditions and experimental outcomes for MRR, t, and R_a responses were given in Table 3.

Table 3. Experimental conditions and results

Run no	Process parameters				Experimental results		
	V	f	d	p	R_a (µm)	t (s)	MRR (mm^3/min)
1	1	1	1	1	1.48	16	8
2	1	2	2	1	0.34	11	24
3	1	3	3	2	0.56	9	48
4	1	4	4	2	0.22	9	80
5	2	1	2	2	0.22	16	18
6	2	2	1	2	0.25	11	24
7	2	3	4	1	0.25	9	90
8	2	4	3	1	0.23	10	96
9	3	1	3	1	0.34	15	32
10	3	2	4	1	0.18	11	80
11	3	3	1	2	0.53	10	48
12	3	4	2	2	0.41	9	96
13	4	1	4	2	0.46	17	50
14	4	2	3	2	0.46	11	80
15	4	3	2	1	0.27	10	90
16	4	4	1	1	0.30	9	80

2.3. Grey-Based Fuzzy Method

2.3.1. Grey Relational Analysis

The Grey method theory, initially proposed by Chinese professor Julong Deng in 1989, posits a framework wherein a portion of knowledge remains unclear while the majority is known. In other words, the amount of detail between black and white is implied by the grey method. Although there is no data in the black region, the white region has all the information. One of the subtitles for grey modeling is Grey Relationship Analysis (GRA). Compared to the reference series, each factor in the method defines the degree of interaction between the factors [33].

The first step in this method is called normalization, which considers the translation of measured values from different units. In accordance with the parameters, experimental data is normalized from zero and one. Grey relation method utilizes three types of normalization criterions as follows: 1. Larger the better, 2. Smaller the better, 3. Ideal the better.

The current study demonstrated that the normalized responses of machining time and surface imperfection both adhered to the criterion of "smaller the better," as defined in Equation 2 as [33]:

$$x_i^*(k) = \frac{max\, x_i^0(k) - x_i^0(k)}{max\, x_i^0(k) - min\, x_i^0(k)} \quad (2)$$

Larger the better which was used for normalization calculation of material removal rate could be expressed in Equation 3 as:

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^0(k) - min\, x_i^0(k)}{max\, x_i^0(k) - min\, x_i^0(k)} \quad (3)$$

Equation 4 was used to normalize the series where the aim value of the data sequence was "ideal the better":

$$x_i^*(k) = 1 - \frac{|x_i^0(k) - x_i^0|}{max\, x_i^0(k) - x_i^0} \quad (4)$$

The grey relational coefficient (GRC) is calculated following the normalization phase to ascertain the relationship between the best and real normalized values. Equation 5 determines the Grey relational coefficient (GRC) as [33]:

$$\xi(x_0^*(k),\, x_i^*(k)) = \frac{\Delta_{\min} - \psi\Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \psi\Delta_{\max}} \qquad 0 < \xi(x_0^*(k), x_i^*(k)) \leq 1 \tag{5}$$

The grey relational grade (GRG) quantifies the degree to which the reference and comparability sequences of each factor level are similar. After taking the average of Grey relational coefficients, the Grey relational grade (GRG) $\Gamma(x_0^*, x_i^*)$ for each CNC pocket milling response can be calculated by using Equation 6 as [33]:

$$\Gamma(x_0^*, x_i^*) = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} \xi(x_0^*(k), x_i^*(k)) \tag{6}$$

In these equations, $x_i(k)$ denotes the actual value of the k-th response in experiment i, while $x_i^*(k)$represents the normalized value. x_0 is the ideal target value used in the "ideal-the-better" criterion. The deviation term $\Delta_i(k) = | x_0^*(k) - x_i^*(k) |$, and $\Delta_{\min}$ and $\Delta_{\max}$ denote the minimum and maximum deviation values observed among the experimental runs. The distinguishing coefficient ψ, used to control the closeness of the relational comparison, was assigned a constant value of 0.333 in this study. The parameter $n$represents the number of responses considered (R_a, t, and MRR). A higher GRG value indicates that the related experiment is closer to the optimal combination of machining parameters [35].

2.4. Fuzzy Inference System (FIS) Modeling

The utilization of normalization techniques based on response characteristic performance attributes, such as nominal-the-better, lower-the-better, and higher-the-better in GRA, indicates that the obtained results are subject to some degree of uncertainty. However, this uncertainty can be readily surmounted using fuzzy logic in modeling [36,37]. The grey-fuzzy method was initially developed and implemented by Lin [38]. Fuzzy principles are utilized in replacement of the conventional grey relational grade calculation for grey relational analysis. Two methodologies were utilized to assess the efficacy of the GRG estimation output. The first is the standard GRG function, and the second is the fuzzy inference system (FIS) [37]. To model the CNC milling process in this study, a fuzzy logic system with four inputs and one output was implemented. This system comprised a defuzzifier, inference engine, membership function, fuzzy rules and fuzzifier, as depicted in Figure 3.

As the first step, the membership function is used by the fuzzifier to fuzzify inputs obtained prior to GRG calculations of the responses X_1: GRC for R_a, X_2: GRC for t, X_3: GRC for MRR, and X_4: GRG).

The used membership functions determine how the calculated three GRC inputs (X_1, X_2, X_3 and X_4) and output (Y_0= grey fuzzy reasoning grade, GFRG) values are formed to a value that is between 0 and 1 [37]. In the subsequent phase of the computation, sixteen fuzzy rules for three inputs and one output were established using Equation 7, derived from the results of the inference tests.

Rule 1: if R_a is A_1; t is B_1;and MRR is C_1 then Y_0 is D_1; else
Rule 2: if R_a is A_2; t is B_2;and MRR is C_2 then Y_0 is D_2; else
⋮
Rule n: if R_a is A_n; t is B_n;and MRR is C_n then Y_0 is D_n; else (7)

A_i, B_i, C_i and D_i are the fuzzy subgroups specified by the related membership functions (low, medium, high etc.) such as μA_i, μB_i, μC_i and μD_i. The fuzzy reasoning process is carried out by the inference engine, which utilizes max-min inference, as described in Equation 8, on the selected fuzzy rules in order to get a fuzzified value [37].

$$\mu_{C_0}(Y_0) = \left(\mu_{A_1}(R_a) \wedge \mu_{B_1}(t) \wedge \mu_{C_1}(MRR) \wedge \mu_{D_1}(Y_0)\right) .... \\ \mu_{A_n}(R_a) \wedge \mu_{B_n}(t) \wedge \mu_{C_n}(MRR) \wedge \mu_{D_n}(Y_0)) \tag{8}$$

where ∧ and ∨ is the minimum and maximum operations respectively. Finally, the centroid defuzzification method as presented in Equation 9, was used to transform the fuzzified values to obtain GFRG [37];

$$Y_0 = \frac{\sum Y \mu_{C_0}(Y)}{\sum \mu_{C_0}(Y)} \tag{9}$$

After the fuzzified output value (GFRG) is obtained using the centroid defuzzification method in Equation 9, the next step is to estimate how much improvement can be expected when the optimal machining parameters are applied. To achieve this, the Taguchi confirmation equation was used which was given in Equation 10 as [33];

$$\hat{\gamma} = \gamma_a + \sum_{i=1}^{p} (\bar{\gamma}_o - \bar{\gamma}_a) \tag{10}$$

where γ_a is the total average GFRG, $\bar{\gamma}_o$ is the average GFRG at the optimal level, and p is the design parameter number.

The flowchart of the hybrid Taguchi based grey-fuzzy inference system adopted for this work was illustrated in Figure 4.

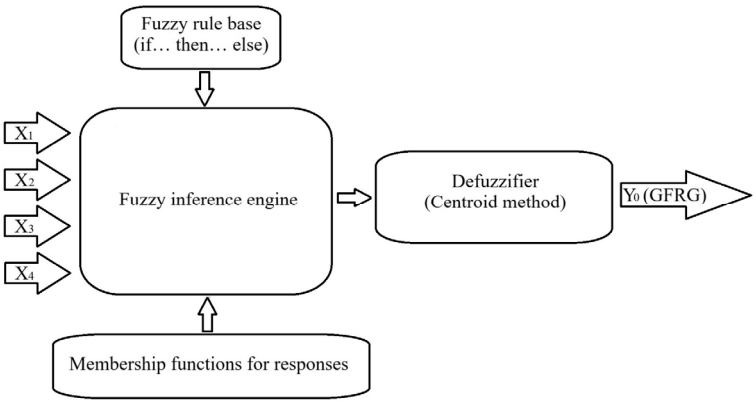


Figure 3. Fuzzy logic system comprised of four-inputs and 1-output

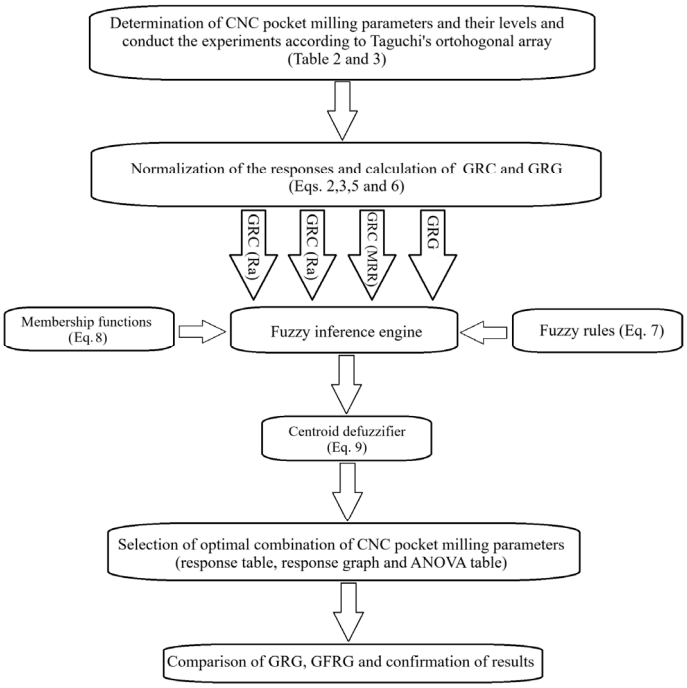


Figure 4. Flowchart illustrating the hybrid Taguchi based grey-fuzzy inference system

3. RESULTS AND DISCUSSION

Table 4 presents the cumulative grey relational grade and grey relational coefficients for each parameter set, as determined by the normalized responses. This table allows identifying which parameter combinations perform better in terms of multi-objective output. A higher GRG value indicates a machining condition closer to the optimal solution. Similar interpretations were reported in recent CNC milling optimization studies [33,37]. In addition, Pinarbasi et al. [39], demonstrated that machining parameters substantially alter surface roughness behavior in milling, supporting the findings of the study.

Table 4. Grey analysis for obtaining GRC and GRG.

Exp. no	Normalization of responses			Δ			Grey relation coefficients (GRC)			Grey relational grade (GRG)
	R_a	t	MRR	R_a	t	MRR	R_a	t	MRR	
1	0.000	0.125	0.000	1.000	0.875	1.000	0.248	0.274	0.248	0.256
2	0.877	0.750	0.182	0.123	0.250	0.818	0.728	0.569	0.287	0.527
3	0.708	1.000	0.455	0.292	0.000	0.545	0.530	1.000	0.377	0.635
4	0.969	1.000	0.818	0.031	0.000	0.182	0.915	1.000	0.645	0.852
5	0.969	0.125	0.114	0.031	0.875	0.886	0.915	0.274	0.271	0.486
6	0.946	0.750	0.182	0.054	0.250	0.818	0.860	0.569	0.287	0.571
7	0.946	1.000	0.932	0.054	0.000	0.068	0.860	1.000	0.829	0.895
8	0.962	0.875	1.000	0.038	0.125	0.000	0.896	0.725	1.000	0.872
9	0.877	0.250	0.273	0.123	0.750	0.727	0.728	0.306	0.312	0.448
10	1.000	0.750	0.818	0.000	0.250	0.182	1.000	0.569	0.645	0.737
11	0.731	0.875	0.455	0.269	0.125	0.545	0.551	0.725	0.377	0.550
12	0.823	1.000	1.000	0.177	0.000	0.000	0.651	1.000	1.000	0.882
13	0.785	0.000	0.477	0.215	1.000	0.523	0.605	0.248	0.387	0.413
14	0.785	0.750	0.818	0.215	0.250	0.182	0.605	0.569	0.645	0.605
15	0.931	0.875	0.932	0.069	0.125	0.068	0.827	0.725	0.829	0.792
16	0.908	1.000	0.818	0.092	0.000	0.182	0.781	1.000	0.645	0.807

The computations for the grey-fuzzy inference system were conducted using the fuzzy logic toolbox in MATLAB. Grey relation coefficients of the responses (X_1: R_a, X_2: t, X_3: MRR and X_4: GRG) create the input part of the grey-fuzzy inference system while Y_0 corresponds GFRG.

Using GRCs as input values allows the fuzzy inference system to evaluate multi-response machining performance instead of considering each output independently. This enables handling contradictory responses (for example, minimizing R_a and t while maximizing MRR), which is not achievable by conventional Taguchi analysis alone [37].

For fuzzy modeling of input and output data, the triangular shaped membership functions (six for R_a, four for t, five for MRR and six for output GFRG), shown in Figure 5, were used. Lowest, low, medium, high, higher and highest linguistic parameters were also used to indicate input and output parameters.

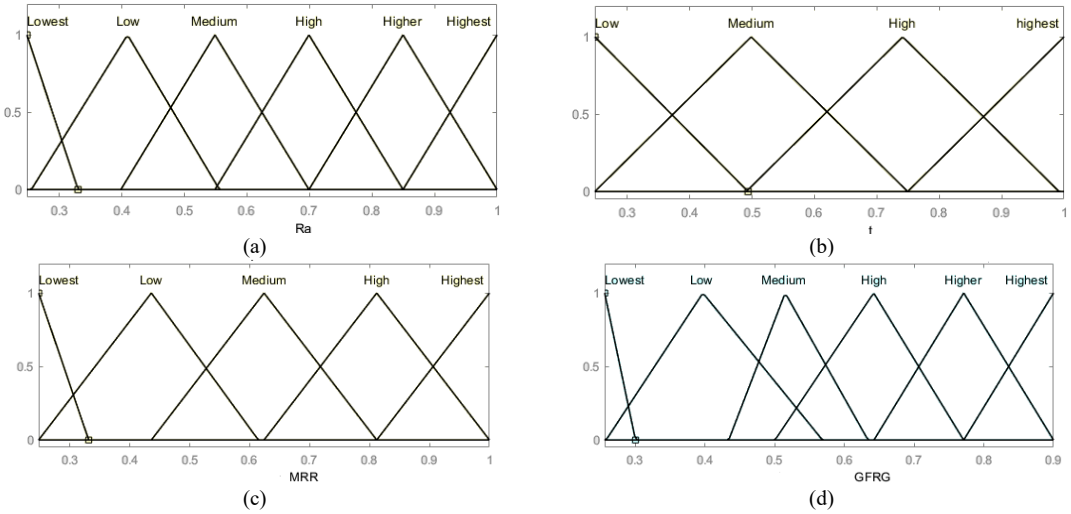


Figure 5. Membership functions used in the fuzzy modeling: (a) R_a, (b) t, (c) MRR, (d) GRG

The grey-fuzzy reasoning and rule display which has GRG of three inputs and GFRG output can be seen in Figure 6 graphically.

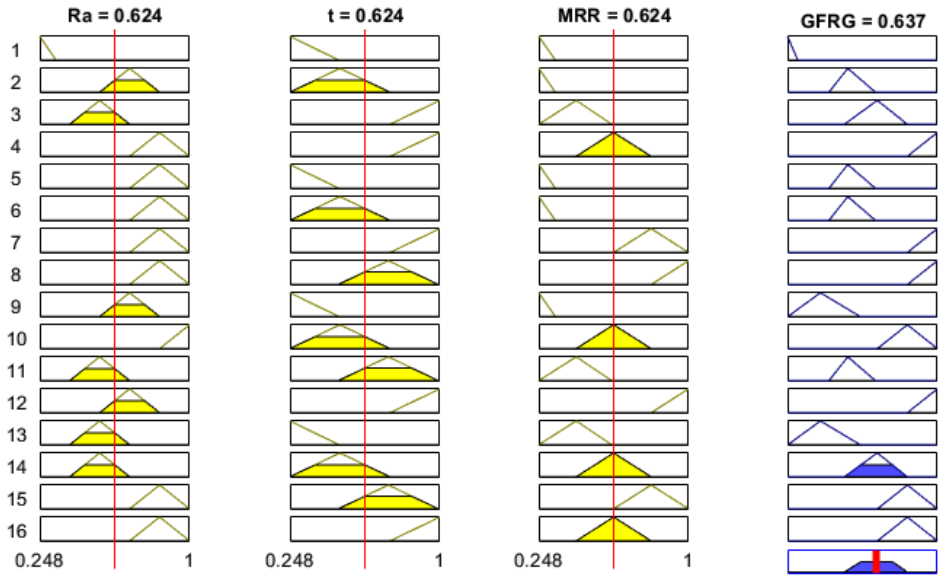


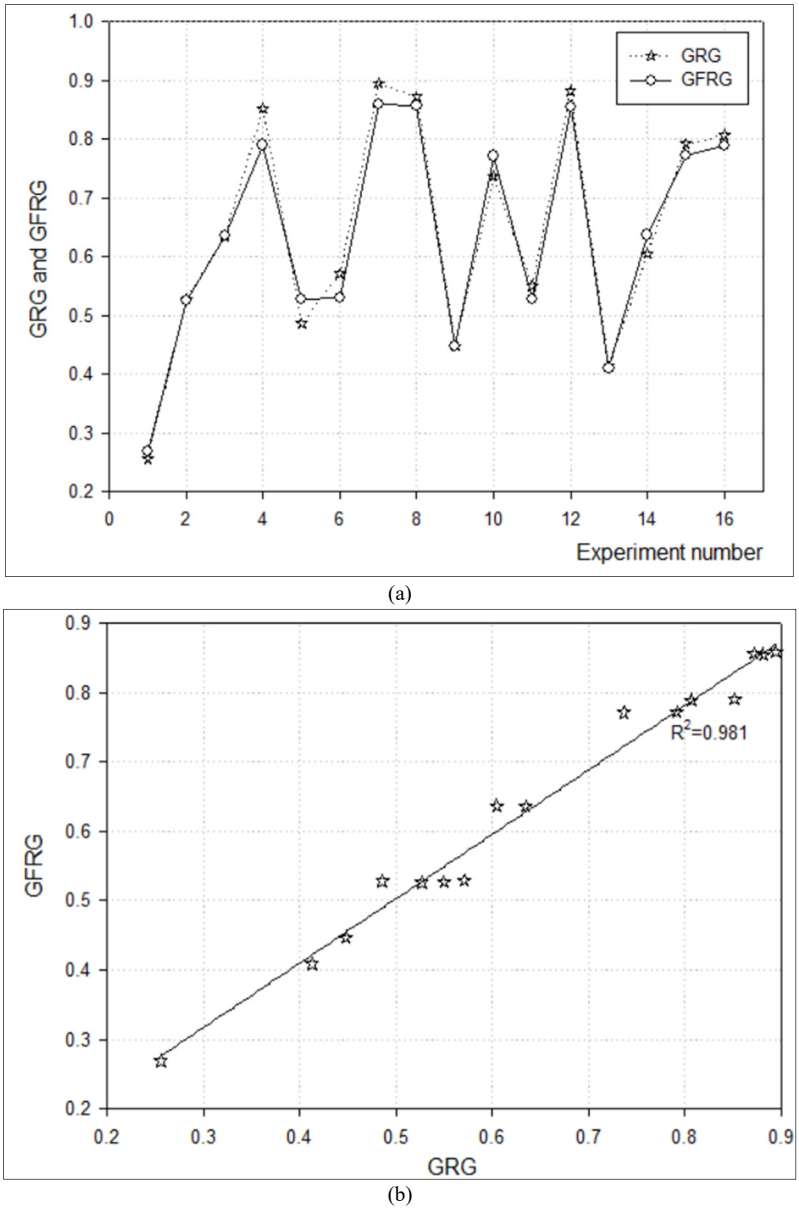
Figure 6. Schematic representation of the grey-fuzzy logic rules

Sixteen rows correspond to sixteen rules and their distribution according to the experiment number. Table 5 displays the GRG and GFRG values calculated for sixteen experiments. Experiment numbers 7 and 8 showed the best multiple output characteristics for CNC milling process with the maximum GFRG. The gray-fuzzy computations yielded a total average percentage error of 3.63 percent between the GRG and GFRG. Pandey and Panda [37] reported that hybrid fuzzy-based grey analysis typically produces a prediction error of 4–6%. This low error confirms the consistency of the grey-fuzzy inference predictions.

Table 5. GRG and GFRG comparison

Experiment no	Grey relational grade (GRG)	Grey-fuzzy reasoning grade (GFRG)	Rank	Absolute error (%)
1	0.256	0.269	16	5.084
2	0.527	0.526	13	0.472
3	0.635	0.636	9	0.389
4	0.852	0.790	4	7.297
5	0.486	0.528	11	8.902
6	0.571	0.529	10	7.270
7	0.895	0.859	1	4.053
8	0.872	0.856	2	1.867
9	0.448	0.447	14	0.258
10	0.737	0.771	7	4.640
11	0.550	0.527	12	3.899
12	0.882	0.855	3	3.005
13	0.413	0.409	15	0.986
14	0.605	0.637	8	5.349
15	0.792	0.772	6	2.520
16	0.807	0.789	5	2.190
Average percentage error=3.63 %				

The robust association between GRG and GFRG was shown by a high correlation value of R^2=0.981, as seen in Figures 7 (a) and (b). This also proved the constructed hybrid grey-fuzzy model well suited to the process. The strong linear correlation verifies that the fuzzy-enhanced GRG does not distort the decision ranking; instead, it refines it. High R^2 values were likewise observed by Pinarbaşı et al. [39], confirming that fuzzy-infused grey methods effectively model machining performance.



(a)

(b)

Figure 7. Correlation of; (a) GRG and GFRG vs experiment number and (b) GRG vs GFRG

In addition, Table 6 displayed the response table for the average GFRG of each parameter, indicating that higher GFRG values are associated with optimum parameter combination [35,37].

Delta statistics, which are defined as the disparity between the highest and lowest values, quantify the relative size of each effect. The feed rate had the highest delta value at rank 1, followed by the depth of cut at rank 2, which had the second highest delta factor, as determined by delta values. Cutting speed and cutting path strategy were ranked 3 and 4, respectively. This means that feed rate has the strongest contribution to overall process performance, A similar dominance of feed rate on surface roughness was also reported by Demirdogen et al. [40].

In Figure 8, the parameter's graphical response was visually represented. The correlations between the parameter and response of the output were seen to be directly proportional to the slope of the response graph [35,37]. As previously stated, the optimum process condition pertained to the cutting speed of level 2, feed rate of level 4, depth of cut of level 4, and cutting path strategy of level 1, as shown by the maximum value of the GFRG above the dashed line ($V_2f_4d_4p_1$). The optimum parameter set not only yielded minimum Ra (0.36 µm) but also increased productivity (MRR = 120 mm³/min) and reduced machining time (10 s), thereby improving machining economics.

To assess the important factors and the impact they had on the GFRG, ANOVA was carried out. The Fisher's F ratio was employed during the analysis to evaluate the parameter's influence on the output responses [33,35,37]. The ANOVA summary was given in Table 7. The feed rate was determined to have the greatest impact on the multi output characteristics, accounting for 70.00% of the overall effect. Following that, the depth of cut, cutting speed, and cutting path strategy ranked as the second, third, and fourth most influential factors, respectively, on the surface roughness, machining time, and material removal rate of CNC pocket milling. Furthermore, the F test ratio in Table 7 yielded the same contribution order. This factor ranking is consistent with recent studies, which showed that increased feed rate significantly increases material removal due to a direct rise in chip thickness and tool-workpiece engagement [39,40].

Table 6. Response table representation for GFRG

Parameters	Grey relational grade					
	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Delta=max-min	Rank
V	0.555	0.693	0.650	0.651	0.137	3
f	0.413	0.615	0.698	0.822	0.409	1
d	0.528	0.670	0.644	0.707	0.178	2
p	0.661	0.613	-	-	0.047	4
Total mean Grey relational grade= 0.637						

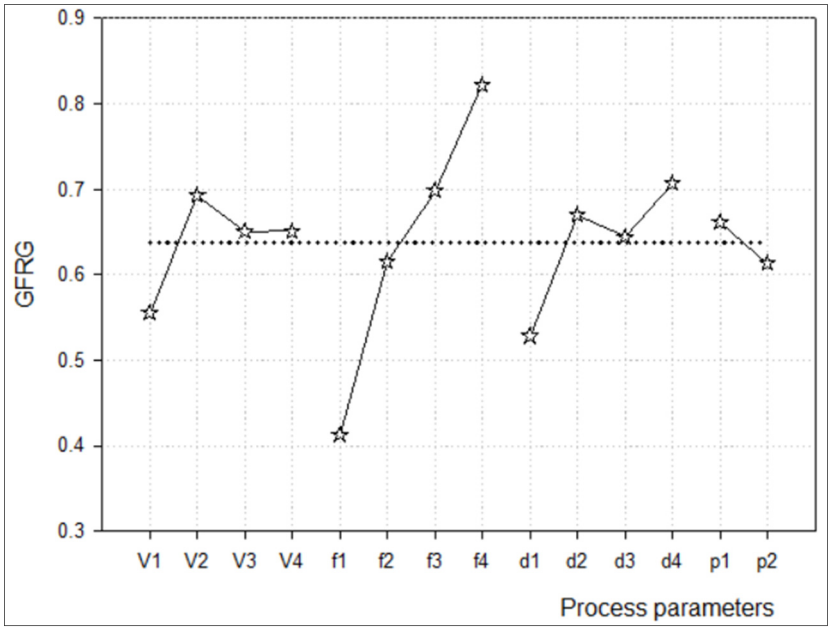


Figure 8. GFRG response plot of CNC parameters

Table 7. ANOVA for GFRG

Parameters	Degree of freedom	Sum of square	Mean Square	F	Contribution (%)
V	3	0.0408	0.0136	2.97	8.051
F	3	0.3548	0.1182	25.81	70.008
D	3	0.0714	0.0238	5.20	14.088
P	1	0.0089	0.0089	1.95	1.756
Residual	5	0.0309	0.0045	-	6.097
Total	15	0.5068	-	-	100
S=0.0676 R-Sq=95.41% R-Sq (adj)=86.22%					

The concluding phase of this study was conducting a confirmation test at the optimal parameter combination level ($V_2f_4d_4p_1$) to validate the improvement in process responses and the success of the best CNC pocket milling condition. The confirmation test results were given in Table 8.

The confirmatory test indicated that the anticipated GFRG at the optimal configuration ($V_2f_4d_4p_1$) was 0.97, while the GFRG obtained from the experimental analysis was 0.85. Both values exceeded the GFRG obtained at the initial factor configuration of 0.26. Therefore, the fact that the hybrid grey-fuzzy logic yielded a benefit of 0.59 in GFRG indicated that it may be efficiently used to optimize multiple variables in the CNC milling, aligning with the findings of Pandey and Panda [37].

Table 8. Confirmatory test results

		Optimal process condition	
	Initial factor settings	**Prediction**	**Experiment**
Parameter levels	$V_1f_1d_1p_1$	$V_2f_4d_4p_1$	$V_2f_4d_4p_1$
R_a (µm)	1.48		0.36
t (s)	16		10
MRR (mm^3/min)	8		120
Grey-fuzzy reasoning grade (GFRG)	0.26	0.97	0.85
Improvement in GFRG=0.59			

4. CONCLUSIONS

In this study, a hybrid Taguchi–Grey–Fuzzy optimization approach was applied to the CNC pocket milling of DIN 1.0038 medium-carbon steel to improve surface quality, reduce machining time, and increase material removal rate. Taguchi's structured experimental design was integrated with Grey Relational Analysis and fuzzy inference. This integration provided to handle multiple different responses simultaneously. Furthermore, it enabled the identification of the most effective machining parameter combination with fewer experimental trials. Based on the analysis that has been completed, it is possible to derive the conclusions that follow;

i. Hybrid Taguchi-based grey-fuzzy logic algorithm and its utilization has the potential to significantly improve machining time, material removal rate and surface roughness of the CNC pocket milling process. The study revealed a clear improvement in multi-response performance, simultaneously minimizing surface roughness and machining time while maximizing material removal rate. This situation is an important outcome that conventional single-objective optimization methods cannot provide.

ii. ANOVA revealed that feed rate was the most dominant parameter, contributing ≈70% to performance variation, followed by depth of cut, cutting speed, and cutting path strategy. This ranking aligns with previous machining studies emphasizing that feed rate has the strongest effect on chip load, productivity, and generated surface finish.

iii. The optimum cutting parameter combination was determined as V_2–f_4–d_4–p_1, corresponding to 1500 rpm cutting speed, 2.0 mm/rev feed rate, 1.25 mm depth of cut, and zig-zag toolpath strategy. Under these conditions, the process achieved a surface roughness of 0.36 µm, machining time of 10 s, and material removal rate of 120 mm^3/min, representing a substantial improvement from the initial setup.

The confirmation test validated the improvement achieved by the hybrid optimization strategy, increasing the grey-fuzzy reasoning grade from 0.26 (initial condition) to 0.85 (optimal condition), with a predicted value of 0.97, demonstrating the robustness and predictability of the developed approach.

5. REFERENCES

1. Ozturk, B. & Kara, F. (2020). Calculation and estimation of surface roughness and energy consumption in milling of 6061 alloy. *Advances in Materials Science and Engineering, 2020*(1), 5687951.

2. Traini, E., Bruno, G. & Lombardi, F. (2020). Tool condition monitoring framework for predictive maintenance: a case study on milling process. *International Journal of Production Research, 59*(23), 7179-7193.

3. Liu, Q., Chen, X., Liu, K., Cristino, V.A.M., Lo, K., Xie, Z., Guo, D., Tam, L. & Kwok, C. (2024). Influence of processing parameters on microstructure and surface hardness of hypereutectic Al-Si-Fe-Mg alloy via friction stir processing. *Coatings, 14*(2), 222.

4. Viswanathan, R., Ramesh, S., Maniraj, S. & Subburam, V. (2020). Measurement and multi-response optimization of turning parameters for magnesium alloy using hybrid combination of Taguchi-GRA-PCA technique. *Measurement, 159*, 107800.

5. Bien, D.X. (2023). Predictive modeling of surface roughness in hard turning with rotary cutting tool based on multiple regression analysis, artificial neural network, and genetic programing methods. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, *238*(1-2), 137-150.

6. Yang, H., Zheng, H. & Zhang, T. (2024). A review of artificial intelligent methods for machined surface roughness prediction. *Tribology International, 199*, 109935.

7. Gologlu, C. & Sakarya, N. (2008). The effects of cutter path strategies on surface roughness of pocket milling of 1.2738 steel based on Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology, 206*(1-3), 7-15.

8. Deng, C., Miao, J., Ma, Y., Wei, B. & Feng, Y. (2019). Reliability analysis of chatter stability for milling process system with uncertainties based on neural network and fourth moment method. *International Journal of Production Research, 58*(9), 2732-2750.

9. Chen, J., Lin, J., Zhang, M. & Lin, Q. (2024). Predicting surface roughness in turning complex-structured workpieces using vibration-signal-based gaussian process regression. *Sensors, 24*(7), 2117.

10. Nguyen, A.T., Nguyen, V.H., Le, T.T. & Nguyen, N.T. (2022). Multiobjective optimization of surface roughness and tool wear in high-speed milling of AA6061 by machine learning and NSGA-II. *Advances in Materials Science and Engineering, 2022*(1), 5406570.

11. Zhang, Y., Xie, M., He, Y. & Han, X. (2022). Capability-based remaining useful life prediction of machining tools considering non-geometry and tolerancing features with a hybrid model. *International Journal of Production Research, 61*(21), 7540-7556.

12. Trinh, V.L. (2024). A review of the surface roughness prediction methods in finishing machining. *Engineering, Technology & Applied Science Research, 14*(4), 15297-15304.

13. Shagwira, H., Mbuya, T.O., Akinlabi, E.T., Mwema, F.M. & Tanya, B. (2021). Optimization of material removal rate in the CNC milling of polypropylene+ 60 wt% quarry dust composites using the Taguchi technique. *Materials Today: Proceedings, 44*, 1130-1132.

14. Lu, B. & Luo, Y. (2024). A dynamic condition-based maintenance policy for heterogeneous-wearing tools with considering product quality deterioration. *International Journal of Production Research, 62*(19), 7096-7113.

15. Ko, J.H. & Yin, C. (2025). A review of artificial intelligence application for machining surface quality prediction: From key factors to model development. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1-24.

16. Yang, J., Zhang, Y., Huang, Y., Lv, J. & Wang, K. (2022). Multi-objective optimization of milling process: Exploring trade-off among energy consumption, time consumption and surface roughness. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 36*(2), 219-238.

17. Kar, T., Mandal, N.K. & Singh, N.K. (2020). Multi-response optimization and surface texture characterization for CNC milling of Inconel 718 alloy. *Arabian Journal for Science and Engineering, 45*(2), 1265-1277.

18. Kechagias, J.D., Aslani, K.E., Fountas, N.A., Vaxevanidis, N.M. & Manolakos, D.E. (2020). A comparative investigation of Taguchi and full factorial design for machinability prediction in turning of a titanium alloy. *Measurement, 151*, 107213.

19. Yalcin, U., Karaoglan, A.D. & Korkut, I. (2013). Optimization of cutting parameters in face milling with neural networks and Taguchi based on cutting force, surface roughness and temperatures. *International Journal of Production Research, 51*(11), 3404-3414.

20. Chandrasekaran, M., Muralidhar, M., Krishna, C.M. & Dixit, U.S. (2009). Application of soft computing techniques in machining performance prediction and optimization: A literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 46*(5-8), 445-464.

21. Isik, U., Demir, H. & Ozlu, B. (2025). Multi-objective optimization of process parameters for surface quality and geometric tolerances of AlSi10Mg samples produced by additive manufacturing method using taguchi-based gray relational analysis. *Arabian Journal for Science and Eng*ineering*, 50*(12), 9211-9229.

22. Mantle, A. & Aspinwall, D. (2001). Surface integrity of a high speed milled gamma titanium aluminide. *Journal of Materials Processing Technology, 118*(1-3), 143-150.

23. Benardos, P.G. & Vosniakos, G.C. (2002). Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi's design of experiments. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 18*(5-6), 343-354.

24. Ertekin, Y.M., Kwon, Y. & Tseng, T. (2003). Identification of common sensory features for the control of CNC milling operations under varying cutting conditions. *International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43*(9), 897-904.
25. Paris, H., Peigne, G. & Mayer, R. (2004). Surface shape prediction in high speed milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture, 44*(15), 1567-1576.
26. Franco, P., Estrems, M. & Faura, F. (2004). Influence of radial and axial runouts on surface roughness in face milling with round insert cutting tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture, 44*(15), 1555-1565.
27. Shamsuddin, K.A., Ab-Kadir, A.R. & Osman, M.H. (2013). A Comparison of milling cutting path strategies for thin-walled aluminium alloys fabrication, *The International Journal of Engineering and Science, 2*(3),1-8.
28. Ali, R.A., Mia, M., Khan, A.M., Chen, W., Gupta, M.K. & Pruncu, C.I. (2019). Multi-response optimization of face milling performance considering tool path strategies in machining of Al-2024. *Materials, 12*(7), 1013.
29. Asadi, R., Yeganefar, A. & Niknam, S.A. (2019). Optimization and prediction of surface quality and cutting forces in the milling of aluminum alloys using ANFIS and interval type 2 neuro fuzzy network coupled with population-based meta-heuristic learning methods. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 105*(5-6), 2271-2287.
30. Bawono, B., Anggoro, P., Bayuseno, A., Jamari, J. & Tauviqirrahman, M. (2019). Milling strategy optimized for orthotics insole to enhance surface roughness and machining time by Taguchi and response surface methodology. *Journal of Industrial and Production Engineering, 36*(4), 237-247.
31. Daniel, S.A.A., Pugazhenthi, R., Kumar, R. & Vijayananth, S. (2019). Multi objective prediction and optimization of control parameters in the milling of aluminium hybrid metal matrix composites using ANN and Taguchi-grey relational analysis. *Defence Technology, 15*(4), 545-556.
32. Mashinini, P.M., Soni, H. & Gupta, K. (2019). Investigation on dry machining of stainless steel 316 using textured tungsten carbide tools. *Materials Research Express, 7*(1), 016502.
33. Datta, S., Bandyopadhyay, A. & Pal, P.K. (2008). Grey-based Taguchi method for optimization of bead geometry in submerged arc bead-on-plate welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 39*(11-12), 1136-1143.
34. Abdulrazaq, M.M., Jaber, A.S., Hammood, A.S. & Abdulameer, A.G. (2019). Optimization of machining parameters for MRR and surface roughness for 7024 AL-alloy in pocket milling process. *Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences, 26*(1), 10-16.
35. Esme, U., Kulekci, M.K., Ustun, D., Kahraman, F. & Kazancoglu, Y. (2015). Grey-based fuzzy algorithm for the optimization of the ball burnishing process. *Materials Testing, 57*(7-8), 666-673.
36. Kumar, R., Khepar, J., Yadav, K., Kareri, E., Alotaibi, S.D., Viriyasitavat, W., Gulati, K., Kotecha, K. & Dhiman, G. (2022). A systematic review on generalized fuzzy numbers and its applications: past, present and future. *Archives of Computational Methods in Engineering, 29*(7), 5213-5236.
37. Pandey, R.K. & Panda, S. (2014). Optimization of bone drilling parameters using grey-based fuzzy algorithm. *Measurement, 47*, 386-392.
38. Lin, C.L. (2004). Use of the Taguchi method and grey relational analysis to optimize turning operations with multiple performance characteristics. *Materials and Manufacturing Processes, 19*(2), 209-220.
39. Pınarbasi, A., Kulekci, M.K., Boga, C. & Esme, U. (2020). Optimization of the effect of processing parameters on surface roughness and cutting energy in CNC milling of Al-7075 material. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 35*(2), 345-356.
40. Demirdogen, M.F., Kilic, S. ve Ozturk, F. (2022). Yüzey pürüzlülüğünün tahmininde farklı yöntemlerin incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37*(2), 531-542.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 1 MART/MARCH 2026

Air Pollution from Transport Sector: Evaluation of Emissions in Yozgat Province

Nevfel Yunus COŞKUN [1,a], **Zeki YILBAŞI** [2,b], **Murat Kadir YEŞİLYURT** [3,c]

[1] *Yozgat Bozok University, Sorgun Vocational Schools, Yozgat, Türkiye*
[2] *Yozgat Bozok University, Yozgat Vocational Schools, Yozgat, Türkiye*
[3] *Yozgat Bozok University, Faculty of Engineering and Architecture, Yozgat, Türkiye*

[a]***ORCID***: *0000-0002-0464-3818;* [b]***ORCID***: *0000-0002-5906-3538;* [c]***ORCID***: *0000-0003-0870-7564*

Article Info
Received : 17.06.2025
Accepted : 30.01.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1721137

Corresponding Author
Nevfel Yunus COŞKUN
nevfelyunus.coskun@bozok.edu.tr

Keywords
Air quality
Internal combustion engines
Emissions
Sustainable transport
Energy

How to cite: *COŞKUN, N.Y., YILBAŞI, Z., YEŞİLYURT, M.K., (2026). Air Pollution from Transport Sector: Evaluation of Emissions in Yozgat Province. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(1), 129-144.*

ABSTRACT

In this study, vehicle-related emissions in Yozgat province were quantified and their impacts on air quality were analyzed. Emission calculations were performed based on traffic density and vehicle categories using data obtained from the General Directorate of Highways, and the resulting estimates were compared with data from the National Air Quality Monitoring Network. Within the scope of the study, road transport–related emissions of CO, NO_x, VOC, and PM in Yozgat province were calculated according to road segments and vehicle types, revealing that emission levels exhibit spatial variations depending on traffic intensity and route characteristics. The findings indicate that gasoline-powered vehicles contribute more significantly to CO and VOC emissions, whereas diesel-powered light commercial vehicles and buses are the primary sources of NO_x and PM emissions. Consequently, promoting the use of alternative fuels and improving public transportation systems are recommended in order to reduce vehicle-related pollution.

Ulaşım Sektöründen Kaynaklanan Hava Kirliliği: Yozgat İlinde Emisyonların Değerlendirilmesi

Makale Bilgileri
Geliş : 17.06.2025
Kabul : 30.01.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1721137

Sorumlu Yazar
Nevfel Yunus COŞKUN
nevfelyunus.coskun@bozok.edu.tr

Anahtar Kelimeler
Hava kalitesi
İçten yanmalı motorlar
Emisyonlar
Sürdürülebilir ulaşım
Enerji

Atıf şekli: *COŞKUN, N.Y., YILBAŞI, Z., YEŞİLYURT, M.K., (2026). Ulaşım Sektöründen Kaynaklanan Hava Kirliliği: Yozgat İlinde Emisyonların Değerlendirilmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(1), 129-144.*

ÖZ

Bu çalışmada, Yozgat ilindeki araç kaynaklı emisyonlar belirlenmiş ve bunların hava kalitesi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Emisyon hesaplamaları, Karayolları Genel Müdürlüğü verileri kullanılarak trafik yoğunluğu ve araç türlerine göre yapılmış ve elde edilen değerler Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı verileriyle karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında, Yozgat ilinde karayolu taşımacılığından kaynaklanan CO, NO_x, VOC ve PM emisyonları yol kesimi ve araç türü bazında hesaplanmış; emisyonların trafik yoğunluğu ve güzergâh özelliklerine bağlı olarak mekânsal farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir. Benzinli araçların CO ve VOC emisyonlarının yüksek olduğu, dizel hafif ticari araçlar ve otobüslerin ise NO_x ve PM emisyonlarının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, araç kaynaklı kirliliği azaltmak için alternatif yakıtların kullanımının teşvik edilmesi ve toplu taşıma sistemlerinin iyileştirilmesi önerilmektedir.

1. INTRODUCTION

Air pollution has become an increasingly serious environmental problem at both global and local scales due to increasing industrialization, urbanization, and the use of fossil fuels. Especially in large cities with high traffic density, air pollutants emitted from various sources pose serious threats to public health and the environment [1,2]. Pollutants such as PM, NOx, and ozone cause health problems like respiratory diseases and heart conditions while also increasing the risk of premature death. Air pollution not only affects public health but also reduces agricultural production, damages ecosystems, and contributes to climate change. This situation has made it imperative to take measures to monitor and improve air quality [3,4].

Air pollution in Turkey is a critical issue, particularly in large cities and industrial areas. In provinces with high traffic density, exhaust emissions and fossil fuel use are among the main factors negatively affecting air quality. The National Air Quality Monitoring Network (UHKIA), established by the Ministry of Environment, Urbanization, and Climate Change, serves as a crucial tool for monitoring air quality nationwide and implementing necessary measures [5,6]. Based on the data obtained from this network, measures such as industrial emission control, traffic regulations, and the promotion of renewable energy sources are being implemented. However, even in regions with relatively low air pollution compared to major industrial centers, traffic-related emissions, fossil fuel use, and field burning have the potential to negatively impact air quality. Therefore, measures taken at the local level in different regions of Turkey must be supported by sustainable environmental policies [7,8].

Table 1. Literature review

Authors	Methodology	City/ area	Common highlighted elements	Conclusion
Cuci & Polat [9] (2015)	Use of emission factors and activity data	Gaziantep	Traffic density, industrial zones	NO_x emissions below the limit values; organized industrial zone and city center are high pollution zones
Yakın & Behçet [10] (2019)	Emission inventory according to EMEP/EEA guidelines	Van	Fuel consumption and traffic impacts	CO: 442.78 tons/year, NO_x: 83.01 tons/year. Fossil fuel use increases air pollution.
Behçet & Yakın [11] (2020)	Emission inventory (CO, NO_x, PM, VOC)	Malatya	Alternative fuels and reducing vehicle density	CO: 768.22 tons/year, NO_x: 153.73 tons/year. Alternative fuel use is recommended.
Yakın [12] (2022)	Vehicle counts and emission calculations	Ağrı	Use of alternative energy sources	CO: 455.24 tons/year. Promotion of electric vehicles is recommended.
Çetin et al. [13] (2025)	EMEP/EEA 2023 Tier-1 emission inventory; Annual Average Daily Traffic data from the General Directorate of Highways; fuel distribution statistics from the Turkish Statistical Institute	Turkey (state highways; provincial level)	Temporal variation of road transportation–related emissions, contribution rates by vehicle types, and spatial concentration of emissions	It was determined that emissions originating from road transportation have increased over the years, with heavy-duty vehicles dominating NO_x and PM emissions, while passenger cars are the primary contributors to CO emissions. The Tier-1 approach provides a suitable basis for emission assessments at the provincial level.
Zhu et al. [14] (2025)	Field measurements; entropy-weighted evaluation method; VOC composition and reactivity analysis	An industrial city in the North China Plain	Sector-specific VOC emissions, chemical composition, and ozone and secondary aerosol formation potential	It was revealed that industrial VOC emissions exhibit significant differences across sectors, and that the petrochemical and pharmaceutical sectors are particularly critical in terms of air quality and health risks.
İbik & Öztürk [15] (2025)	IPCC Tier-1 method; long-term transportation activity and fuel consumption data	Ankara	Temporal variation of road transportation–related CO_2 emissions and the influence of fuel types	It was determined that road transportation–related CO_2 emissions have increased rapidly, and that diesel-fueled vehicles play a decisive role in total emissions. Investments in public transportation and integrated transportation policies are recommended for emission reduction.

An examination of the studies presented in Table 1 shows that road transportation–related emissions in Turkey have been assessed across different cities and regions using various methodologies. In the study conducted in Gaziantep, the impacts of traffic density and industrial areas on air quality were emphasized [9], while emission inventory studies carried out in Van and Malatya revealed the decisive roles of fuel consumption, vehicle type distribution, and traffic activities on emissions [10,11]. In the study focusing on Ağrı province, calculations based on vehicle counts indicated the prominence of passenger car–related CO emissions [12]. A recent nationwide study demonstrated that emissions originating from road transportation exhibit pronounced spatial variations at the provincial level and that heavy-duty vehicles dominate NO_x and PM emissions [13]. Research conducted specifically for Ankara also shows that road transportation–related CO_2 emissions have exhibited a rapid increasing trend over time and that diesel vehicles account for a high share of total emissions [15].

While the existing literature has predominantly focused on metropolitan areas, industrially intensive regions, or major transportation corridors, it is noteworthy that detailed road emission inventory studies targeting medium-sized provinces with relatively lower traffic volumes remain limited. Unlike previous studies conducted in provinces such as Gaziantep, Van, Malatya, Ankara, and Ağrı, this study addresses road transportation–related emissions in a medium-sized province such as Yozgat, rather than in large metropolitan areas characterized by high traffic volumes and industrial intensity, and examines emissions in detail on the basis of road segments and vehicle types; in this respect, it provides a complementary contribution to the existing literature in Turkey from both spatial and methodological perspectives. Accordingly, the primary objective of this study is to determine CO, NO_x, VOC, and PM emissions originating from road transportation in Yozgat province and to reveal the relationship between these emissions and traffic intensity. For this purpose, emissions were calculated on the basis of road segments and vehicle types using traffic volume data obtained from the General Directorate of Highways, and the EMEP/EEA 2023 Tier-1 emission factors were adopted in the calculations. Within the scope of the findings, CO, NO_x, VOC, and PM emissions originating from road transportation in Yozgat province were calculated according to road segments and vehicle types, and daily emission values for each road segment were obtained in tabular and graphical form. It is considered that the dataset and calculation approach developed within the framework of this study can be used in further analyses aimed at evaluating road transportation–related emissions at the provincial scale.

2. METHOD

In this study, CO, NO_x, VOC and PM emissions were calculated by taking into account the average traffic volume data on KGM state roads of Yozgat province for the year 2023 and the distribution of motor vehicles registered in Yozgat province according to their types. The calculations were carried out using the emission factors published by EEA and the values obtained were compared with the emission data of Yozgat province for the year 2023 in the UHKIA data bank. In this way, it is aimed to evaluate the impacts of vehicle emissions on the existing air quality in the region.

The road network of Yozgat province varies according to surface types and has a total network length of 1179.2 kilometers. Of this network, 1106.9 kilometers consist of asphalt roads, of which 402.4 kilometers are classified as asphalt concrete and 704.5 kilometers as surface coating. Provincial roads have a larger share than state roads with a length of 671.3 kilometers. Paved roads are 12 kilometers in total, while stabilized and dirt roads are almost non-existent. However, the total length of other roads is 59.3 kilometers and is concentrated especially on provincial roads [16]. Considering these data, Yozgat province is a province where the road infrastructure is largely composed of asphalt roads and the road quality is at a high level due to its location in the middle intersection points of Turkey [16,17].

The map presented in Figure 1 shows the highway network of Yozgat province and the connections between the districts. When the map is examined, it is seen that there are main arteries providing road transportation between different districts of the province. Yozgat province center is an important center of transportation within the province and consists of Akdağmadeni, Aydıncık, Boğazlıyan, Çandır, Çayıralan, Çekerek, Kadışehri, Saraykent, Sarıkaya, Sorgun, Şefaatli, Yenifakılı, Yerköy districts [16,17].

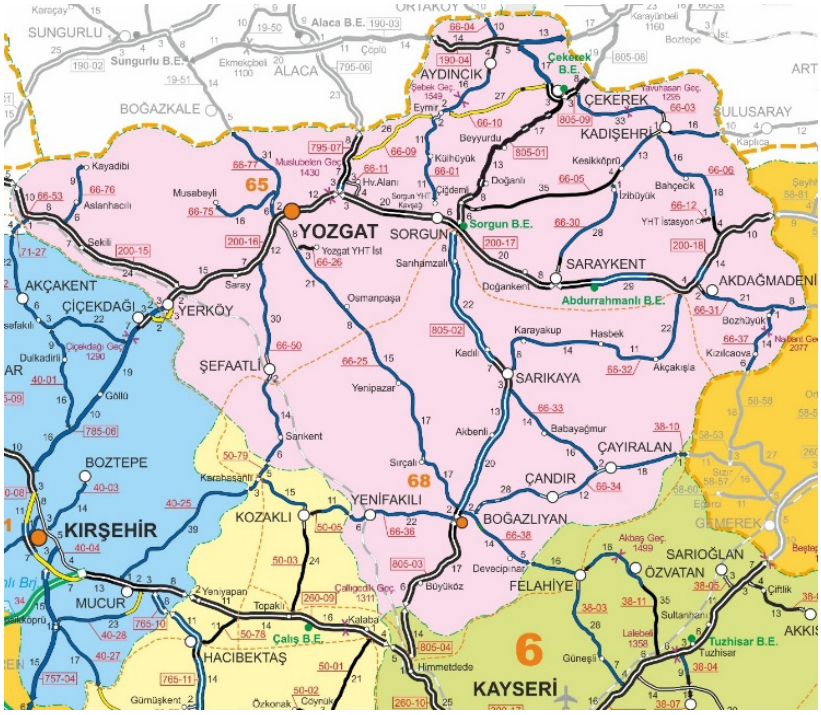


Figure 1. Highways map of Yozgat province [16]

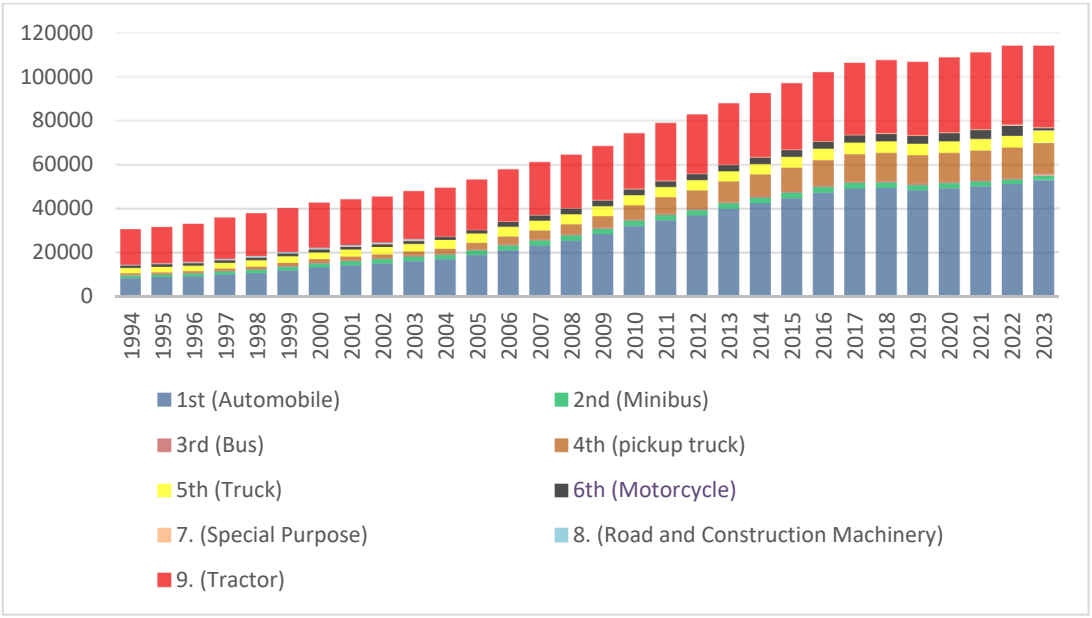


Figure 2. Number of motor vehicles of Yozgat province by vehicle types for the years 1994-2023 [18]

The graph shows the change in the number of motor vehicles in Yozgat between 1994-2023. When the data is analyzed, it is observed that different types of vehicles tend to increase numerically over time. Although it is seen that the automobile category has a significant share over the years, the number of tractors has also increased over time. The number of commercial and freight vehicles such as minibuses, buses, trucks and pickup trucks has also been on an upward trend, albeit fluctuating in certain years. It is also observed that the number of motorcycles has been increasing especially since 2010s [18].

An analysis of the graph for special-purpose vehicles, motor vehicles manufactured to carry people or goods for special purposes and used for special purposes such as fire brigade, lifeguard, funeral, radio, cinema, television, library, research vehicles and towing, transporting or lifting broken or damaged vehicles, shows that the share of such vehicles in the total number of vehicles is lower compared to other categories [18].

Table 2. Number of vehicles registered in Yozgat province in 2023 according to vehicle types [18]

Automobile	Minibus	Bus	Pickup truck	Truck	Motorcycle	Special purpose	Tractor
52936	2074	562	14336	5528	1111	407	37140

The number of vehicles registered in Yozgat province in 2023 according to vehicle types is presented in Table 2. When the data are analyzed, it is seen that automobiles and tractors have the largest share in the total number of vehicles. Light commercial vehicles and trucks also have a significant share, showing the role of freight transportation and commercial activities in urban and intercity transportation. The share of motorcycles and special purpose vehicles in the total number of vehicles is relatively lower [18].

Based on the total numbers of passenger cars (52.936), motorcycles (1.111), and light commercial vehicles (minibus: 2,074; pickup: 14.336) reported in Table 2, the composition of the light-duty vehicle fleet in Yozgat was derived. The share of motorcycles within the light-duty vehicle fleet was determined to be 1,58%. The remaining passenger cars were distributed according to fuel type based on the Turkish Statistical Institute (TURKSTAT) 2023 vehicle fuel-type proportions (33% gasoline, 48,2% diesel, and 18,5% LPG); LPG-fueled vehicles were assumed to have emission characteristics similar to gasoline vehicles and were therefore included in the gasoline category. Vehicles in the Diesel Light Commercial group were determined by considering the proportional distribution of diesel passenger cars according to TURKSTAT fuel statistics and the number of minibuses (diesel light commercial vehicles) reported in Table 2. The numbers of buses, trucks, and truck–trailer combinations were directly taken from the annual average daily traffic (AADT) values presented in Table 6, and separate emission factors were applied for each vehicle category. No fuel-type differentiation was made for these groups, and all buses, trucks, and truck–trailer combinations were assumed to be diesel-powered.

In the emission calculations, based on the updated data provided in the EMEP/EEA 2023 guidelines, the Tier 1 method relies on the product of the vehicle-category-specific emission factor for each pollutant (g pollutant/kg fuel) and the typical fuel consumption (g fuel/km). Within this approach, total emissions are obtained by multiplying the emission values per kilometer by the number of vehicles and the length of the relevant road segment, thereby extrapolating emissions to the regional scale [19,20].

$$E_{i,j} = EF_{i,j} \times A_j \times FC_j \quad (1)$$

In Equation (1) [9,15], $E_{i,j}$ denotes the emission of pollutant i for vehicle type j (g), $EF_{i,j}$represents the emission factor (g/km), A refers to vehicle activity (km), and $FC_{i,j}$indicates the fuel consumption per kilometer (g fuel/km).

$$A_j = N_j \times L \quad (2)$$

$$FC_j = sfc_{j,m} \quad (3)$$

In the calculation of $E_{i,j}$, the parameter $A_j$used in Equation (2) represents the daily number of vehicles $N_j$and the length of the road segment L(km). The parameter $FC_j$is calculated in Equation (3) using the specific fuel consumption per kilometer, $sfc_{j,m}$ defined according to vehicle type and fuel type [20].

Table 3. Emission factors by vehicle type and fuel type [20]

Vehicle type / Fuel	CO (g/kg fuel)	NO_x (g/kg fuel)	VOC (g/kg fuel)	PM (g/kg fuel)
Gasoline passenger car	48,36	3,98	7,75	0,02
Diesel passenger car	2,41	11,77	0,51	0,78
Gasoline light commercial vehicle	118,70	5,93	7,42	0,02
Diesel light commercial vehicle	6,81	13,48	1,23	1,22
Heavy-duty vehicle (diesel) / bus	6,10	25,95	0,90	0,55
Motorcycle (gasoline)	244,88	7,23	92,74	0,51

The Tier 1 emission factors presented in Table 3, expressed as grams of emissions per kilogram of fuel by vehicle type and fuel category, were compiled from the average values reported in Tables 3-5 (for CO and VOC) and 3-6 (for NO_x and PM) of the EMEP/EEA 2023 guidelines. For the Tier 1 methodology, these values represent European fleet averages and provide an appropriate baseline for the Turkish vehicle fleet [20].

Table 4. Fuel consumption per kilometer by vehicle category [20]

Vehicle type / Fuel	Fuel consumption (g fuel/km)
Gasoline passenger car	61,9
Diesel passenger car	56,8
Gasoline light commercial vehicle	72,5
Diesel light commercial vehicle	79,0
Heavy-duty vehicle (diesel) / bus	216,8
Motorcycle (gasoline)	27,7

The typical fuel consumption values per kilometer by vehicle category presented in Table 4 were obtained from Table 3-15 of the EMEP/EEA 2023 guidelines.

Table 5. Emissions per kilometer by vehicle type [20]

Vehicle type	CO (g/km)	NO_x (g/km)	VOC (g/km)	PM (g/km)
Gasoline passenger car	2,99	0,25	0,48	0,0012
Diesel passenger car	0,14	0,67	0,029	0,044
Gasoline light commercial vehicle	8,61	0,43	0,54	0,0015
Diesel light commercial vehicle	0,54	1,06	0,097	0,096
Heavy-duty vehicle (diesel) / bus	1,32	5,63	0,20	0,119
Motorcycle (gasoline)	6,78	0,20	2,57	0,014

The per-kilometer emission values presented in Table 5 represent the emissions per kilometer (g/km) calculated using the formula given in Equation 1, obtained from the product of the values reported in Table 3 and Table 4 [20].

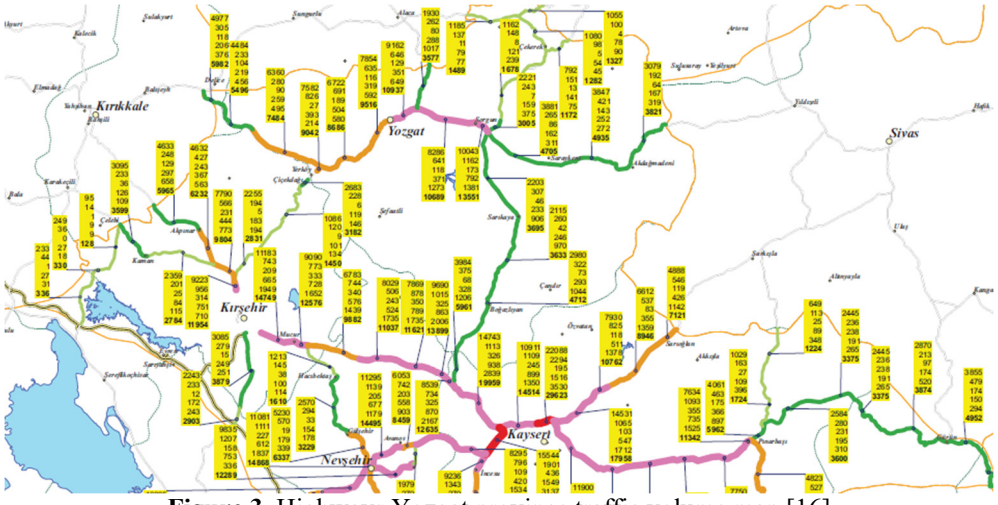


Figure 3. Highways Yozgat province traffic volume map [16]

Highways Yozgat province traffic volume map and vehicle density in the region are presented in Figure 3. The map shows that traffic flow in Yozgat is concentrated on certain routes. It is seen that especially the main roads providing intercity connections have high traffic volume, the highest traffic volume is realized on the Yozgat-Akdağmadeni route, especially on the section coded 200-17/2 with 10,043 vehicles per day, and the route with the lowest traffic volume is the Yozgat-Şefaatli road coded 805-09/0 with only 792 vehicle crossings per day, which is a very low density compared to other routes [16].

Table 6. KGM Yozgat province state roads average traffic values [16]

KKNO/ Slice	Road Name	Length	Vehicle Count Type	Automobile YOGT Vehicle/ Day	Medium Commercial Vehicle	Bus YOGT Vehicle/Day	Truck YOGT Vehicle/ Day	Truck + Trailer Tow Truck + Semi-trailer YOGT Vehicle/Day
190-04/1	Yozgat-Kırıkkale	19	Forecast	1185	137	11	79	77
190-04/2	Yozgat-Kırıkkale	13	Forecast	1055	100	4	78	90
200-15/1	Yozgat-Çekerek	18	Otss3	4484	233	104	219	456
200-15/2	Yozgat-Çekerek	31	Forecast	6360	280	90	259	495
200-16/1	Yozgat-Sorgun				**RAW ROADS**			
200-16/2	Yozgat-Sorgun	2	Forecast	7582	826	27	393	214
200-16/3	Yozgat-Sorgun	22	Forecast	6722	691	189	504	580
200-16/4	Yozgat-Sorgun	14	Otss3	7854	635	116	319	592
200-16/5	Yozgat-Sorgun	12	Otss3	9162	646	129	351	649
200-17/1	Yozgat-Akdağmadeni	23	Otss3	8286	641	118	371	1273
200-17/2	Yozgat-Akdağmadeni	6	Forecast	10043	1162	173	792	1381
200-17/3	Yozgat-Akdağmadeni	28	Otss3	3881	265	86	162	311
200-18/1	Yozgat-Sefaatli	33	Forecast	3847	421	143	252	272
200-18/2	Yozgat-Sefaatli	24	Otss3	3079	192	64	167	319
795-07/0	Yozgat-Sefaatli	18	Otss1	1930	262	80	288	1017
805-01/1	Yozgat-Sefaatli	20	Forecast	1080	98	5	54	45
805-01/2	Yozgat-Sefaatli	17	G.Traf	1162	148	8	121	239
805-01/3	Yozgat-Sefaatli	20	Otss1	1162	148	8	121	239
805-01/4	Yozgat-Sefaatli	7	Forecast	2221	243	7	159	375
805-02/1	Yozgat-Sefaatli	37	Otss1	2203	307	46	233	906
805-02/2	Yozgat-Sefaatli	36	Forecast	2115	260	42	246	970
805-02/3	Yozgat-Sefaatli	2	Forecast	2980	322	73	293	1044
805-03/0	Yozgat-Sefaatli	23	G.Traf	3984	375	68	328	1026
805-09/0	Yozgat-Sefaatli	11	Otss1	792	151	13	141	75

Table 6 presents the AADT values recorded by the General Directorate of Highways for state roads in Yozgat province, disaggregated by road segment and vehicle type. The counting types reported in the table refer to different traffic measurement and estimation methods employed by the General Directorate of Highways. OTSS3 represents data based on continuous automatic vehicle counting and classification measurements conducted throughout the year using magnetic loop detectors. OTSS1 refers to automatic traffic measurements carried out for limited periods using portable counting equipment. Forecast data indicate estimated AADT values calculated for road segments where direct measurements are not available, based on traffic data from previous years and measurements from nearby segments. G.Traf (Route Traffic) denotes traffic volumes determined using data obtained from road segments with similar traffic characteristics [16].

Equation 3 [19,21] was used to calculate the emission values in kg/day according to the vehicle density during the day for Yozgat province highways given in Table 6.

$$\text{Emisyon (kg/gün)} = \text{Araç Sayısı} \times \text{Emisyon Faktörü (g/km)} \times \text{Uzunluk (km)} \times 10^{-3} \quad (3)$$

Based on these calculations, daily emission amounts were determined for each road section depending on the vehicle density and the emission distribution was analyzed in detail. The data obtained were used to evaluate the effect of traffic volume on air pollution by revealing the emission differences between road routes. Thus, the current situation of vehicle emissions in Yozgat province has been revealed on scientific basis and comparative evaluations have been made in the following analyzes.

3. FINDINGS AND DISCUSSION

The traffic density on the state roads of Yozgat province according to different vehicle types is given in Table 6. Considering the traffic volume, it is seen that especially the roads providing intercity connections have higher vehicle density compared to other routes. This shows that emission levels may vary depending on the road type and frequency of use. In this context, emission calculations for each road are given in Table 7. The data in Table 7 provides a detailed breakdown of emissions calculated on a daily basis by vehicle type.

Table 7. Emission calculations for Yozgat province road

KKNO	Road name	Length(km)	Vehicle type	Number	CO (kg/day)	NOx (kg/day)	VOC (kg/day)	PM (kg/day)
190-04/1	Yozgat-Kırıkkale	19	Gasoline Cars	740	59.44	4.22	8.86	0.0253
			Diesel Light Comm.	579	1.65	7.48	0.352	0.506
			Bus	11	0.276	1.18	0.0418	0.0249
			Truck	79	1.98	8.45	0.300	0.179
			Truck + trailer	77	1.93	8.23	0.293	0.174
Total Emission					**65.28**	**29.56**	**9.847**	**0.909**
190-04/2	Yozgat-Kırıkkale	13	Gasoline Cars	659	37.16	2.64	5.55	0.0158
			Diesel Light Comm.	531	1.05	4.69	0.221	0.317
			Bus	4	0.069	0.293	0.0104	0.0062
			Truck	78	1.32	5.62	0.199	0.119
			Truck + trailer	90	1.55	6.59	0.234	0.139
Total Emission					**41.14**	**19.84**	**6.214**	**0.597**
200-15/1	Yozgat-Çekerek	18	Gasoline Cars	2794	251.46	17.85	37.52	0.107
			Diesel Light Comm.	2183	5.95	26.72	1.26	1.80
			Bus	104	2.47	10.54	0.374	0.222
			Truck	219	5.21	22.22	0.788	0.469
			Truck + trailer	456	10.84	46.23	1.64	0.977
Total Emission					**275.93**	**123.56**	**41.58**	**3.58**
200-15/2	Yozgat-Çekerek	31	Gasoline Cars	3963	522.71	37.12	78.01	0.222
			Diesel Light Comm.	3097	14.57	65.40	3.08	4.41
			Bus	90	3.68	15.70	0.558	0.332
			Truck	259	10.60	45.20	1.60	0.954
			Truck + trailer	495	20.26	86.36	3.07	1.83
Total Emission					**571.82**	**249.78**	**86.32**	**7.75**
200-16/2	Yozgat-Sorgun	2	Gasoline Cars	4719	44.48	3.16	6.64	0.0189
			Diesel Light Comm.	3687	1.11	4.97	0.234	0.335
			Bus	27	0.071	0.304	0.0108	0.0064
			Truck	393	1.04	4.43	0.157	0.0935
			Truck + trailer	214	0.565	2.41	0.0856	0.0510
Total Emission					**47.27**	**15.28**	**7.13**	**0.504**
200-16/3	Yozgat-Sorgun	22	Gasoline Cars	4185	367.02	26.06	54.77	0.156
			Diesel Light Comm.	3270	10.95	49.15	2.32	3.32
			Bus	189	5.49	23.40	0.831	0.495
			Truck	504	14.65	62.46	2.22	1.32
			Truck + trailer	580	16.84	71.80	2.55	1.52
Total Emission					**414.95**	**232.87**	**62.68**	**6.81**
200-16/4	Yozgat-Sorgun	14	Gasoline Cars	4889	343.95	24.43	51.34	0.146
			Diesel Light Comm.	3820	8.05	36.14	1.70	2.44
			Bus	116	2.14	9.14	0.325	0.193
			Truck	319	5.90	25.15	0.892	0.531
			Truck + trailer	592	10.94	46.65	1.66	0.987
Total Emission					**370.98**	**141.51**	**55.93**	**4.30**
200-16/5	Yozgat-Sorgun	12	Gasoline Cars	5704	402.04	28.55	60.00	0.171
			Diesel Light Comm.	4458	8.03	36.07	1.70	2.43
			Bus	129	2.04	8.71	0.310	0.184
			Truck	351	5.56	23.71	0.842	0.501
			Truck + trailer	649	10.28	43.82	1.56	0.927
Total Emission					**427.95**	**140.86**	**64.41**	**4.21**

Table 7. *Continued*

200-17/1	Yozgat-Akdağmadeni	23	Gasoline Cars	5157	541.49	38.45	80.81	0.230
			Diesel Light Comm.	4030	13.91	62.47	2.94	4.21
			Bus	118	3.58	15.27	0.542	0.323
			Truck	371	11.26	48.00	1.70	1.01
			Truck + trailer	1273	38.63	164.68	5.85	3.48
Total Emission					**608.87**	**328.87**	**91.82**	**9.26**
200-17/2	Yozgat-Akdağmadeni	6	Gasoline Cars	6251	220.08	15.63	32.85	0.0935
			Diesel Light Comm.	4886	4.41	19.80	0.933	1.34
			Bus	173	1.37	5.84	0.208	0.124
			Truck	792	6.27	26.75	0.950	0.565
			Truck + trailer	1381	10.94	46.64	1.66	0.986
Total Emission					**243.07**	**114.66**	**36.60**	**3.11**
200-17/3	Yozgat-Akdağmadeni	28	Gasoline Cars	2415	284.25	20.18	42.42	0.121
			Diesel Light Comm.	1888	7.93	35.61	1.68	2.40
			Bus	86	3.18	13.56	0.482	0.286
			Truck	162	5.99	25.54	0.907	0.540
			Truck + trailer	311	11.51	49.06	1.74	1.04
Total Emission					**312.86**	**143.95**	**47.23**	**4.39**
200-18/1	Yozgat-Şefaatli	33	Gasoline Cars	2395	394.68	28.03	58.91	0.168
			Diesel Light Comm.	1872	9.76	43.82	2.06	2.95
			Bus	143	6.23	26.56	0.944	0.561
			Truck	252	10.98	46.81	1.66	0.989
			Truck + trailer	272	11.85	50.51	1.79	1.07
Total Emission					**433.50**	**195.73**	**65.36**	**5.74**
200-18/2	Yozgat-Şefaatli	24	Gasoline Cars	1916	252.91	17.96	37.74	0.107
			Diesel Light Comm.	1498	5.39	24.21	1.14	1.63
			Bus	64	2.03	8.65	0.307	0.183
			Truck	167	5.29	22.56	0.801	0.477
			Truck + trailer	319	10.11	43.10	1.53	0.912
Total Emission					**275.73**	**116.48**	**41.53**	**3.30**
795-07/0	Yozgat-Şefaatli	18	Gasoline Cars	1201	151.34	10.75	22.59	0.0643
			Diesel Light Comm.	939	2.57	11.53	0.543	0.777
			Bus	80	1.90	8.10	0.288	0.171
			Truck	288	6.84	29.18	1.04	0.617
			Truck + trailer	1017	24.15	102.97	3.66	2.18
Total Emission					**186.80**	**162.53**	**28.13**	**3.81**
805-01/1	Yozgat-Şefaatli	20	Gasoline Cars	672	70.79	5.03	10.57	0.0301
			Diesel Light Comm.	525	1.58	7.08	0.333	0.477
			Bus	5	0.132	0.563	0.0200	0.0119
			Truck	54	1.43	6.08	0.216	0.128
			Truck + trailer	45	1.19	5.07	0.180	0.107
Total Emission					**75.11**	**23.81**	**11.31**	**0.754**
805-01/2	Yozgat-Şefaatli	17	Gasoline Cars	723	64.88	4.61	9.68	0.0276
			Diesel Light Comm.	565	1.63	7.32	0.345	0.494
			Bus	8	0.180	0.766	0.0272	0.0162
			Truck	121	2.73	11.64	0.414	0.246
			Truck + trailer	239	5.39	22.98	0.816	0.485
Total Emission					**74.81**	**47.31**	**11.22**	**1.27**
805-01/3	Yozgat-Şefaatli	20	Gasoline Cars	723	76.33	5.42	11.39	0.0324
			Diesel Light Comm.	565	1.92	8.61	0.406	0.581
			Bus	8	0.211	0.901	0.0320	0.0190
			Truck	121	3.19	13.62	0.484	0.288
			Truck + trailer	239	6.31	26.91	0.956	0.569
Total Emission					**87.96**	**55.46**	**13.28**	**1.49**

Table 7. *Continued*

805-01/4	Yozgat-Şefaatli	7	Gasoline Cars	1382	60.87	4.32	9.08	0.0259
			Diesel Light Comm.	1080	1.13	5.09	0.240	0.343
			Bus	7	0.065	0.276	0.0098	0.0058
			Truck	159	1.47	6.27	0.223	0.132
			Truck + trailer	375	3.47	14.79	0.525	0.312
Total Emission					**67.00**	**30.74**	**10.08**	**0.819**
805-02/1	Yozgat-Şefaatli	37	Gasoline Cars	1371	280.96	19.95	41.93	0.119
			Diesel Light Comm.	1072	5.89	26.44	1.25	1.78
			Bus	46	2.24	9.56	0.340	0.202
			Truck	233	11.39	48.56	1.72	1.03
			Truck + trailer	906	44.27	188.74	6.70	3.99
Total Emission					**344.75**	**293.25**	**51.94**	**7.12**
805-02/2	Yozgat-Şefaatli	36	Gasoline Cars	1316	254.04	18.04	37.92	0.108
			Diesel Light Comm.	1029	5.55	24.92	1.17	1.68
			Bus	42	2.00	8.52	0.302	0.180
			Truck	246	11.70	49.88	1.77	1.05
			Truck + trailer	970	46.11	196.58	6.98	4.15
Total Emission					**319.40**	**297.94**	**48.14**	**7.17**
805-02/3	Yozgat-Şefaatli	2	Gasoline Cars	1855	15.62	1.11	2.33	0.00663
			Diesel Light Comm.	1450	0.44	1.96	0.0923	0.132
			Bus	73	0.193	0.823	0.0292	0.0174
			Truck	293	0.774	3.30	0.117	0.0697
			Truck + trailer	1044	2.76	11.76	0.418	0.249
Total Emission					**19.79**	**18.96**	**2.99**	**0.475**
805-03/0	Yozgat-Şefaatli	23	Gasoline Cars	2479	233.56	16.58	34.85	0.0992
			Diesel Light Comm.	1938	6.69	30.03	1.41	2.02
			Bus	68	2.07	8.81	0.313	0.186
			Truck	328	9.96	42.48	1.51	0.898
			Truck + trailer	1026	31.14	132.76	4.72	2.81
Total Emission					**283.42**	**230.66**	**42.80**	**6.01**
805-09/0	Yozgat-Şefaatli	11	Gasoline Cars	493	25.49	1.81	3.80	0.0108
			Diesel Light Comm.	385	0.79	3.56	0.168	0.240
			Bus	13	0.189	0.805	0.0286	0.0170
			Truck	141	2.05	8.73	0.310	0.184
			Truck + trailer	75	1.09	4.64	0.165	0.098
Total Emission					**29.60**	**19.55**	**4.47**	**0.550**

An examination of Table 7 indicates that emissions originating from road transportation in Yozgat province vary by vehicle type and route. The table data reveal that gasoline passenger cars exhibit higher emission levels, particularly for CO and VOC, compared to other vehicle categories. This finding should be interpreted in conjunction with the relatively high share of gasoline vehicles within the total vehicle fleet.

In contrast, diesel light commercial vehicles, buses, and heavy-duty vehicles are observed to make more pronounced contributions in terms of NO_x and PM emissions. In particular, routes with intensive use of trucks and truck–trailer combinations exhibit increased NO_x and PM emission levels. Although heavy-duty vehicles constitute a relatively smaller proportion of the total vehicle fleet, their high per-vehicle emission factors account for this outcome. A route-based assessment indicates that total emission amounts increase along the Yozgat–Akdağmadeni, Yozgat–Çekerek, and Yozgat–Sorgun roads, where traffic intensity is relatively high. Conversely, emission levels remain more limited on road segments with lower daily traffic volumes. These findings demonstrate that emission magnitudes are directly associated with vehicle type distribution, road length, and traffic volume.

Air pollution poses a significant threat to the environment and public health, particularly due to emissions originating from road transportation [22,23]. Pollutants such as CO, NOx, VOCs, and PM released from road transport accumulate in the atmosphere and adversely affect air quality [24]. These pollutants lead to respiratory and cardiovascular diseases, cause ecosystem degradation, and contribute to global climate change in the long term. In this context, the accurate calculation of vehicle emissions plays a critical role in identifying strategies to improve air quality [25-27]. In this study, emissions originating from vehicles in Yozgat province were calculated and compared with NCCIH data. The emission data used in the study were evaluated according to traffic intensity and vehicle types, and the emission amounts generated by each

vehicle group were analyzed in detail. This analysis, prepared using data from the General Directorate of Highways, demonstrates the impact of vehicle emissions on air quality even in medium-sized cities such as Yozgat.

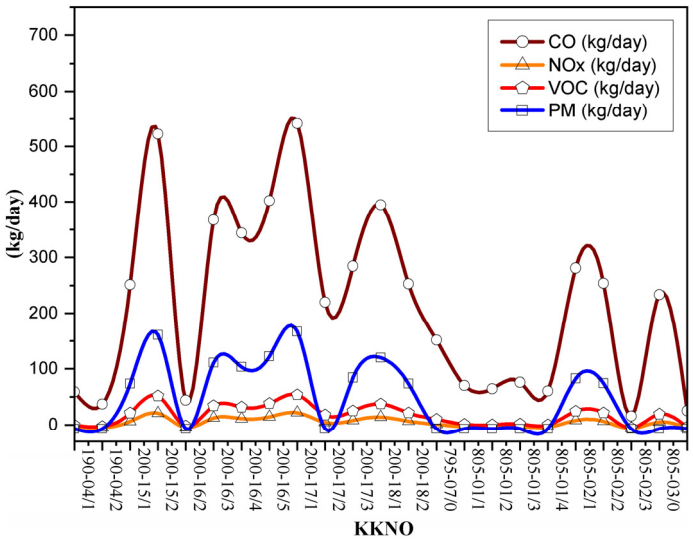


Figure 4. Emission graph of gasoline cars for Yozgat province roads

An examination of Figure 4 indicates that among the emissions originating from gasoline passenger cars, CO exhibits higher values compared to other pollutants. CO emissions display a fluctuating distribution along the road segments, while VOC emissions follow a trend similar to that of CO but remain at lower levels. The highest CO emission values are observed on the road segments corresponding to the Yozgat–Akdağmadeni and Yozgat–Çekerek routes. In contrast, NO_x and PM emissions remain low across all routes, with only limited variation.

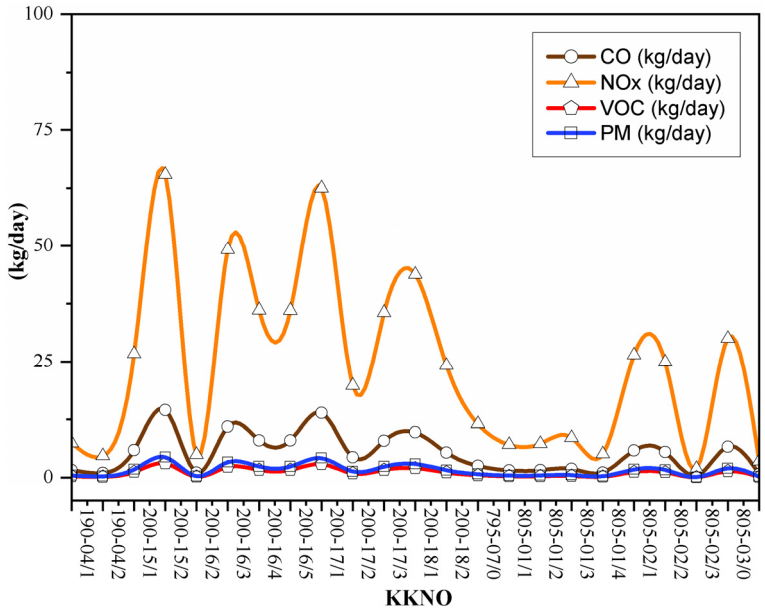


Figure 5. Emission graph of diesel light commercial vehicles for Yozgat province roads

An examination of Figure 5 shows that among the emissions originating from diesel light commercial vehicles, NO_x emissions exhibit higher values compared to the other pollutants. NO_x emissions display pronounced fluctuations along the road segments, reaching peak levels on certain routes. CO and VOC emissions remain at lower levels relative to NO_x, while PM emissions are limited across all road segments. The highest CO and NO_x emission values are concentrated on the road segments corresponding to the Yozgat–Akdağmadeni and Yozgat–Çekerek routes.

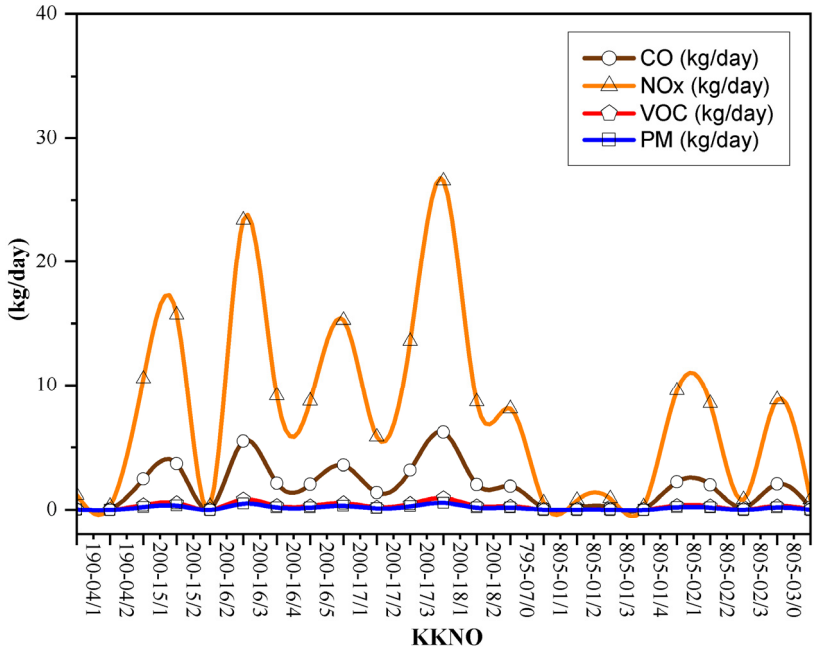


Figure 6. Emission graph of bus vehicles for Yozgat province roads

An examination of Figure 6 indicates that among the emissions originating from buses, NO_x emissions exhibit higher values compared to the other pollutants. NO_x emissions show a fluctuating distribution along the road segments, with pronounced peaks observed on certain segments. CO emissions remain at lower levels relative to NO_x, while VOC and PM emissions are limited across all routes.

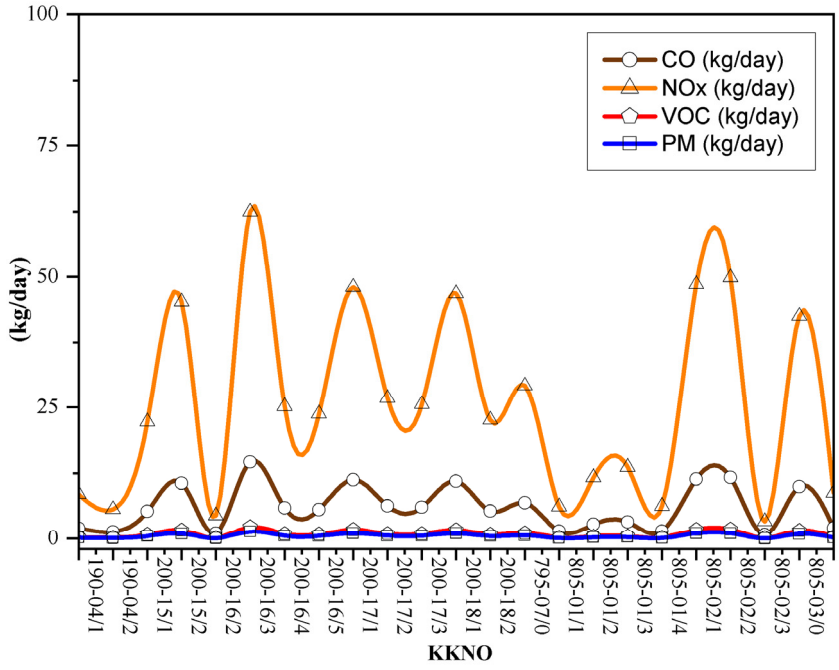


Figure 7. Truck emission graph for Yozgat province roads

An evaluation of the emission distribution for trucks in Figure 7 shows that NO_x emissions vary over a wider range than the other pollutants across the graph. NO_x values exhibit sharp increases on certain road segments, which are clearly represented as distinct peaks in the figure. CO emissions remain within a narrower range compared to NO_x, while VOC and PM emissions stay at low levels across all road segments. This emission pattern indicates that certain routes with intensified truck traffic stand out in terms of NO_x emissions.

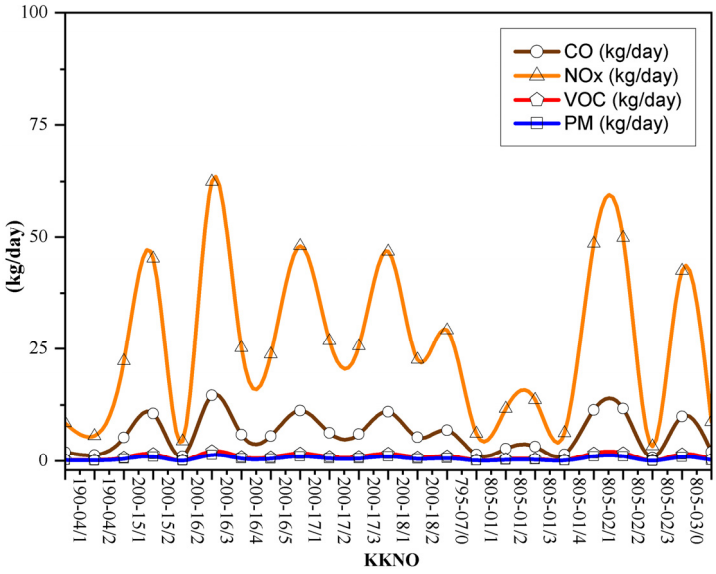


Figure 8. Truck + trailer emission graph for Yozgat province roads

An examination of the emission distribution for trucks and truck–trailer combinations in Figure 8 shows that NO_x emissions form pronounced peak values across the graph. NO_x emissions exhibit abrupt increases on certain road segments, represented by distinctly higher levels compared to the other pollutants. CO emissions remain at lower levels than NO_x but follow a similar fluctuating pattern, while VOC and PM emissions are confined within a narrow range along all road segments. The overall distribution indicates that emission levels increase markedly on specific segments where truck and truck–trailer traffic is concentrated.

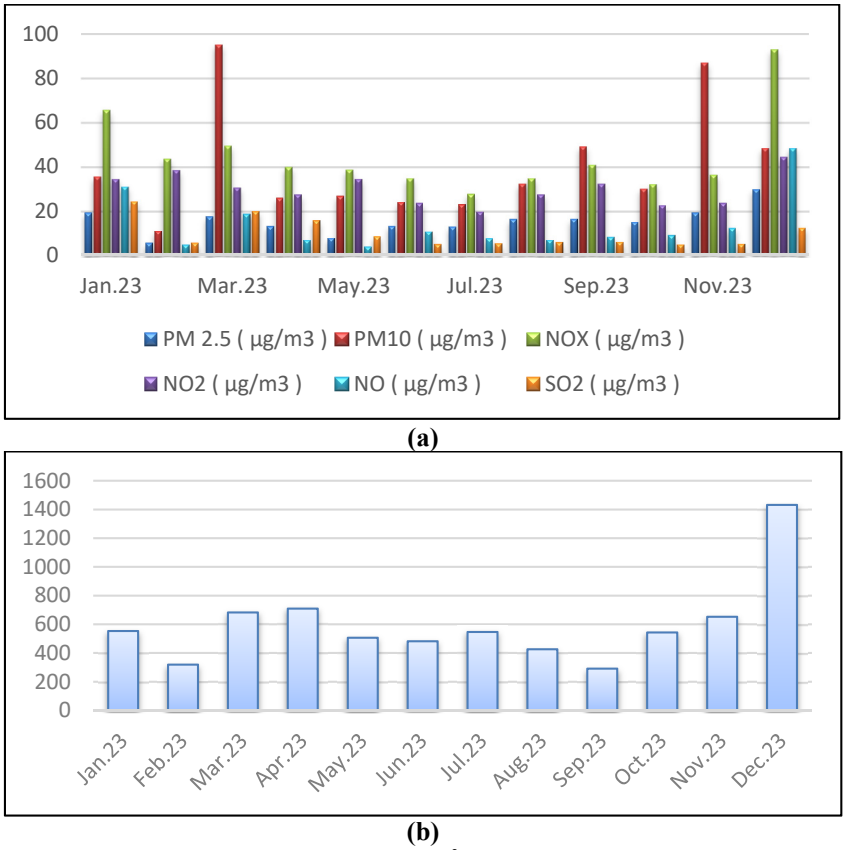


Figure 9. Change in emissions **(a)** and CO_2 (µg/m^3) emissions **(b)** according to months in NHKIA Yozgat Province in 2023

According to the general emission data for the year 2023 presented in Figure 9, PM and NO_x emissions show a significant increase in winter months. While VOC emissions increase in summer months, CO emissions follow a relatively balanced course throughout the year. PM emissions reach their highest levels especially during the cold months, while they decrease in other periods of the year. NO_x emissions fluctuate throughout the year, with an increasing and decreasing trend in certain periods.

The emission data calculated according to vehicle types presented in Figure 4, Figure 5, Figure 6, Figure 7 and Figure 8 reveal the effect of vehicle-derived air pollutants on air quality in Yozgat province. In these graphs, it is determined that especially CO, NO_x, VOC and PM emissions vary depending on different vehicle types. Heavy vehicles (trucks and trailers/trailers) are found to produce high levels of NO_x and PM, while gasoline cars produce high levels of CO and VOC emissions. Diesel light commercial vehicles have a significant contribution in terms of both NO_x and PM emissions, and buses have a significant contribution, especially in NO_x emissions.

When the general emission data for the year 2023 presented in Figure 9 is analyzed, the share of vehicle-based emissions calculated in the study in total air pollutants can be determined. According to the NCCIAP data, it is seen that emissions from vehicles make a significant contribution to the total air pollutants. In particular, vehicles have a dominant share in CO and NO_x emissions, while other sources play an important role in PM and VOC emissions. Vehicle emissions calculations show that a large portion of NO_x emissions, in particular, come from motor vehicles. However, when PM emissions are evaluated, it is seen that emissions from vehicles constitute only a certain portion of the total PM load, while the remaining part may be caused by industrial activities, fossil fuel use for heating, agricultural activities and naturally occurring dust emission [28,29].

This comparison shows that air pollution is not limited to vehicular emissions, but industry, heating, agriculture and other environmental factors in the region also have a significant impact on air quality. However, reducing emissions from the transportation sector requires measures to be taken, especially to reduce CO and NO_x levels.

4. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

In this study, CO, NO_x, VOC, and PM emissions originating from road transportation in Yozgat province were calculated on the basis of road segments and vehicle types using traffic volume data obtained from the General Directorate of Highways and Tier 1 emission factors provided in the EMEP/EEA 2023 guidelines. While the existing literature predominantly focuses on metropolitan areas and industrially intensive regions, this study differs by presenting a detailed emission inventory for a medium-sized province. In addition, evaluating emissions not only in terms of total amounts but also by disaggregating them according to routes and vehicle types enables a clearer representation of the spatial distribution of traffic-related air pollution at the regional scale.

The main results of the study can be summarized as follows:

I. It was determined that CO, NO_x, VOC, and PM emissions originating from road transportation in Yozgat province exhibit pronounced differences depending on vehicle type and road segment.
II. Gasoline passenger cars were found to be prominent contributors in terms of CO and VOC emissions, whereas diesel light commercial vehicles, buses, and heavy-duty vehicles contribute more substantially to NO_x and PM emissions.
III. Total emission amounts were observed to increase along the Yozgat–Akdağmadeni, Yozgat–Çekerek, and Yozgat–Sorgun routes, where traffic volume is relatively high, while emission levels remained more limited on road segments with lower traffic intensity.
IV. The spatial distribution of emissions was found to be directly related to road length and daily vehicle counts.
V. The emission graphs prepared by vehicle type support the quantitative findings presented in Table 7 and reveal pronounced fluctuations and peak values, particularly for CO and NO_x emissions.
VI. The comparison with NHQMN data indicates that vehicle-related emissions constitute a significant share of the overall air pollution burden, especially in terms of CO and NO_x components.

Based on the findings obtained in this study, future research aimed at a more detailed assessment of emissions originating from road transportation in Yozgat province should move beyond this approach based on fixed emission factors and instead evaluate emissions using more comprehensive datasets that include variables such as vehicle counts, speed distributions, fuel types, and vehicle age. In particular, the application of Tier 2 or Tier 3 methodologies that incorporate real-time traffic measurements conducted at the road-segment level and consider fleet characteristics may reveal the spatial and temporal variation of vehicle-related emissions in a more detailed manner.

5. REFERENCES

1. Bayraktar, Ö.M. & Mutlu, A. (2022). Analysis of traffic-borne air pollution levels in Balıkesir City center. *2nd Environmental Engineering Resource Recovery International Congress*, 373-382.
2. Yakut, S.M. (2023). Seasonal and annual evaluation of Nevşehir province air quality. *Aksaray University Journal of Science and Engineering, 7*(2), 77-84.
3. Sümer, G.Ç. (2014). Air pollution control: An investigation of legal regulations and organizations to prevent air pollution in Turkey. *International Journal of Economic and Administrative Studies,* (13), 37-56.
4. Kuşkapan, E., Yıldırım, M. ve Aydın, Ö.L. (2024). Trafik kaynaklı emisyonun azaltılabilmesi amacıyla sürdürülebilir ve çok modlu yol ağlarının tasarlanması; Erzurum-Tortum yolu örneği. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39*(3), 785-795.
5. Çimtay, M.A. (2020). Determination of low emission zones in terms of urban logistics: Istanbul application. *Doctoral dissertation*, Maltepe University, İstanbul, 55-75.
6. Kaya, G.K. (2020). Determination of noise levels in heavy traffic areas of Gaziantep and its environmental impacts. *Master's thesis*. Hasan Kalyoncu University, Institute of Science, 40-50.
7. Kelen, F. (2014). Effects of motor vehicle emissions on human health and environment. *Journal of Yüzüncü Yıl University Institute of Science and Technology, 19*(1-2), 80-87.
8. Bayrakçeken, H., Mutlu, İ., Yavuz, İ. & Yıldırım, A. (2018). Comparison of hybrid and electric vehicles with conventional internal combustion engine Vehicles in terms of exhaust emissions. *14th International Combustion Sysmposium (INCOS2018).*
9. Cuci, Y. & Polat, E.E. (2015). Determination of traffic-induced air pollution in Gaziantep. *Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences, 18*(2), 1-11.
10. Yakın, A. & Behçet, R. (2019). Emission inventory of traffic-related air pollutants in Van province. *Journal of the Institute of Science and Technology, 9*(3), 1567-1573.
11. Behçet, R. & Yakın, A. (2020). Emission inventory of traffic-borne air pollutants in Malatya province. *Journal of the Institute of Science and Technology, 10*(4), 2783-2790.
12. Yakın, A. (2022). Vehicle sourced air pollution, the case of Agri province. *EJONS International Journal on Mathematic, Engineering and Natural Sciences, 23*(6), 618-626.
13. Çetin D.Ş., Demirarslan, K.O. & Çavuşoğlu, S.V. (2025). Evaluation of Turkey's road-based greenhouse gas inventory and future projections. *Applied Sciences, 15*(13), 7007.
14. Zhu, J., Xia, S., Niu, H., Xu, J., Wang, Y., Yu, X., ... & Li, L. (2025). Volatile organic compounds from typical industries in North China plain: emissions, air pollution contribution, health risks, and policy implications. *Environment International*, 109673.
15. İbik, T. ve Öztürk, S. (2025). Ekonomik ve çevresel boyutlarıyla kentleşme ve ulaşım sektörüne etkisi: Ankara ili örneği. *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 43*(3), 539-566.
16. General Directorate of Highways 6th Regional General Directorate (KGM). *Traffic volume maps, Yozgat.* Available at: https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Trafik/TrafikHacimHaritasi.aspx, Access date: 15.02.2025
17. Coskun, N.Y. (2026). Türkiye otoyollarında karayolu ulaşımı kaynaklı hava kirliliğinin değerlendirilmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 12*(1), 183-199.
18. TÜİK, *Motor land vehicle statistics.* Available at: https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=89&locale=tr, Access date: 20.03.2025.
19. Pekin, M.A. (2006). Greenhouse gas emissions from the transportation sector. *Master's thesis*. Istanbul Technical University Institute of Science and Technology, Istanbul, 65.
20. European Environment Agency (EEA), (2023). **EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023.* Available at: https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2023, Access date: 20.03.2025.
21. Alagöz, İ., Coşkun, E., Babaoğlu, S., Kaykaç, R. & Cidacı, A. (2022). Calculation of EÜAŞ central campus carbon footprint for 2021. *Environment, Climate and Sustainability, 23*(2), 161-166.

22. T.C. Ministry of Health General Directorate of Public Health. (n.d.). *Air pollution and health effects.* Available at: https://hsgm.saglik.gov.tr/tr/ced/hava-kirliligi.html, Access date: 20.03.2025.
23. Republic of Turkey Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change (2023). *Turkey's long term climate strategy.* Available at: https://iklim.gov.tr/db/turkce/dokumanlar/turkiyenin--8230-3143-20250210095501.pdf, Access date: 20.03.2025.
24. Yaman, G., Türkeş, S., Güney, H., Sıvacı, A. E., Sarı, B. & Keskinkan, O. (2023). Measurement, modeling and evaluation of some air pollutants in Gaziantep province. *Karaelmas Science and Engineering Journal, 13*(1), 164-178.
25. Tokuşlu, A. & Burak, S. (2021). Investigation of exhaust gas emissions of transiting ships in the Bosphorus. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science, 9*(1), 59-66.
26. Tokmakçı, M., Bilgili, M. ve Pınar, E. (2025). Küresel iklim Değişikliği ve İklim Göstergelerindeki Tarihsel Eğilimler. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 40(1), 127-140.
27. Aslan, E. (2024). Araçlarda CO_2 emisyonlarının farklı yapay sinir ağı modelleri kullanılarak tahminlerinin karşılaştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39*(2), 309-324.
28. Kuşkapan, E., Yıldırım, M. ve Aydın, Ö.L. (2024). Trafik kaynaklı emisyonun azaltılabilmesi amacıyla sürdürülebilir ve çok modlu yol ağlarının tasarlanması; Erzurum-Tortum yolu örneği. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39*(3), 785-795.
29. Toros, H. ve Bağış, S. (2017). Hava kirlilik modellerinde kullanılacak emisyon envanteri oluşturulması için yaklaşımlar ve İstanbul hava kirliliği dağılımı örneği. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 32*(2), 1-12.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 1 MART/MARCH 2026

Geleneksel Görüntü İşleme ve Derin Öğrenmenin Birleşimi Hibrid Model ile El Yazısı Rakam Sınıflandırma

Ethem Sefa KÜÇÜKYILMAZ [1,a], **Erhan AKIN** [2,b]

[1]*Fırat Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Yönetim ve Bilişim Sistemleri Bölümü, Elazığ, Türkiye*
[2]*Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0009-0008-6912-1851; [b]**ORCID**: 0000-0001-6476-9255*

Makale Bilgileri
Geliş : 07.04.2025
Kabul : 06.02.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1670508

Sorumlu Yazar
Ethem Sefa KÜÇÜKYILMAZ
eskucukyilmaz@firat.edu.tr

Anahtar Kelimeler
Hibrit model
El yazısı rakam sınıflandırması
Görüntü işleme teknikleri
Optik karakter tanıma (OCR)
Öznitelik çıkarımı

***Atıf şekli:** KÜÇÜKYILMAZ, E.S., AKIN, E., (2026). Geleneksel Görüntü İşleme ve Derin Öğrenmenin Birleşimi Hibrid Model ile El Yazısı Rakam Sınıflandırma. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(1), 145-154.*

ÖZ

Bu çalışma, rakam sınıflandırma problemlerinde yaygın olarak kullanılan Konvolüsyonel Sinir Ağları'nın (CNN) dönme ve ölçekleme gibi geometrik varyasyonlara karşı yaşadığı yetersizlikleri gidermek amacıyla hibrit bir model önermektedir. Önerilen yaklaşım, CNN mimarisini Hu ve Zernike Momentlerinin sağladığı geometrik değişmezlik özellikleriyle entegre ederek özellik birleştirme tekniğini kullanmaktadır. Modelin dayanıklılığı, standart veriler yerine gürültü ve bozulma içeren zorlu SVHN veri seti üzerinde test edilmiştir. Çalışma kapsamında modern ve hafif bir mimari olan MobileNetV3 ile yapılan kapsamlı kıyaslamalar, hibrit modelin %90.97 ile istatistiksel olarak rekabetçi bir doğruluk oranına ulaştığını göstermiştir. Ancak asıl fark işlem hızında ortaya çıkmış; hibrit model 760 ms işlem süresiyle, 3276 ms süren MobileNetV3 modeline kıyasla 4 kattan fazla hız avantajı sağlamıştır. Bu sonuçlar, önerilen yöntemin yüksek doğruluk ve hız gerektiren gerçek zamanlı uygulamalar için modern alternatiflerden çok daha verimli bir çözüm sunduğunu kanıtlamaktadır.

Handwritten Digit Classification with a Hybrid Model Combining Traditional Image Processing and Deep Learning

Article Info
Received : 07.04.2025
Accepted : 06.02.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1670508

Corresponding Author
Ethem Sefa KÜÇÜKYILMAZ
eskucukyilmaz@firat.edu.tr

Keywords
Hybrid model
Handwritten digit classification
Image processing techniques
Optical character recognition (OCR)
Feature extraction

***How to cite:** KÜÇÜKYILMAZ, E.S., AKIN, E., (2026). Handwritten Digit Classification with a Hybrid Model Combining Traditional Image Processing and Deep Learning. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(1), 145-154.*

ABSTRACT

This study proposes a hybrid model to address the insufficiencies of Convolutional Neural Networks (CNNs), widely used in digit classification, against geometric variations such as rotation and scaling. The proposed approach integrates CNN architecture with the geometric invariance properties of Hu and Zernike Moments using a feature fusion technique. To test robustness, the model was evaluated on the challenging SVHN dataset, containing noise and real-world distortions, rather than standard datasets. Comprehensive comparisons with MobileNetV3, a modern lightweight architecture, showed that the hybrid model achieved a statistically competitive accuracy rate of 90.97%. However, the significant difference appeared in processing speed; the hybrid model demonstrated more than a 4-fold speed advantage (760 ms) compared to MobileNetV3 (3276 ms). These findings prove that the proposed method offers a significantly more efficient solution than modern alternatives for real-time applications requiring high accuracy and low computational cost.

1. GİRİŞ

Görüntü tanıma, bilgisayarlı görü ve makine öğrenmesi alanlarında uzun yıllardır üzerinde çalışılan temel problemlerden biridir [1]. Nesne tanıma, yüz algılama, tıbbi görüntü analizi ve otonom araçlar gibi pek çok uygulama, gelişmiş görüntü sınıflandırma tekniklerine dayanmaktadır. Bu bağlamda, el yazısı rakamların sınıflandırılması, Optik Karakter Tanıma (OCR) sistemlerinin en kritik alt bileşenlerinden birini oluşturmaktadır [2]. Ancak bu noktada, tam kapsamlı bir OCR sisteminin metin tespiti (text detection) ve satır ayrıştırma gibi adımları içerdiği; bu çalışmanın ise doğrudan önceden ayrıştırılmış (pre-segmented) izole karakterlerin sınıflandırılması problemi üzerine odaklandığı vurgulanmalıdır.

Makine öğrenmesi ve derin öğrenme alanındaki gelişmeler, izole karakterlerin sınıflandırılmasında yüksek doğruluk oranlarına ulaşmayı mümkün kılmıştır. Geleneksel makine öğrenmesi yöntemleri, öznitelik mühendisliği ve istatistiksel analizlere dayalı teknikler kullanırken; günümüzde Konvolüsyonel Sinir Ağları (CNN) gibi derin öğrenme yöntemleri, doğrudan görüntü pikselleri üzerinden anlamlı özellikler öğrenerek başarılı sonuçlar vermektedir [3]. Özellikle LeCun ve arkadaşları tarafından sunulan MNIST veri kümesi [4], bu alandaki algoritmaların kıyaslanması için standart bir referans noktası kabul edilmektedir. Zamanla bu alandaki modeller giderek derinleşmiş ve ResNet gibi mimarilerde kullanılan atlamalı bağlantılar sayesinde derin ağların eğitiminde karşılaşılan kaybolan gradyan problemleri etkin bir şekilde çözülmüştür [5]. Buna ek olarak, model mimarilerindeki aktivasyon fonksiyonlarının (örneğin düzeltilmiş sigmoid) optimize edilmesiyle de standart veri setlerindeki sınıflandırma performansları daha da yukarı taşınmıştır [6]. CNN tabanlı yaklaşımlar büyük veri kümelerinde yüksek performans gösterse de, yapısal veya geometrik değişmezlik (invariance) bilgilerini modele açıkça dahil etmek, özellikle sınırlı veri veya karmaşık varyasyonlarda performansı artırabilmektedir. Bu çalışmada, CNN modellerinin veri odaklı gücü ile Hu Momentleri [7] gibi geleneksel yöntemlerin geometrik değişmezlik özellikleri bir araya getirilerek hibrit bir mimari sunulmuştur.

Hu Momentleri, bir görüntünün geometrik dönüşümlere (ölçekleme, döndürme ve öteleme) karşı dayanıklı özelliklerini tanımlayan istatistiksel ölçümlerden oluşur. Bu momentler, bir şeklin temel yapısını özetleyen yedi adet değişmez değer üretir ve özellikle karakter ve şekil tanıma uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, Zernike Momentleri daha yüksek doğrulukta şekil analizine olanak tanıyan ve görüntü üzerindeki farklı frekans bileşenlerini temsil eden özel momentlerdir. Zernike Momentleri, ortogonal bir taban fonksiyonuna dayalı olarak hesaplandığı için, görüntünün bütünsel yapısını daha iyi yakalayarak modelin farklı varyasyonlara karşı dayanıklılığını artırmaktadır.

Önerilen yöntemde, ilk olarak MNIST veri kümesi kullanılarak el yazısı rakamları üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. MNIST veri kümesi, 28x28 boyutlarında el yazısı rakam görüntülerinden oluşan geniş bir veri kümesi olup, görüntü sınıflandırma algoritmalarının test edilmesi için standart bir benchmark olarak kabul edilmektedir. Çalışmada, CNN modeli ve geleneksel moment tabanlı özelliklerin birleştirilerek kullanılmasıyla daha güçlü bir sınıflandırma performansı elde edilmiştir.

Modelin geliştirilmesi aşamasında, CNN bileşeni için bir dizi konvolüsyonel katman ve havuzlama katmanı kullanılarak görüntülerden anlamlı özellikler çıkarılmıştır. Bu özellikler, tam bağlı katmanlara iletilerek rakam sınıflandırması gerçekleştirilmiştir. Geleneksel öznitelik mühendisliği aşamasında ise, her bir görüntü için Hu ve Zernike Momentleri hesaplanarak CNN modeline eklenmiştir. Modelin son aşamasında, CNN tarafından çıkarılan özellikler ile geleneksel yöntemlerden elde edilen öznitelikler birleştirilerek son sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Bunun yanı sıra, modelin eğitim sürecinde Cosine Annealing Learning Rate Scheduler kullanılarak adaptif öğrenme oranı ayarlamaları gerçekleştirilmiştir. Öğrenme sürecinin daha stabil ilerlemesini sağlamak için Early Stopping tekniği kullanılmış, ayrıca modelin aşırı öğrenmesini (overfitting) önlemek için Dropout katmanları eklenmiştir. Ayrıca, veri kümesini zenginleştirmek amacıyla ImageDataGenerator ile veri artırma işlemleri uygulanmış, böylece modelin daha geniş varyasyonlara karşı dayanıklı hale gelmesi sağlanmıştır ve çalışmanın sunduğu temel katkılar şu şekilde özetlenebilir:

• Hibrit Model Kullanımı: Derin öğrenme ve geleneksel öznitelik mühendisliği tekniklerinin birleştirilerek daha güçlü bir model oluşturulması sağlanmıştır.

• Görüntü Özniteliklerinin Entegrasyonu: Hu Momentleri ve Zernike Momentleri gibi yapısal bilgilerin CNN modeline entegre edilerek sınıflandırma performansının artırılması hedeflenmiştir.

• Öğrenme Oranı Optimizasyonu: Cosine Annealing Learning Rate Scheduler ile modelin öğrenme sürecinin daha dengeli ilerlemesi sağlanmıştır.

• Veri Artırma Stratejilerinin Kullanımı: ImageDataGenerator ile uygulanan veri artırma teknikleri sayesinde modelin genelleme yeteneği artırılmıştır.

• Model Performansının Değerlendirilmesi: CNN modelinin yalnızca piksel tabanlı öğrenme yerine, ek özniteliklerle desteklendiğinde nasıl daha başarılı sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışmada, derin öğrenme ve geleneksel görüntü işleme tekniklerinin hibrit bir yapı içinde nasıl entegre edilebileceği gösterilmiştir. Elde edilen bulgular, CNN modellerinin geleneksel öznitelik mühendisliği yöntemleriyle desteklenerek daha yüksek performans elde edebileceğini göstermektedir. Bu yaklaşım, el yazısı rakam sınıflandırmasının yanı sıra, diğer görüntü sınıflandırma problemlerinde de uygulanabilecek potansiyel bir yöntem olarak değerlendirilebilir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Görüntü sınıflandırma problemleri, makine öğrenmesi ve derin öğrenme alanında geniş bir araştırma sahası oluşturmakta olup, özellikle Konvolüsyonel Sinir Ağları (CNN) ve moment tabanlı özellik çıkarım yöntemleri gibi yaklaşımlar bu alanda önemli bir yer tutmaktadır. Görüntü işleme ve sınıflandırma alanında karşılaşılan zorluklar, modellerin doğruluk, hız ve genelleme yeteneğini artırmak için çeşitli yöntemlerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu bağlamda, CNN modelleri ve moment tabanlı teknikler, görüntüden anlamlı özelliklerin çıkarılması ve bu özellikler üzerinden yüksek doğrulukla sınıflandırma yapılmasında kritik rol oynamaktadır. Bu yöntemler, görüntü işleme alanında hem teorik hem de pratik açıdan büyük bir öneme sahiptir ve sürekli olarak geliştirilmektedir. CNN modelleri, özellikle görüntü tanıma ve sınıflandırma problemlerinde sağladıkları yüksek doğruluk oranları ve otomatik özellik çıkarım kabiliyetleri nedeniyle popüler hale gelmiştir [1]. Bu mimari, görüntüdeki lokal özellikleri yakalamada ve bu özellikleri daha yüksek seviyeli temsillere dönüştürmede son derece etkilidir. Özellikle MNIST veri kümesi gibi el yazısı rakam sınıflandırma problemlerinde CNN tabanlı modellerin doğruluk oranlarının %97'yi aştığı gösterilmiştir [2]. CNN'in temel bileşenleri olan evrişim katmanları, havuzlama katmanları ve tam bağlantılı katmanlar sayesinde, giriş görüntüsünden soyut ve anlamlı temsiller öğrenmek mümkün olmaktadır [3]. Bu mimarilerin temellerini atan ve belge tanıma sistemlerine gradyan tabanlı öğrenmeyi başarıyla uygulayan LeCun ve arkadaşlarının çalışmaları, el yazısı rakam sınıflandırması alanının en önemli yapı taşlarından birini oluşturmaktadır [4]. Farklı CNN mimarileri arasında LeNet, AlexNet, VGG, ResNet gibi modeller, derin katman yapıları ve farklı evrişim teknikleri ile öne çıkmaktadır. Örneğin, ResNet'in sunduğu atlamalı bağlantılar, derin ağların eğitiminde karşılaşılan kaybolan gradyan problemini etkili bir şekilde çözmektedir [5]. Ayrıca farklı aktivasyon fonksiyonlarının model başarısına doğrudan etki ettiği, düzeltilmiş sigmoid fonksiyonunun MNIST veri setinde %89,82 doğruluk sağladığı belirtilmektedir [6]. Bu sonuçlar, CNN modellerinin görüntü sınıflandırma problemlerinde ne kadar etkili olduğunu göstermektedir. Moment tabanlı özellik çıkarım yöntemleri, görüntülerin geometrik dönüşümlere (ölçekleme, döndürme, öteleme) karşı değişmezliğini sağlayan istatistiksel öznitelikler sunar. Bu yöntemler, görüntünün şekil, boyut ve oryantasyon gibi temel özelliklerini matematiksel olarak temsil ederek, sınıflandırma algoritmalarının bu özellikler üzerinden karar vermesini kolaylaştırır. Hu Momentleri, bu dönüşümler altında görüntünün temel yapısını koruyan öznitelikler çıkararak, özellikle dönüşüm değişmezliği gerektiren tanıma problemlerinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır [7]. Singh ve arkadaşları, Hu momentlerinin dijital görüntülerde ayrıklaştırma nedeniyle bazı bozulmalar yaşayabileceğini, ancak yine de tanıma açısından sağlam bir yöntem sunduğunu ifade etmektedir [8]. Bu momentler, yedi adet değişmez özellikten oluşmakta olup, bu özellikler farklı geometrik dönüşümlere karşı kararlılık sağlamaktadır. Hu Momentleri, özellikle tıbbi görüntüleme ve nesne tanıma gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Zernike Momentleri ise görüntülerin dairesel harmonik fonksiyonlar kullanılarak ayrıştırılmasını sağlar ve döndürmeye karşı değişmezlik özellikleri nedeniyle öne çıkar [9]. Bu momentler, düşük örnekleme oranlarında görüntü rekonstrüksiyonunu kolaylaştırırken, arka plan gürültüsüne karşı da daha dayanıklı oldukları gösterilmiştir [10]. Zernike Momentlerinin karmaşık sayı yapısı, görüntünün daha zengin ve anlamlı bir şekilde temsil edilmesini sağlar. Özellikle yüksek dereceli momentler, görüntüdeki detayların daha iyi yakalanmasına olanak tanır. Zheng ve arkadaşları, kesirli mertebeden Zernike

momentlerinin filigranlama gibi güvenlik uygulamalarında başarıyla kullanıldığını göstermiştir [11]. Benzer şekilde, görüntü güvenliğinin kritik olduğu durumlarda, çoklu örtü görüntüleri ve algısal özetleme (perceptual hash) teknikleri kullanılarak geliştirilen veri gizleme yöntemleri de literatürde önemli bir yer tutmaktadır [12]. Bu tür momentler, görüntü işleme alanında hem teorik hem de pratik açıdan büyük bir öneme sahiptir ve sürekli olarak geliştirilmektedir.

Son yıllarda, geleneksel özellik mühendisliği teknikleri ile derin öğrenme tabanlı yaklaşımların birleştirildiği hibrit modeller, görüntü sınıflandırma problemlerinde giderek artan bir popülerlik kazanmaktadır. Bu tür modeller, CNN gibi derin öğrenme tabanlı yöntemlerin güçlü yönlerini, moment tabanlı özellik çıkarım yöntemleriyle destekleyerek daha yüksek doğruluk oranları elde etmeyi amaçlar. Hu ve Zernike momentlerini kullanan bir diş çürüğü sınıflandırma modelinde, KNN algoritması ile %94,07 doğruluk oranına ulaşıldığı gösterilmiştir [13]. Bu sonuçlar, moment tabanlı özelliklerin makine öğrenmesi algoritmalarıyla birleştirildiğinde oldukça başarılı çıktılar verdiğini göstermektedir. Hibrit modeller, özellikle tıbbi görüntüleme ve nesne tanıma gibi alanlarda büyük bir potansiyele sahiptir. MNIST veri kümesi, el yazısı rakam sınıflandırma problemlerinde en sık kullanılan veri setlerinden biridir. Daha hafif CNN modelleri ile bile oldukça yüksek doğruluk oranlarına ulaşılabilmektedir; örneğin LMFRNet adlı bir model, MNIST üzerinde %94,6 doğruluk oranına ulaşmıştır [14]. Bu teknikler, aşırı uyumu (overfitting) azaltarak modelin farklı veri örnekleri üzerinde daha iyi genelleme yapmasını sağlar. Veri artırma teknikleri, özellikle sınırlı veri setleri üzerinde çalışırken büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bu tür hibrit modeller, özellikle endüstriyel uygulamalarda büyük bir potansiyele sahiptir. Nitekim makine öğrenmesi modelleri, sadece görüntü işlemede değil, ısı değiştirici tasarımı gibi endüstriyel sistemlerin optimizasyonunda da ağaç tabanlı algoritmalarla (XGBoost, RF vb.) yüksek başarı sağlamaktadır [15].

3. YÖNTEM

3.1. Kullanılan Veri Kümesi

Bu çalışmada, önerilen hibrit modelin hem temel öğrenme kapasitesini hem de zorlu koşullardaki dayanıklılığını değerlendirmek amacıyla iki farklı veri seti kullanılmıştır. İlk olarak, modelin temel başarımını ölçmek için standart bir referans noktası olan MNIST veri seti tercih edilmiştir. MNIST, 0-9 arası rakamları içeren, 28x28 boyutunda ve gri tonlamalı 70.000 görüntüden oluşmaktadır. Ancak, MNIST veri setinin temiz ve hizalanmış yapısı, modelin gerçek dünya senaryolarındaki gürültüye karşı direncini ölçmekte yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle, çalışmanın kapsamı genişletilerek modele SVHN (Street View House Numbers) veri seti dahil edilmiştir. SVHN, Google Street View görüntülerinden elde edilen, gerçek dünya kapı numaralarını içeren ve MNIST'e kıyasla çok daha zorlu bir veri setidir. 32x32 piksel boyutunda ve RGB (renkli) formatında olan bu veri seti, değişken aydınlatma koşulları, bulanıklık, geometrik bozulmalar ve arka plan gürültüleri içermektedir. SVHN, modelin yalnızca şekil bilgisini değil, aynı zamanda gürültülü ve karmaşık arka planlara karşı geometrik değişmezlik (Hu ve Zernike momentleri sayesinde) yeteneğini test etmek için ideal bir ortam sunmaktadır.

3.2. Geleneksel Özellik Çıkartma Yöntemleri

Görüntü tanıma ve sınıflandırma problemlerinde, görüntülerin ham piksel değerlerinden doğrudan öğrenmek yerine, bu görüntülerden anlamlı ve dönüşüm değişmez özellikler çıkartmak yaygın bir yaklaşımdır. Bu bağlamda Hu Momentleri ve Zernike Momentleri, geleneksel özellik çıkarma yöntemleri arasında önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmada, MNIST veri kümesi üzerinde Hu Momentleri ve Zernike Momentleri birleştirilerek, log-normalizasyon işlemiyle iyileştirilen özellikler çıkarılmış ve bir CNN modeline ek girdi olarak sunulmuştur.

Hu Momentleri, bir görüntünün geometrik yapısını özetleyen yedi adet momentten oluşur ve döndürme, ölçekleme ve öteleme gibi dönüşümlere karşı değişmezdir. Bu özellikleri nedeniyle görüntü tanıma ve karakter sınıflandırma gibi alanlarda sıkça kullanılmaktadır. Hu Momentleri, normalize edilmiş merkezi momentlerin doğrusal olmayan kombinasyonlarıdır ve şu formüllerle tanımlanır:

$$n_1 = m_{20} + m_{02} \tag{1}$$

$$n_2 = (m_{20} - m_{02})^2 + 4m_{11}^2 \tag{2}$$

$$n_3 = (m_{30} - 3m_{12})^2 + (3m_{21} - m_{03})^2 \quad (3)$$

$$n_4 = (m_{20}m_{02} - m_{11}^2)^2 + (m_{30}m_{03} - 3m_{12}m_{21})^2 \quad (4)$$

$$n_5 = (m_{20} + m_{02})^2 + 4m_{11}^2 \quad (5)$$

$$n_6 = (m_{30} + m_{12})^2 + (m_{21} + m_{03})^2 \quad (6)$$

$$n_7 = (m_{20}m_{02} - m_{11}^2)^2 + (m_{30}m_{03} - 3m_{12}m_{21})^2 \quad (7)$$

Bu momentler, görüntülerin temel yapısal özelliklerini tanımlamak için idealdir. Ancak Hu Momentlerinin büyüklükleri arasında ciddi farklılıklar olabileceği için, modelin bu değerleri dengeli bir şekilde işlemesi zorlaşabilir. Bu sorunu çözmek amacıyla log-normalizasyon uygulanır:

$$\emptyset_i^* = -sgn(\emptyset_i) \, . log_{10}(|\emptyset_i| + 1e - 10) \quad (8)$$

Buradaki sgn fonksiyonu, momentin işaretini korurken logaritmik dönüşüm, değerleri ölçek bağımsız hale getirir. Bu sayede özellik vektöründeki tüm momentler daha dengeli bir dağılıma kavuşur. Çalışmamızda, MNIST veri kümesindeki her bir görüntü için Hu Momentleri hesaplanmış, ardından yukarıda tanımlanan log-normalizasyon işlemi uygulanmıştır.

Zernike Momentleri, döndürme değişmezliği sağlayan ve bir görüntünün şekil özelliklerini dairesel harmonik fonksiyonlar kullanarak temsil eden ortogonal momentlerdir. Bu momentler, bir görüntünün frekans tabanlı temsiline benzer şekilde çalışarak, karmaşık yapıları daha etkin bir şekilde modelleme yeteneği sunar ve aşağıdaki denklemde olduğu gibi tanımlanır:

$$Z_{nm} = \frac{n+1}{n} \sum_x \sum_y f(x,y) V_{nm}^*(x,y) \quad (9)$$

Burada V_{nm}^* Zernike polinomlarını temsil ederken $f(x,y)$ ise görüntü piksel değerlerini temsil ediyor. Bu çalışmada, MNIST görüntülerinden Zernike Momentleri çıkarılmıştır. Zernike Momentlerinin ilk 8 bileşeni, Hu Momentleri ile birleştirilerek nihai özellik vektörü oluşturulmuştur.

Hu Momentleri ve Zernike Momentleri birleştirilerek 15 boyutlu bir özellik vektörü oluşturulmuştur. Bu özellikler, Evrişimli Sinir Ağı (CNN) modeline ek bir giriş olarak sunulmuştur. Elde edilen bu 15 boyutlu vektörler, CNN modeline ikinci bir giriş olarak eklenmiş ve modelin performansı belirgin şekilde iyileştirilmiştir. Özellikle log-normalize edilmiş Hu Momentlerinin ve ilk 8 Zernike Momentinin birleşimi, modelin hem doğruluk oranını artırmış hem de dönüşüm değişmez özellikler sayesinde modelin genelleme yeteneğini güçlendirmiştir.

Sonuç olarak, geleneksel özellik çıkarma yöntemlerinin derin öğrenme modellerine entegre edilmesi, modelin performansını iyileştirmede etkili olmuştur. Hu ve Zernike Momentlerinin sunduğu dönüşüm değişmez özellikler, modelin farklı varyasyonlardaki verilerle daha başarılı tahminler yapmasını sağlamıştır.

3.3. Önerilen Hibrid Model

Önerilen hibrit modelde, CNN mimarisi görsel özelliklerin çıkarılmasında ana yapı taşını oluşturmaktadır. SVHN veri kümesi üzerinde çalışıldığı için modelin girdi verisi 32x32 boyutunda üç kanallı (RGB) görüntülerdir. CNN yapısında, özellik çıkarımını güçlendirmek amacıyla ardışık konvolüsyon blokları kullanılmıştır. İlk blokta 32 filtreli, ikinci blokta 64 filtreli ve üçüncü blokta 128 filtreli 3x3 boyutunda evrişim katmanları yer almaktadır. Her evrişim katmanının ardından, öğrenme sürecini hızlandırmak ve kararlılığı artırmak için Batch Normalization uygulanmış ve özellik haritalarının boyutunu küçültmek için 2x2 boyutunda Maksimum Havuzlama (Max Pooling) katmanları eklenmiştir. Havuzlama işlemlerinin ardından elde edilen özellik haritaları düzleştirilerek (Flatten) tek boyutlu vektör haline getirilmiş ve 256 nöronlu tam bağlantılı (dense) bir katmana iletilmiştir. Bu katmanda ReLU aktivasyon fonksiyonu kullanılmış ve modelin aşırı öğrenmesini (overfitting) engellemek amacıyla %50 oranında Dropout uygulanmıştır. İlgili model parametrelerinin detaylıca gösterimi Çizelge 1 de olduğu gibidir.

Çizelge 1. Hibrit modelin parametreleri

Katman adı	Girdi boyutu	Çıkış boyutu	Açıklama
cnn_input	(32, 32, 3)	(32, 32, 3)	SVHN görüntüleri (32x32 RGB)
Conv2D + Batch	(32, 32, 3)	(32, 32, 32)	32 filtreli evrişim ve normalizasyon
MaxPooling2D	(32, 32, 32)	(16, 16, 32)	Boyut azaltma
Conv2D + Batch	(16, 16, 32)	(16, 16, 64)	64 filtreli evrişim (derinleşme)
MaxPooling2D	(16, 16, 64)	(8, 8, 64)	Boyut azaltma
Flatten	(8, 8, 64)	(4096,)	Düzleştirme işlemi
Dense	(4096,)	(256,)	Derin öznitelik çıkarımı
Dropout	(256,)	(256,)	%50 Dropout (Aşırı öğrenme önlemi)
moment_input	(15,)	(15,)	Hu ve Zernike momentleri
Dense + Batch	(15,)	(64,)	Momentlerin işlenmesi
Concatenate	(256,) + (64,)	(320,)	Özellik birleştirme (Fusion)

Geleneksel özellik çıkarma sürecinde, Hu Momentleri ve Zernike Momentlerinden yararlanılmıştır. Hu Momentleri, görüntünün şekil bilgilerini dönüşüm değişmez bir şekilde tanımlayan yedi farklı katsayıdan oluşmaktadır. Bu çalışmada Hu Momentlerine log-normalizasyon uygulanarak, moment değerlerindeki ölçek farklarının giderilmesi sağlanmış ve sayısal kararlılık artırılmıştır. Zernike Momentleri ise, görüntünün dairesel harmonik fonksiyonlar cinsinden temsiline dayanarak, dönme değişmez ve daha ayrıntılı bir özellik kümesi sunmaktadır. Bu bağlamda, Zernike Momentlerinin ilk sekiz terimi modele dahil edilmiştir. Hu ve Zernike Momentlerinden elde edilen toplam 15 boyutlu özellik vektörü, modelin ikinci girdi katmanı olarak tanımlanmıştır. Önerilen modelin bir diğer önemli unsuru, CNN ve geleneksel özelliklerin birleştirilmesi sürecidir. CNN'in çıkardığı derin özellikler ile Hu ve Zernike Momentlerinden elde edilen geleneksel özellikler birleştirilmiş ve bu birleşik özellik uzayı üzerinden nihai sınıflandırma yapılmıştır. İki farklı özellik kümesi bir araya getirilirken, geleneksel özelliklerin boyutu 16 nöronlu bir tam bağlantılı katman aracılığıyla modellenmiş ve böylece CNN katmanlarıyla uyum sağlanmıştır. Birleştirilen özelliklerden elde edilen bu zengin temsil, 32 nöronlu bir ara katman aracılığıyla işlenmiş ve softmax aktivasyon fonksiyonuna sahip bir çıkış katmanıyla 10 sınıflı MNIST rakamlarının tahmini gerçekleştirilmiştir. Modelin optimizasyon sürecinde Adam algoritması kullanılmıştır. Adam optimizatörü, adaptif öğrenme oranı yaklaşımı ile parametre güncellemelerini hızlandırırken, modelin kararlılığını da artırmaktadır. Kaybı ölçmek için kategorik çapraz entropi fonksiyonu tercih edilmiştir. Modelin performansını daha da artırmak için öğrenme oranının dinamik olarak ayarlanmasına olanak tanıyan Cosine Annealing Learning Rate Scheduler uygulanmıştır. Cosine Annealing, epoch sayısına bağlı olarak öğrenme oranını kosinüs fonksiyonuna göre düzenleyerek, optimizasyon sürecinin daha dengeli ve verimli ilerlemesini sağlamaktadır. Minimum ve maksimum öğrenme oranı arasında dalgalanan bu yöntem, modelin lokal minimumlara takılmadan daha geniş bir parametre alanını keşfetmesine yardımcı olmuştur. Model eğitimi sırasında aşırı öğrenmenin önüne geçmek ve modelin doğrulama setindeki performansını korumak amacıyla çeşitli erken durdurma ve öğrenme oranı ayarlama stratejileri uygulanmıştır. Early Stopping (Erken Durdurma) tekniği, doğrulama kaybında belirli bir iyileşme gözlenmediğinde eğitim sürecini sonlandırarak modelin gereksiz yere aşırı uyum sağlamasını engellemiştir. Önerilen hibrit modelin eğitimi, 50 epoch boyunca ve 512'lik batch size ile gerçekleştirilmiştir. Eğitim sürecinde modelin hem eğitim hem de doğrulama setindeki kayıp ve doğruluk değerleri takip edilmiştir. Eğitim sonunda modelin başarı performansı doğruluk, precision, recall, F1-score gibi metriklerle değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar görselleştirilmiştir. Ayrıca, tahmin edilen ve gerçek sınıflar arasındaki ilişkileri daha iyi analiz edebilmek için karışıklık matrisi oluşturulmuş ve modelin hangi sınıflarda ne derece başarılı olduğu detaylı bir şekilde incelenmiştir. Önerilen hibrit modelin performansı, yalnızca CNN mimarisine dayalı modellerle kıyaslandığında belirgin bir iyileşme göstermiştir. Hu ve Zernike Momentlerinden elde edilen geleneksel özelliklerin, modelin genel doğruluk oranını artırdığı gözlemlenmiştir. Özellikle dönme, ölçekleme ve kaydırma gibi geometrik dönüşümlere karşı modelin gösterdiği dayanıklılık, geleneksel özelliklerin entegrasyonunun model başarısına olan katkısını açıkça ortaya koymuştur. Öğrenme oranı planlayıcıları ve düzenleme teknikleriyle desteklenen bu hibrit yapı, farklı yöntemlerin güçlü yönlerini bir araya getirerek, görüntü sınıflandırma alanında etkili ve kararlı bir çözüm sunmuştur.

Önerilen hibrit modelin başarımı ve hesaplama verimliliği, literatürdeki modern hafif mimarilerden (lightweight architectures) biri olan MobileNetV3-Small ile kıyaslanmıştır. MobileNetV3, özellikle düşük işlem gücü gerektiren cihazlar için optimize edilmiş olsa da, genellikle yüksek çözünürlüklü girdiler (224x224) için tasarlanmıştır. Bu çalışmada adil bir kıyaslama yapabilmek adına, MobileNetV3 modeli ImageNet ağırlıkları kullanılarak transfer öğrenme (transfer learning) yöntemiyle başlatılmıştır. SVHN veri

setindeki 32x32 boyutlu görüntülerin, MobileNetV3 mimarisinde bilgi kaybına uğramadan işlenebilmesi için UpSampling katmanı kullanılarak boyutları 96x96'ya yükseltilmiş ve piksel değerleri 0-255 aralığına yeniden ölçeklendirilmiştir. Bu kıyaslama, önerilen yöntemin sadece doğruluk değil, aynı zamanda görüntü büyütme işlemine gerek duymadan sağladığı hız avantajını (ms) ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Deneysel sonuçların rastlantısal olmadığını kanıtlamak ve bilimsel güvenilirliği sağlamak amacıyla, tüm eğitim süreçleri (Hem Hibrit hem de MobileNetV3 için) 5 farklı rastgele çekirdek (seed) değeri (42, 123, 7, 2024, 99) kullanılarak tekrarlanmıştır. Modeller arasındaki performans farklarının istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirlemek için ise eşleştirilmiş t-testi (paired t-test) uygulanmış ve sonuçlar ortalama ± standart sapma olarak raporlanmıştır.

3.3. Modelin Eğitimi

Önerilen hibrit modelin eğitimi sürecinde, modelin genel başarısını artırmak ve aşırı öğrenmenin (overfitting) önüne geçmek amacıyla dikkatli bir hiperparametre seçimi ve çeşitli düzenleme teknikleri uygulanmıştır. Eğitim süreci, hem CNN mimarisi tarafından çıkarılan derin özelliklerin hem de Hu ve Zernike momentlerinden elde edilen geleneksel özelliklerin etkili bir şekilde birleştirilmesine dayanır. Bu bağlamda, modelin performansını optimize etmek için öğrenme oranı planlayıcıları, erken durdurma ve öğrenme oranı azaltma gibi callback mekanizmalarından da yararlanılmıştır. Modelin eğitimi, çalışmanın ana odak noktası olan SVHN veri kümesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. 32x32 boyutundaki üç kanallı (RGB) görüntüler, CNN mimarisinin girdi verisi olarak kullanılmıştır. Görüntülerin piksel değerleri 0-255 aralığından 0-1 aralığına normalize edilerek modele daha stabil bir öğrenme süreci sağlanmıştır. Ayrıca, son sınıflandırma katmanında 10 sınıflı SVHN rakamlarının (0-9) tahmini gerçekleştirilmiştir.

Cosine Annealing Learning Rate Scheduler, modelin öğrenme oranını dinamik bir şekilde ayarlayarak optimizasyon sürecinde daha stabil bir performans elde edilmesini sağlamıştır. Bu planlayıcı, öğrenme oranını epoch sayısına bağlı olarak kosinüs fonksiyonuna göre ayarlamış, minimum ve maksimum değerler arasında dalgalanan bir öğrenme oranı belirlemiştir. Bu sayede model, lokal minimumlara takılmadan daha geniş bir parametre alanını keşfetme fırsatı bulmuştur. Kullanılan değerlendirme metrikleri modelin başarımı, eğitim ve doğrulama aşamalarında izlenen çeşitli metrikler aracılığıyla değerlendirilmiştir:

• Accuracy (Doğruluk): Modelin doğru sınıflandırma oranını gösterir.

• Loss (Kayıp): Modelin tahminleri ile gerçek etiketler arasındaki farkı ölçen bir fonksiyon. Categorical crossentropy kullanılmıştır.

Bu metrikler, modelin hem eğitim hem de doğrulama setindeki performansını izlemek için görselleştirilmiştir. Eğitim süreci boyunca kayıp ve doğruluk değerlerindeki değişimler, modelin genel başarısının takibini kolaylaştırmıştır. Kullanılan callback mekanizmaları modelin eğitim sürecinde aşırı öğrenmenin önüne geçmek ve öğrenme oranını etkili bir şekilde ayarlamak için çeşitli callback mekanizmalarından yararlanılmıştır:

• Early Stopping: Modelin doğrulama kaybı belirli bir süre boyunca iyileşme göstermediğinde eğitimi durdurarak aşırı öğrenmenin önüne geçmiştir. Bu yöntem, modelin gereğinden fazla epoch çalışmasını engelleyip, en iyi ağırlıkların korunmasını sağlamıştır.

• Cosine Annealing Learning Rate Scheduler: Öğrenme oranının epoch'lara göre dinamik bir şekilde dalgalanmasını sağlamış, optimizasyon sürecinin daha dengeli ve verimli ilerlemesine katkıda bulunmuştur.

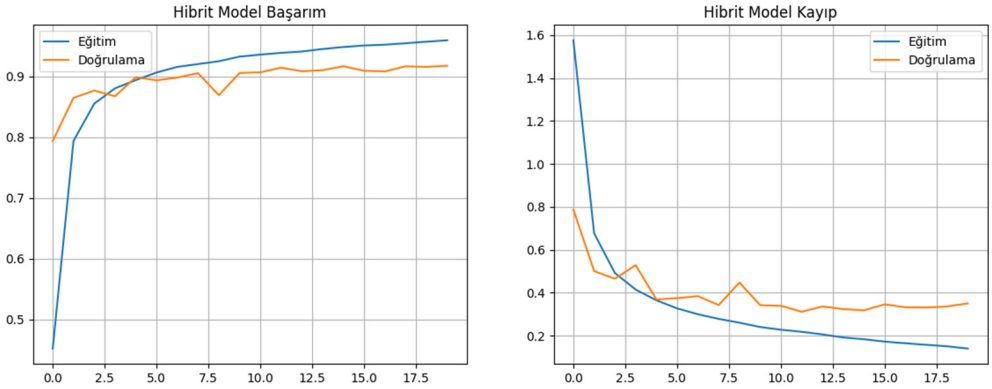
Bu callback mekanizmalarının birleşimi, modelin hızlı ve etkili bir şekilde öğrenmesini sağlarken, aşırı uyum riskini de minimize etmiştir. Özellikle Cosine Annealing yöntemiyle desteklenen öğrenme oranı ayarlaması, modelin daha geniş bir parametre uzayını keşfetmesine yardımcı olmuştur. Eğitim sürecinin sonunda modelin performansı, eğitim ve doğrulama setindeki kayıp ve doğruluk grafikleri aracılığıyla görselleştirilmiş ve sınıflandırma raporu ile detaylandırılmıştır. Ayrıca, tahmin edilen ve gerçek etiketler arasındaki uyumu analiz etmek için karışıklık matrisi oluşturulmuş, modelin hangi sınıflarda ne kadar başarılı olduğu incelenmiştir. Bu analizler, modelin genel başarısını ve eksik yönlerini açıkça ortaya koyarak, hibrit yaklaşımın sınıflandırma performansına olan katkısını net bir şekilde göstermiştir.

4. DENEYLER VE ÇIKTILAR

Bu bölümde, önerilen hibrit modelin performansı, gürültülü ve zorlu koşulları temsil eden SVHN veri kümesi üzerinde değerlendirilmiş ve literatürdeki modern hafif (lightweight) mimarilerle kıyaslanmıştır. Modelin başarımı; doğruluk (accuracy), kayıp (loss) değerleri, sınıflandırma matrisi ve hesaplama maliyeti (çıkarım süresi) üzerinden analiz edilmiştir.

4.1. Modelin Öğrenme Dinamikleri ve Performans Analizi

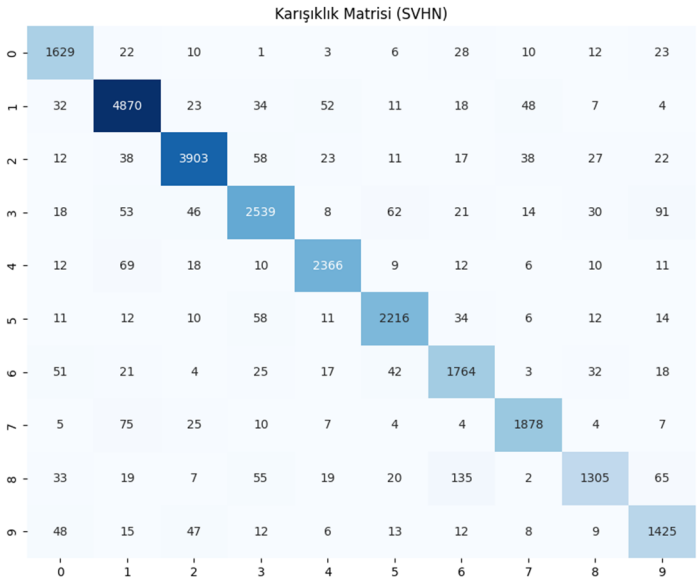
Önerilen modelin eğitim süreci boyunca gösterdiği kararlılık ve öğrenme davranışı, kayıp ve doğruluk grafikleri üzerinden incelenmiştir. Şekil 1'de, eğitim ve doğrulama setleri üzerindeki kayıp değerlerinin değişimi sunulmuştur.



Şekil 1. Hibrit modelin eğitim ve doğrulama sürecindeki kayıp (loss) ve doğruluk (accuracy) değişimleri

Şekil 1'deki grafikler incelendiğinde, modelin eğitim ve doğrulama kayıplarının (Loss) birbirine paralel ve istikrarlı bir şekilde düştüğü görülmektedir. Yaklaşık 10. epoch'tan itibaren kayıp değerleri 0.35 seviyelerinde stabilize olmuştur. Doğruluk (Accuracy) grafiğinde ise modelin doğrulama seti üzerinde %90.97 seviyelerinde bir başarıma ulaştığı gözlemlenmiştir. Eğitim ve doğrulama eğrileri arasındaki farkın (gap) dar olması, modelin SVHN gibi yüksek gürültülü bir veri setinde dahi aşırı öğrenme (overfitting) probleminden kaçındığını ve güçlü bir genelleme yeteneğine sahip olduğunu kanıtlamaktadır.

Modelin sınıflandırma performansını daha detaylı analiz etmek amacıyla, test veri seti üzerindeki tahminler kullanılarak Karışıklık Matrisi (Confusion Matrix) oluşturulmuştur (Şekil 2).



Şekil 2. SVHN veri seti üzerinde hibrit modelin karışıklık matrisi

Şekil 2 incelendiğinde, modelin diyagonal eksendeki yüksek yoğunluk, sınıfların büyük çoğunluğunun doğru tahmin edildiğini göstermektedir. Özellikle SVHN veri setindeki bulanık ve deforme olmuş rakamlara rağmen, modelin sınıf ayrıştırma başarısının yüksek olduğu görülmektedir. Hataların (matrisin diyagonal dışı elemanları) genellikle görsel olarak birbirine çok benzeyen sınıflar arasında (örneğin "1" ve "7" veya "3" ve "5") yoğunlaştığı, ancak bu hataların genel performansı düşürecek seviyede olmadığı tespit edilmiştir.

4.2. Hesaplama Maliyeti ve Modern Mimarilerle Kıyaslama

Çalışmanın temel katkılarından biri olan "verimlilik" analizini ortaya koymak amacıyla, önerilen Hibrit model; temel CNN mimarisi ve modern hafif mimarilerin en güçlü temsilcilerinden MobileNetV3-Small ile kıyaslanmıştır. Sonuçların güvenilirliğini sağlamak için tüm modeller 5 farklı rastgele çekirdek (seed) değeri ile test edilmiş ve ortalama sonuçlar Çizelge 2'de raporlanmıştır.

Çizelge 2. SVHN veri seti üzerinde performans ve hız kıyaslaması (ortalama ± standart sapma)

Model	Doğruluk (Ort. ± Std)	Çıkarım süresi (Inference time)	İstatistiksel fark (p-değeri)
CNN	%91.69 ± 0.09	603.93 ms	Anlamsız (p > 0.05)
MobileNetV3	%91.61 ± 0.74	3276.07 ms	Anlamsız (p > 0.05)
Önerilen hibrit	%90.97 ± 0.60	760.24 ms	-

Çizelge 2'deki veriler, doğruluk açısından modeller arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark oluşmadığını ($p > 0.05$) göstermektedir. Önerilen model, karmaşık MobileNetV3 mimarisiyle rekabetçi bir doğruluk oranına sahiptir.Ancak çalışmanın en kritik bulgusu hız analizinde ortaya çıkmıştır. MobileNetV3, yüksek çözünürlük (224x224) gerektiren yapısı nedeniyle görüntü büyütme (upsampling) işlemine ihtiyaç duymakta ve bu durum işlem süresini 3276.07 ms seviyesine çıkarmaktadır. Önerilen Hibrit model ise ham görüntü boyutunda (32x32) çalışarak aynı işlemi 760.24 ms sürede tamamlamaktadır. Bu sonuç, önerilen yöntemin MobileNetV3'ten yaklaşık 4.3 kat daha hızlı çalıştığını ve gerçek zamanlı uygulamalar için çok daha verimli (cost-effective) bir çözüm sunduğunu kanıtlamaktadır.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, rakam sınıflandırma problemleri için derin öğrenme mimarileri ile geleneksel görüntü işleme tekniklerini (Hu ve Zernike Momentleri) birleştiren hibrit bir model önerilmiştir. Önerilen yaklaşım, CNN mimarisinin otomatik öznitelik çıkarma yeteneği ile Hu ve Zernike Momentlerinin geometrik değişmezlik (dönme ve ölçekleme direnci) özelliklerini entegre etmiştir. Modelin gürültüye ve geometrik bozulmalara karşı dayanıklılığını test etmek amacıyla, literatürdeki zorlu veri setlerinden biri olan SVHN kullanılmıştır.Deneysel sonuçlar, önerilen hibrit modelin %90.97 ortalama doğruluk oranıyla, modern MobileNetV3 mimarisi (%91.61) ile rekabetçi bir performans sergilediğini göstermiştir. Yapılan istatistiksel testler, iki model arasındaki doğruluk farkının anlamsız olduğunu ($p > 0.05$) ortaya koymuştur. Ancak çalışmanın en önemli bulgusu, hesaplama maliyeti analizinde görülmüştür. Önerilen hibrit yapı, MobileNetV3'e kıyasla 4 kattan fazla hız avantajı (760 ms'ye karşılık 3276 ms) sağlayarak, düşük donanım kaynağına sahip gömülü sistemler ve gerçek zamanlı uygulamalar için üstünlüğünü kanıtlamıştır.Elde edilen bulgular, geometrik özniteliklerin modele entegrasyonunun, doğruluktan ödün vermeden işlem yükünü hafiflettiğini doğrulamaktadır. Gelecek çalışmalarda, bu hibrit yaklaşımın Vision Transformer (ViT) gibi daha yeni nesil mimarilere entegrasyonu ve farklı nesne tanıma problemlerindeki etkinliği araştırılacaktır.

6. KAYNAKLAR

1. Patidar, P.K., Tomar, D.S., Pateriya, R.K. & Sharma, Y.K. (2023). Precision agriculture: Crop image segmentation and loss evaluation through drone surveillance. *2023 Third International Conference on Secure Cyber Computing and Communication (ICSCCC),* Jalandhar, India, 495-500.
2. Wang, Y. (2025). Deep learning based image classification algorithm. *In 2025 IEEE 5th International Conference on Power, Electronics and Computer Applications (ICPECA)*, 505-509. IEEE.
3. He, K., Zhang, X., Ren, S. & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. *In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 770-778.

4. LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y. & Haffner, P. (2002). Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE, 86*(11), 2278-2324.
5. Tomar, A. & Patidar, H. (2023). Optimizing CNN model performance for MNIST and CIFAR classification using rectified sigmoid and ReS activation functions. *In 2023 7th International Conference On Computing, Communication, Control and Automation (ICCUBEA),*1-6. IEEE.
6. Singh, B.K., Rai, A., Kundu, K., Kalita, K. & Agrawal, R. (2024). An empirical analysis of invariance Hu's moment feature over a digital image. *In 2024 11th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO)*, 1-5. IEEE.
7. Lai, Z., Yao, Z., Lai, G., Wang, C. & Feng, R. (2024). A novel face swapping detection scheme using the Pseudo Zernike transform based robust watermarking. *Electronics, 13*(24), 4955.
8. Lei, G., Lai, W., Meng, Q., Liu, H., Shi, D., Cui, W. & Han, K. (2023). Efficient and noise-resistant single-pixel imaging based on Pseudo-Zernike moments. *Optics Express, 31*(24), 39893-39905.
9. Fu, D., Zhou, X., Xu, L., Hou, K. & Chen, X. (2023). Robust reversible watermarking by fractional order Zernike moments and pseudo-Zernike moments. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 33*(12), 7310-7326.
10. Jusman, Y., Anam, M.K., Puspita, S. & Saleh, E. (2021). Machine learnings of dental caries images based on Hu moment invariants features. *In 2021 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (iSemantic)*, 296-299. IEEE.
11. Zheng, N., Zhang, G., Zhang, Y. & Sheykhahmad, F.R. (2023). Brain tumor diagnosis based on Zernike moments and support vector machine optimized by chaotic arithmetic optimization algorithm. *Biomedical Signal Processing and Control, 82*, 104543.
12. Gül, E. & Bilgiç, S. (2025). Secret image hiding method based on multi-cover image with stego image sequence detection using perceptive hash. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40*(4), 927-936.
13. Wan, G. & Yao, L. (2023). LMFRNet: A lightweight convolutional neural network model for image analysis. *Electronics, 13*(1), 129.
14. AbuRass, S., Huneiti, A. & Al-Zoubi, M.B. (2020). Enhancing convolutional neural network using Hu's moments. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 11*(12), 130-137.
15. Ala, M., Şahin, M., Kılıç, M. & Dişken, G. (2025). An investigation on design criteria of heat exchangers by using tree models of machine learning methods. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40*(2), 375-386.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 1 MART/MARCH 2026

Alkali Dayanımlı Cam Elyaf Kullanımının Beton Dayanımına Etkisi

Mutlu KURBAN [1,a]

[1]*Çukurova Üniversitesi, AOSB Teknik Bilimler MYO, Tekstil Teknolojisi Programı, Adana, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0001-9132-0349*

Makale Bilgileri
Geliş : 10.12.2025
Kabul : 12.02.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1840045

Sorumlu Yazar
Mutlu KURBAN
mkurban@cu.edu.tr

Anahtar Kelimeler
Cam elyaf
Elyaf takviyeli beton
Basınç dayanımı
Eğilme dayanımı

***Atıf şekli:** KURBAN, M., (2026). Alkali Dayanımlı Cam Elyaf Kullanımının Beton Dayanımına Etkisi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(1), 155-164.*

ÖZ

Elyaf takviyeli beton (ETB), geleneksel betonun kırılgan doğasını, içine rastgele dağıtılmış kısa elyaflarla aşarak malzemenin performansını önemli ölçüde artıran bir yapı elemanıdır. Bu takviye, özellikle çekme, eğilme ve darbe dayanımında iyileşmeler sağlar ve çatlak oluşumunu kontrol altına alarak betonun sünekliğini ve enerji yutma kapasitesini artırır. Bu avantajlar sayesinde ETB, yol kaplamaları, endüstriyel zeminler, tünel kaplamaları ve depreme dayanıklı yapılar gibi yüksek performans gerektiren alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada iki ticari firmanın cam elyafı, 2 farklı uzunluk ve 4 farklı elyaf hacim oranında beton takviyesinde kullanılmıştır. Üretilen numunelere basınç ve eğilme dayanımı uygulanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Hacimce %0,3 elyaf kullanıldığında en iyi basınç ve eğilme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Kırılma enerjisinde sehim etkisi nedeniyle en iyi değerler %0,2 ve %0,3 elyaf hacim oranlarında elde edilmiştir.

Effect of Alkali-Resistant Glass Fiber Using on Concrete Strength

Article Info
Received : 10.12.2025
Accepted : 12.02.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1840045

Corresponding Author
Mutlu KURBAN
mkurban@cu.edu.tr

Keywords
Glass fiber
Fiber reinforced concrete
Compressive strength
Flexural strength

***How to cite:** KURBAN, M., (2026). Effect of Alkali-Resistant Glass Fiber Using on Concrete Strength. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(1), 155-164.*

ABSTRACT

Fiber-reinforced concrete (FRC) is a structural element that overcomes the brittle nature of conventional concrete by incorporating randomly distributed short fibers, significantly enhancing the material's performance. This reinforcement provides improvements in tensile, flexural, and impact strengths, and controls crack formation, enhancing concrete's ductility and energy absorption capacity. Thanks to these advantages, FRC is widely used in high-performance applications such as road pavements, industrial floors, tunnel linings, and earthquake-resistant structures. In this study, fiberglass from two commercial companies was used in concrete reinforcement in two different lengths and four different fiber volume ratios. The produced samples were subjected to compressive and flexural strength tests, and the results were evaluated. The best compressive and flexural strength values were obtained when using 0.3% fiber by volume. Due to the deflection effect on fracture energy, the best values were obtained at 0.2% and 0.3% fiber volume ratios.

1. GİRİŞ

Bileşenleri ele alındığında tarihi çok eskiye dayanan beton, modern mimari formların geliştirilmesinde kalıcı bir etki yaratmaktadır. Portland çimentosunun icadı modern beton gelişiminin başlangıç yılı olarak kabul edilmiş ve bu dönemden günümüze kadar beton temel yapı malzemesi olarak kullanılmıştır [1]. Çimento, agrega, su, kimyasal ve mineral katkıların karışımıyla elde edilen beton günümüzde de yaygın kullanılan bir yapı malzemesidir [2]. Beton, doğası gereği sadece basınç kuvvetlerine karşı dayanıklıdır; çekme, kesme ve burkulma etkilerinde yetersiz kalır. Bu nedenle betonun, sünek bir malzeme olan çelikle bir arada kullanılmasıyla, her iki malzemenin avantajlarını birleştiren betonarme yapılar geliştirilmiştir. Ancak çeşitli çevresel faktörler nedeniyle donatıda meydana gelen korozyon inşaat sektörünün en büyük problemlerinden birini oluşturmaktadır. Korozyonla birlikte beton ve donatı arasındaki aderans yok olmakta ve donatı işlevini gösterememektedir [3]. Günümüzde de çeşitli tekstil lifleri betonların dayanımını artırmak için kullanılmaktadır [2]. Beton takviyesinde çelik kullanımından kaynaklanan problemlerden ötürü son dönemlerde korozyon dayanımına sahip olmasından dolayı Elyaf Takviyeli Polimerler (ETP) - Fiber Reinforced Polymers (FRP) çelik donatılara alternatif olarak takviye malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu yapıların yüksek dayanım özellikleri, yoğunluğunun çeliğe göre düşük olması ve çeşitli kimyasal etkilere karşı yüksek dayanımı sayesinde endüstriyel alandaki kullanımlarda geniş yer bulmuştur [3].

ETB (FRC), matris içerisinde rastgele dağılmış lifler içeren kompozit bir yapı malzemesi olarak tanımlanmaktadır. 1960'lı yıllardan itibaren yoğun akademik ve endüstriyel ilgi odağı haline gelen ETB, başlangıçta öngörülenin ötesinde bir gelişim göstererek modern beton teknolojisinde stratejik bir konum elde etmiştir. Günümüzde konu üzerine üretilen geniş literatür hacmi ve süreklilik arz eden uluslararası bilimsel organizasyonlar, ETB'nin teknolojik gelişim potansiyeline olan yüksek düzeydeki ilginin güncelliğini koruduğunu teyit etmektedir [4]. ETB, çeşitli özelliklerinin geliştirmek için karışımına farklı türde ve oranda liflerin katılması ile elde edilen özel betonlardır. Beton karışımlarında başlıca; cam, çelik, polimer ve karbon lifler kullanılmaktadır [5,6].

Beton takviyesinde yaygın olarak kullanılan cam elyaf hem elyaf hem de fitil formunda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [7]. Özel üretim bir yapı malzemesi olan cam elyaf takviyeli beton, uluslararası literatürde GFRC (Glass Fiber Reinforced Concrete) olarak bilinmektedir. İnce agrega, yüksek oranda çimento karışımı, cam elyafı ve polimer katkının özel kalıplara püskürtülmesi veya dökülmesi suretiyle GFRC üretimi gerçekleştirilir [8]. Uygulama türüne göre içine; beyaz çimento, silis kumu, alkaliye dayanıklı cam fiber, su, plastik polimer, pigmentler, mermer tozu, ayna sırrı parçaları gibi farklı katkılar da eklenerek üretim şekillendirilebilmektedir [9].

GFRC sahip olduğu dayanım ve mukavemet sayesinde uzun yıllar kullanılabilen bir yapı malzemesidir. Sahip olduğu yüksek doluluk oranı ve düşük geçirgenlik sayesinde yapıların cephelerinde kullanılması durumunda su geçirmez özellik sağlamaktadır. Klasik uygulamada kullanılan çelik donatı yerine cam elyafı kullanılması durumunda kesitler incelmekte ve böylelikle binaya binen yük oldukça azalmaktadır. Ayrıca malzemenin hafifliği sayesinde montaj kolaylığını da sağlanmaktadır [9].

Yapılan araştırmalar çimento matrisinin sahip olduğu yüksek alkali ortam nedeniyle cam elyaf liflerinde aşınmalar meydana geldiğini göstermiştir [10]. Ortaya çıkan bu problem nedeniyle beton içerisinde kullanılması için alkali dayanımı yüksek olan cam lifleri üretilmiştir [11]. Örneğin su/çimento oranı 0,32 olan bir beton harcı, alkali dayanımı cam elyafı ile bir araya gelerek normal betona göre basınç, eğilme ve darbe dirençleri oldukça yüksek olan beton karışımları oluşturur. Karışımda kullanılan alkali dayanımlı cam lifler donatı görevi üstlendiğinden harcın içerisine demir ya da çelik donatı konulmasına gerek kalmamaktadır. Bu avantajları nedeniyle GRFC'ler, 1-1,5 cm gibi ince denilebilecek kalınlıkta ve sınırsız tasarım olanaklarında üretilebilmektedir. Ayrıca düşük ağırlıkta olması itibariyle üretim, montaj ve nakliye kolaylığı sağlamaktadır [12,13].

Sanjeev ve Sai Nitesh (2020)'nin yürüttükleri çalışma cam elyaf takviyeli beton numunelerin takviyesiz numunelere göre daha iyi mekanik performans özellikleri gösterdiğini ortaya koymuştur [14]. Yapılan diğer

bir çalışmada ise cam elyaf takviyesinin betonun basınç, yarmada çekme mukavemeti ve eğilme mukavemet değerlerinde belirgin birer artışa neden olduğunu ortaya koymuştur [15]. Yıldız ve ark. (2010)'daki çalışmalarında 5-10 kg/m^3 dozajlı cam elyaf kullanılarak üretilen numunelerin çekme dayanımının kontrol numunesine göre daha yüksek çıktığı görülmüştür [16]. Hacimce %0.25, %0.5, %0.75 ve %1 oranlarında cam elyaf kullanımının gerçekleştiği çalışmada en yüksek eğilme dayanımı % 0.5 cam elyafı kullanılan beton numunelerde [17] ve hacimce %0.6, %0.8 ve %1 oranlarında cam elyafı kullanılmış başka bir çalışmada ise en yüksek eğilme dayanımı %1 oranında cam elyaf kullanılmış beton numunelerde elde edilmiştir [18].

Yürütülen çalışmada; tekstil takviyeli beton üretiminde kullanımı uygun olan alkali dayanımlı cam elyafın iki farklı uzunluk ve dört farklı hacim oranında kullanımının betonun performans özellikleri üzerine etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Kıyaslama yapmak amacıyla piyasada kullanılan iki farklı ticari alkali dayanımlı cam elyaf kullanılmış ve bu elyaflar ile üretimi gerçekleştirilen numunelerin performans özellikleri kıyaslanmıştır.

2. YÖNTEM

2.1. Materyal

Bu çalışmada beton takviyesi için 6 ve 12 mm uzunluklarında alkali dayanımlı cam elyaf kullanılmıştır. Karşılaştırma yapmak amacıyla Owens Corning ve Nippon Electric Glass firmalarının elyafları kullanılmış olup teknik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Çalışmanın bundan sonraki bölümünde Owens Corning alkali dayanımlı cam elyafı OC olarak, Nippon Electric Glass alkali dayanımlı cam elyafı NEG olarak kodlanıp kullanılmıştır.

Çizelge 1. Materyallerin teknik özellikleri

Elyaf türü	Yoğunluk (g/cm^3)	Çekme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)
OC	2,68	1000 <	72
NEG	2,8	1500	74

Elyaf takviyeli beton kompozit bir yapı olup takviye bileşenini tekstil elyafı oluştururken matris bileşenini ise beton oluşturmaktadır. Beton karışımı için çimento, uçucu kül, agrega, yüksek akışkanlaştırıcı ve su kullanılmış olup beton reçetesi Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Beton reçetesi

Bileşen	Agrega	Çimento	Uçucu kül	Kimyasal katkı	Su	Toplam
Türü	0-500 µ	CEM II/A-S 42.5 R (Oyak Çimento)	İSKEN	Yüksek akışkanlaştırıcı (Ultraton-Polisan)	Şebeke suyu	
Miktar (kg/m^3)	1133	480	240	12,96	270	2135,96

2.2. Metot

Yürütülen çalışmada alkali dayanımlı cam elyaf türünün ve kullanım oranının beton dayanımı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla 6 ve 12 mm uzunluğundaki OC ve NEG alkali dayanımlı cam elyaftan hacimce % 0,1-0,2-0,3-0,4 oranında kullanılarak beton karışımları hazırlanmıştır. Elyaf takviyesinin etkisini gözlemlemek için de elyaf takviyesi olmayan karışım ile birlikte toplam 17 beton karışımı hazırlanmıştır. Beton karışımın hazırlanması aşamasında önce katı malzemeler tartılmış ve mikser ile karışım için hazır edilmiştir. Katı malzemelerin karıştırılmasından 2 dk sonra cam elyaf ilave edilmiş (Şekil 1a) ve homojen bir karışım oluncaya kadar 2 dk boyunca karıştırma işlemi devam edilmiştir. Homojen bir karışımın elde edilmesinin ardından karışım için hesaplanan suyun üçte ikisi yavaş yavaş karışıma dökülür ve 2 dk daha karıştırmaya devam edilmiştir. Sonrasında kimyasal katkı olarak kullanılacak yüksek akışkanlaştırıcı karışıma yavaş yavaş ilave edilmiş ve bu şekilde 2 dk daha karıştırılmıştır. Son olarak kalan su karışıma ilave edilerek 2 dk daha karıştırmaya devam edilmiş (Şekil 1b) ve homojen beton karışımı hazırlanmıştır.



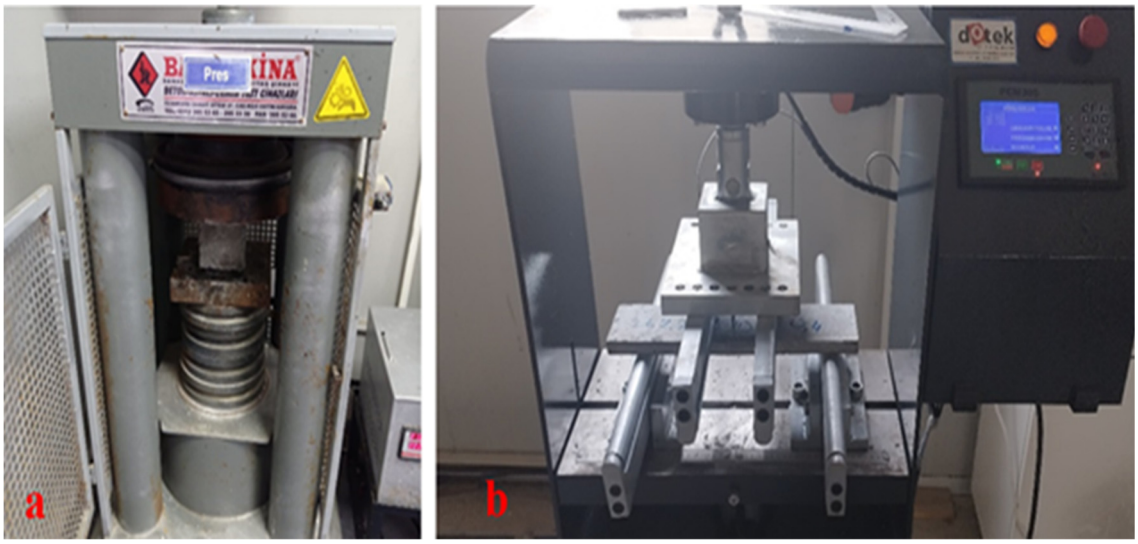
Şekil 1. a) Beton karışımına elyaf ilavesi b) Beton karışımın mikserle hazırlanması

Hazırlanan beton karışımın dayanımının belirlenmesi için küp ve kiriş numuneler hazırlanmıştır. Basınç dayanımının belirlenebilmesi için 100x100x100 mm ebatlarında 3'er adet küp ve eğilme dayanımının belirlenebilmesi için de 400x100x20 mm ebatlarında 4'er adet kiriş numuneler hazırlanmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Küp ve kiriş beton numuneleri

Beton karışımı kalıplara dökülüp numuneler hazırlandıktan sonra kuruması için 24 saat bekletilir ve sonrasında kalıplardan çıkartılır. Kalıplardan çıkartılan numuneler numaralandırılır ve kürlenmesi için 20ºC sıcaklıktaki su bulunan havuza yerleştirilir. 28.günlük kürleme süresi sonunda numuneler havuzdan çıkartılır ve kuruduktan sonra ilgili testler uygulanır. Küp numunelere TS EN 12390-3 [19] standardına göre basınç dayanımı test cihazında (Şekil 3a) basınç dayanımı deneyi uygulanır. Kiriş numunelere ise TS EN 12390-5 [20] standardına göre eğilme dayanımı test cihazında (Şekil 3b) dört nokta eğilme dayanımı deneyi uygulanır.



Şekil 3. a) Basınç dayanımı test cihazı, b) Eğilme dayanımı test cihazı

Eğilme dayanımı TS EN 12390-5 standardında belirtilen Eşitlik 1'e göre hesaplanmıştır.

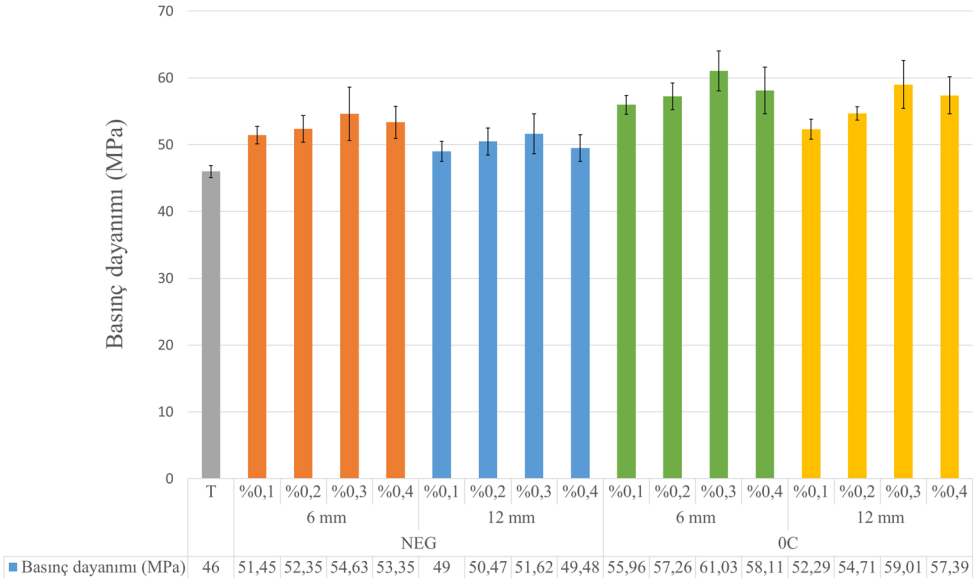
$$\sigma = \frac{(Pl)}{(bh^2)} \tag{1}$$

Eşitlikte; eğilme dayanımı σ (MPa) , kırılma yükü P (N), mesnetler arası mesafe l (mm), numune genişliği b (mm) ve numune kalınlığı h (mm) ile gösterilmiştir.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Basınç Dayanımı

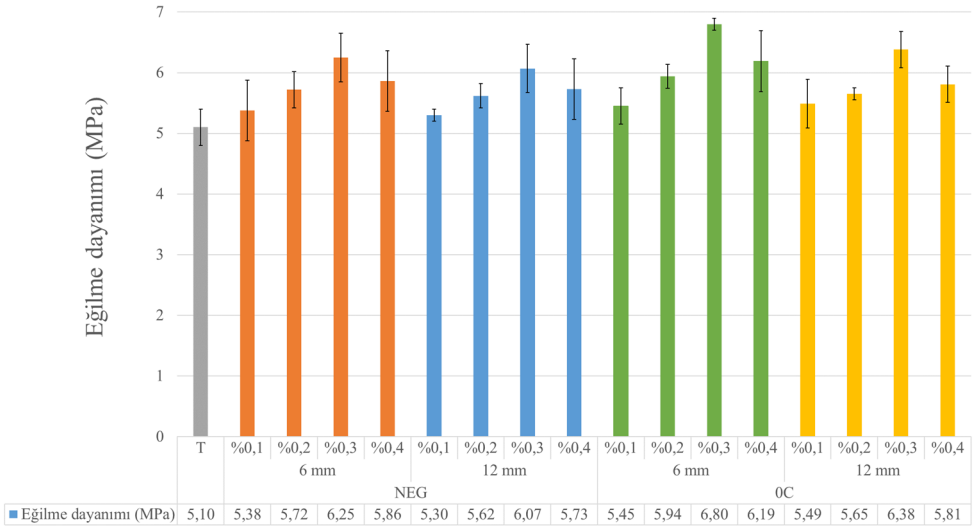
Şekil 4'de elyaf takviyeli beton numunelerin basınç dayanımı değerleri verilmiştir. Karşılaştırma yapmak amacıyla takviyesiz beton numunesinin de test sonuçlarına yer verilmiştir. Grafik incelendiğinde her bir takviye türünün ve takviye oranının betonun basınç dayanımına katkı sağladığı görülmüştür. Elyaf türleri karşılaştırıldığında OC cam elyafın NEG cam elyafa göre daha yüksek basınç dayanımı değeri verdiği görülmektedir. Her iki elyaf tipinin sahip olduğu zirkonyum miktarının ve beton içerisindeki karakteristik özelliklerinin bu farka neden olduğu düşünülmektir. Elyaf takviyeli sistemlerde, bileşimdeki zirkonyum oranının beton içindeki elyafın alkali dayanımı üzerindeki belirleyici rolü Daskiran ve arkadaşları [21] tarafından rapor edilmiştir. Söz konusu kimyasal içeriğin, beton matrisi içerisindeki lif bütünlüğünü koruyarak yapısal dayanımı artırdığı saptanmıştır. Elyaf türleri kendi içerisinde karşılaştırıldığında ise aynı elyaf hacim oranında 6 mm elyaf takviyeli beton numunelerin daha yüksek basınç dayanımı gösterdiği görülmüştür. Elyaf uzunluğunun kısalması karışım içine girecek elyaf miktarını bu da beton-lif bağlantı sayısını artırmıştır. Kullanılan elyaf oranının etkisi incelendiğinde her iki elyaf türü ve uzunluğu için de en yüksek basınç dayanımı değerlerinin hacimce %0,3 elyaf kullanılması durumunda elde edildiği görülmüştür. Takviye için kullanılan elyafın hacim oranı arttıkça basınç dayanımı artmış %0,3'ten sonra Zhang ve arkadaşları [22] çalışmasındaki gibi azalışa geçmiştir. Elyaf katkı oranının artırılması, Hu ve arkadaşları [23] çalışmasında da gözlemlendiği üzere, basınç dayanımında her zaman doğru orantılı bir artış sağlamamış; aksine belirli bir dozajın üzerinde dayanım değerlerinde duraklama veya azalma kaydedilmiştir. Her bir grubun en yüksek basınç dayanımı veren numuneleri takviyesiz numune ile karşılaştırıldığında; NEG cam elyaf kullanılması durumunda 6 mm'li numuneler %18,8, 12 mm'li numuneler %12,2; OC cam elyaf kullanılması durumunda ise 6 mm'li numuneler %32,7, 12 mm'li numuneler %28,3 basınç dayanımı artışı sağlamıştır.



Şekil 4. Elyaf takviyeli beton numunelerin basınç dayanımları

3.2. Eğilme Dayanımı

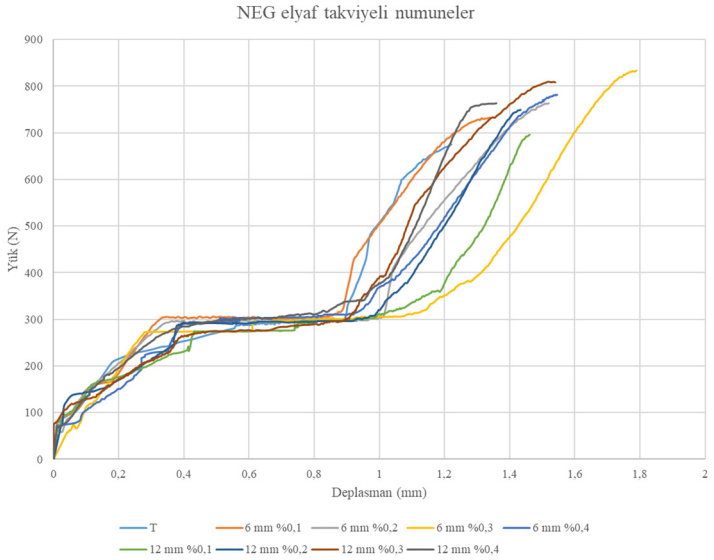
Şekil 5'de elyaf takviyeli beton numunelerin eğilme dayanımı değerleri verilmiştir. Karşılaştırma yapmak amacıyla takviyesiz beton numunesinin de test sonuçlarına yer verilmiştir. Basınç dayanımında olduğu gibi eğilme dayanımı için de her bir takviye türünün ve takviye oranının betonun eğilme dayanımına katkı sağladığı görülmüştür. Elyaf türleri karşılaştırıldığında aynı elyaf uzunluğu ve elyaf hacminde OC cam elyafın NEG cam elyafa göre daha yüksek eğilme dayanımı değeri verdiği görülmektedir. Elyaf türleri kendi içerisinde karşılaştırıldığında ise aynı elyaf hacim oranında 6 mm elyaf takviyeli beton numunelerin daha yüksek eğilme dayanımı gösterdiği görülmüştür. Elyaf takviyesinin beton eğilme dayanımına etkisi basınç dayanımı ile benzerlik göstermiştir. Beton takviyesinde elyaf kullanımı Moawad ve El-Hanafy [24] ve Lee ve arkadaşları [25] çalışmalarındakine benzer şekilde yük taşıma kapasitesi ve eğilme dayanımı artmıştır. Kullanılan elyaf oranının etkisi incelendiğinde her iki elyaf türü ve uzunluğu için de en yüksek eğilme dayanımı değerlerinin hacimce %0,3 elyaf kullanılması durumunda elde edildiği görülmüştür. Takviye için kullanılan elyafın hacim oranı arttıkça eğilme dayanımı artmış %0,3'ten sonra azalışa geçmiştir. Her bir grubun en yüksek eğilme dayanımı veren numuneleri takviyesiz numune ile karşılaştırıldığında; NEG cam elyaf kullanılması durumunda 6 mm'li numuneler %22,5, 12 mm'li numuneler %19; OC cam elyaf kullanılması durumunda ise 6 mm'li numuneler %33,3, 12 mm'li numuneler %25,1 eğilme dayanımı artışı sağlamıştır.



Şekil 5. Elyaf takviyeli beton numunelerin eğilme dayanımları

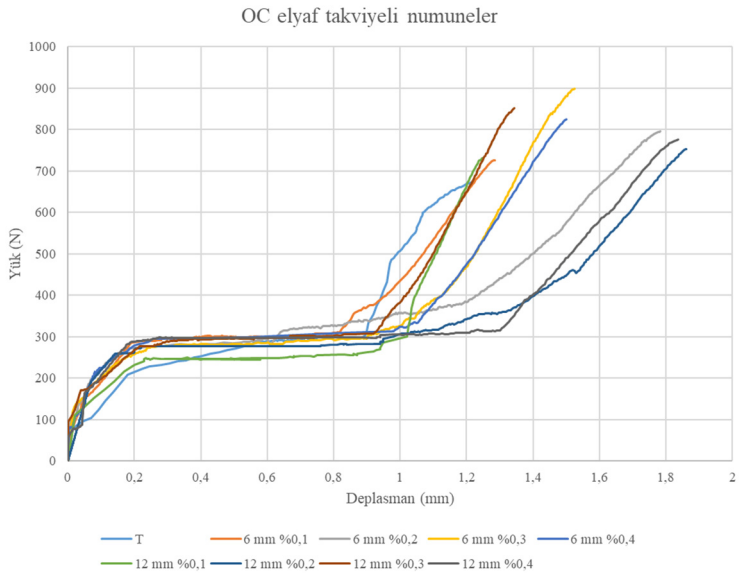
3.3. Yük-Deplasman Grafikleri

Eğilme deneyi sırasında numunelere uygulanan yük ve oluşan sehim değerlerinden yük-deplasman grafikleri oluşturulmuştur. NEG elyaf takviyeli numunelerin grafiklerine Şekil 6'da, OC elyaf takviyeli numunelerin grafiklerine ise Şekil 7'de yer verilmiştir. Yaltay ve arkadaşları [26] çalışmalarına benzer şekilde lif oranı arttıkça eğrilerin ulaştığı maksimum yük değerleri de artmıştır. Grafikler incelendiğinde numunelerin benzer bir eğilimde olduğu görülmektedir. Şekil 6 incelendiğinde NEG elyaf takviyesinin beton numunenin yük taşıma kapasitesini artırdığı görülmüştür. Ayrıca elyaf takviyesi ile birlikte oluşan sehim değerlerinde az da olsa artış görülmüştür. 6 mm uzunluğundaki NEG elyafın hacimce %0,3 kullanıldığı numuneler en büyük yük ve sehim değerini vermiştir.



Şekil 6. NEG elyaf takviyeli beton numunelerin yük-deplasman grafikleri

Şekil 7 incelendiğinde OC elyaf takviyesinin de NEG elyaf takviyesindeki gibi beton numunelerin yük taşıma kapasitesini artırdığı görülmüştür. Ancak sehim değerlerindeki artış NEG elyaf kullanımınkinden daha fazla olmuştur. 6 mm uzunluğundaki OC elyafın hacimce %0,3 kullanıldığı numuneler en büyük yük değerini vermiştir. Numuneler arasında 6 mm %0,2 hacimce, 12 mm %0,2 ve %0,3 hacimce elyaf takviyeli numuneler en büyük deplasman değerlerini vermiştir.



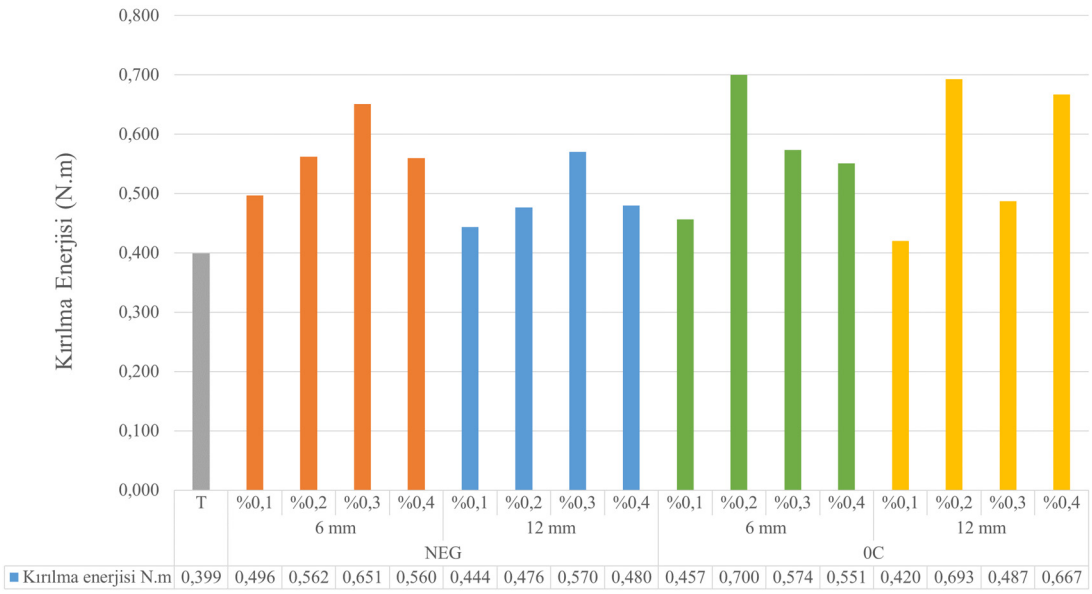
Şekil 7. OC elyaf takviyeli beton numunelerin yük-deplasman grafikleri

3.4. Kırılma Enerjileri

Beton numunelerin kırılma enerjilerinin tayininde, eğilme deneyi neticesinde elde edilen yük-deplasman eğrilerinin altında kalan alanlar esas alınmıştır. Bu alanların hesaplanmasında; geometrik yaklaşıma dayalı Trapez Yöntemi, eğriselliği ikinci dereceden parabollerle modelleyen Simpson 1/3 Yöntemi ve veri noktalarına en uygun matematiksel modelin tatbik edildiği Eğri Uydurma (Curve Fitting) İntegral Yöntemi olmak üzere üç farklı nümerik yaklaşım kullanılmıştır [27,28].

Her bir yöntemin hesaplama hassasiyeti ve algoritmik karmaşıklığı farklılık gösterse de, yapılan analizler neticesinde üç yöntemle elde edilen sonuçlar arasında istatistiksel olarak belirgin bir fark saptanmamıştır. Bu bağlamda, hesaplama kaynaklı hata payını minimize etmek ve sonuçların güvenilirliğini artırmak amacıyla, kırılma enerjisi değerleri bu üç yöntemin aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir.

Şekil 8'de elyaf takviyeli beton numunelerin kırılma enerjisi değerlerine yer verilmiştir. Elyaf takviyesinin etkisini gözlemlemek için takviyesiz beton numunesinin de hesaplamasına yer verilmiştir. Basınç ve eğilme dayanımında olduğu gibi kırılma enerjisi için de her bir takviye türünün ve takviye oranının Guler ve arkadaşları [29] ile Kurban ve arkadaşları [30] çalışmalarındaki gibi betonun kırılma enerjisine katkı sağladığı görülmüştür. Elyaf türleri karşılaştırıldığında aynı elyaf uzunluğu ve elyaf hacminde basınç ve eğime dayanımında olduğu gibi OC cam elyafı her numunede en iyi kırılma enerjisi değerini vermemiştir. Bu farklılık numunelerin eğilme deneyinde göstermiş olduğu sehim farklılıklarından ortaya çıkmaktadır. NEG cam elyafı için iki uzunlukta da en iyi kırılma enerjisi değerini diğer dayanımlarda olduğu gibi %0,3 elyaf takviyeli numunelerde elde edilmiştir. Takviyesiz numuneler ile karşılaştırıldığında 6 mm'li numuneler %63,2, 12 mm'li numuneler %42,9 kırılma enerjisinde artış sağlamıştır. OC cam elyafı kullanılması durumunda her iki uzunlukta da %0,2 elyaf takviyeli numuneler en iyi kırılma enerjisi değerini vermiştir. Takviyesiz numuneler ile karşılaştırıldığında 6 mm'li numuneler %75,4, 12 mm'li numuneler %73,7 kırılma enerjisinde artış sağlamıştır. Bu değer atışları basınç ve eğilme dayanımından daha fazla olup kırılma enerjisinin hem yük hem de sehim değerinden etkilenmesi ile ilintilidir.



Şekil 8. Elyaf takviyeli beton numunelerin kırılma enerjisi grafikleri

4. SONUÇLAR

Dayanımı yüksek ancak kırılgan bir yapı malzemesi olan betonun teknik özelliklerinin geliştirilmesi için elyaf takviyesinin kullanımı yaygın bir yöntemdir. Çeşitli türlerde ve farklı oranlarda kullanılan elyaf, çatlak oluşumunu azaltma, tokluk ve sünekliği artırma, darbe ve aşınma dayanımını iyileştirme, çekme ve eğilme dayanımını artırma gibi katkılar sunmaktadır. Yürütülen çalışmada 6-12 mm uzunluğundaki iki farklı ticari alkali dayanımlı cam elyafın 4 farklı hacim oranında kullanılmasıyla üretilmiş numunelerin performans özellikleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- Aynı uzunluk ve hacim oranında Owens Corning firmasının cam elyafı Nippon Electric Glass firmasının cam elyafından daha yüksek basınç ve eğilme dayanımı değeri vermiştir.
- Her bir firmanın kendi içinde aynı lif hacim oranında 6 mm elyaf ile üretilen numuneleri 12 mm elyaf ile üretilen numunelerden daha yüksek basınç ve eğilme dayanımı vermiştir.
- Her iki elyaf türü ve uzunluğu için hacim oranı arttıkça basınç ve eğilme dayanımı artmış %0,3'den sonra azalışa geçmiştir.
- En iyi basınç dayanımı veren elyaf türü olan Owens Corning firmasının cam elyafı %0,3 hacim oranında kullanılması durumunda takviyesiz numunelere göre 6 mm'li numuneler yaklaşık %33, 12 mm'li numuneler %28 basınç dayanımı artışı sağlamıştır.
- Basınç dayanımında olduğu gibi en iyi eğilme dayanımını veren elyaf türü olan Owens Corning firmasının cam elyafı %0,3 hacim oranında kullanılması durumunda takviyesiz numunelere göre 6 mm'li numuneler yaklaşık %33, 12 mm'li numuneler %25 eğilme dayanımı artışı sağlamıştır.
- Tüm elyaf türleri için yük-deplasman eğrileri takviyesiz numuneler ile benzerlik göstermiş olup sadece daha büyük yük ve deplasman değerleri vermiştir.
- Kırılma enerjisinde Nippon Electric Glass firmasının cam elyaflı numunelerinde %0,3, Owens Corning firmasının cam elyafı numunelerinde %0,2 elyaf katkılı numuneler en iyi değeri vermiştir.

5. TEŞEKKÜR

Beton reçetesinin belirlenmesi, malzeme temini ve basınç dayanımı testlerinin yapılmasındaki desteklerinden dolayı Adana Hacı Sabancı Organize Sanayi Bölgesinde bulunan Polisan Yapıkim'e teşekkür ederim.

6. KAYNAKLAR

1. Herzog, T., Krippner, R. & Lang, W. (2004). *Facade construction manual.* Basel; Boston: Birkhäuser-Publishers for Architecture.
2. Ünsal, A. ve Şen, H. (2008). *Beton ve beton malzemeleri laboratuar deneyleri.* Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Malzeme Lab. Şubesi Müdürlüğü, T.C. Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
3. Gemi, L. ve Köroğlu, M.A. (2018). Çekme bölgesi lifli beton olan cam fiber takviyeli polimer (GFRP) ve çelik donatılı etriyesiz kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışı ve hasar analizi. *S.Ü. Müh. Bilim ve Tekn. Dergisi, 6*(4), 654-667.
4. Zollo, R.F. (1997). Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. *Cement and Concrete Compositer, 19*, 107-122.
5. Bayasi, Z. & Soroushian, P. (1992). Effect of steel fiber reinforcement on fresh mix properties of concrete. *Technical Paper ACI Materials Journal*, 89, 369-374.
6. Jorna, M.C., Flores, M.N. & Serna, P. (2023). Influence of short-term operating temperatures on compression and flexural behaviour of macro synthetic and steel fibre reinforced concretes. *Journal of Building Engineering, 67*, 1-13.
7. Brameshuber, W. (2006). *Textile reinforced concrete, in state-of the- art report of RILEM technical committee 201-TRC, RILEM publications S.A.R.L.* Bagneux, France.
8. Kohen, B. (2013). Yapı kabuğu olarak GRC. *Mimarlıkta Malzeme, 24*, 29-32.
9. PCI, 2016. *Designing with precast and prestressed concrete.* Northampton, İngiltere, 4c-1.
10. Majumdar, A.J. & Laws, V. (1991). *Glass fiber reinforced cement. BSP professional boks.* Oxford.
11. Marikunte, S., Aldea, C. & Shah, S.P. (1997). Durability of glass fiber reinforced cement composites. *Advanced Cement Based Materials, 5*, 100-108.
12. Purnell, P. Short, N.R. & Page, C.L. (2001). A static fatigue model for the durability of glass fiber reinforced cement. *Journal of Materials Science, 36*, 5385-5390.
13. Ferreira, J.C. & Branco, F.A. (2007). Structural applications of GRC in telecommunications towers. *Construction and Building Materials, 21*, 19-28.
14. Sanjeev J. & Sai Nitesh, K.J.N. (2020). Study on the effect of steel and glass fibers on fresh and hardened properties of vibrated concrete and self-compacting concrete. *Materials Today: Proceedings, 27*, 1559-1568.
15. Akyüncü, V. (2021). Investigation of mechanical and permeability properties of fiber mortars. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies, 6*(1), 29-35.

16. Yıldız, S., Bölükbaş, Y. ve Keleştemur, O. (2010). Cam elyaf katkısının betonun basınç ve çekme dayanımı üzerindeki etkisi. *Politeknik Dergisi, 13*, 239-243.
17. Ali, B. & Qureshi, L.A. (2019). Influence of glass fibers on mechanical and durability performance of concrete with recycled aggregates. *Construction and Building Materials,* 228.
18. Lv, Y., Cheng, H.M. & Ma, Z.G. (2012). Fatigue performances of glass fiber reinforced concrete in flexure. *Procedia Engineering, 31*, 551-556.
19. TS EN 12390-3: (2019). *Beton-sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini.*
20. TS EN 12390-5: (2019). *Beton–sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini.*
21. Daskiran, E.G., Daskiran, M.M. & Gencoglu, M. (2022). Experimental investigation on impact strength of AR Glass, Basalt and PVA textile reinforced cementitious composites. *European Journal of Environmental and Civil Engineering, 26*(6), 2037-2056.
22. Zhang, Q., Yang, Q.C., Li, W.J., Gu, X. L. & Dai, H.H. (2023). Study on model of flexure response of carbon fiber textile reinforced concrete (CTRC) sheets with short AR-glass fibers. *Case Studies in Construction Materials, 18*, e01791.
23. Hu, Z., Wang, Q., Lv, H., Li, K., Zhang, J. & Ma, Y. (2023). Improved mechanical and macro-microscopic characteristics of shotcrete by incorporating hybrid alkali-resistant glass fibers. *Construction and Building Materials, 403*, 133131.
24. Moawad, M.S. & El-Hanafy, A.M. (2023). Investigation of the effect of using geogrid, short glass, and steel fiber on the flexural failure of concrete beams. *Alexandria Engineering Journal, 68*, 479-489.
25. Lee, M., Mata-Falcón, J. & Kaufmann, W. (2022). Influence of short glass fibres and spatial features on the mechanical behaviour of weft-knitted textile reinforced concrete elements in bending. *Construction and Building Materials, 344*, 128167.
26. Yaltay, N., Yavuz, D. ve Güler, S. (2021). Çelik lif katkılı alüminyum tüp içine beton doldurulmuş kirişlerin eğilme dayanımlarının incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36*(1), 79-88.
27. Ayyub, B.M. & McCuen, R.H. (2016). *Numerical analysis for engineers* (2nd Edition). CRC Press Taylor & Francis Group.
28. Moin, P. (2010). *Fundamentals of engineering numerical analysis* (2nd Edition). New York, Cambridge University Press.
29. Guler, S., Öker, B. & Akbulut, Z.F. (2021). Workability, strength and toughness properties of different types of fiber-reinforced wet-mix shotcrete. *Structures, 31*, 781-791.
30. Kurban, M., Babaarslan, O. ve Çağatay, İ.H. (2022). Ham ve epoksi reçine kaplı teknik elyaf kullanımının yapı elemanı performansına etkisi. *Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37*(2), 577-588.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 1 MART/MARCH 2026

Stenozlu Dallanmış Bir Damardaki Kan Akışının Newtonyen ve Casson Viskozite Modelleriyle Analizi

Arif ÇUTAY [1,a], **Selim KASAPKARA** [1,b], **Özdeş ÇERMİK** [1,c]

[1]*Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0002-0057-9417; [b]**ORCID**: 0000-0002-4308-0851; [c]**ORCID**: 0000-0001-9308-4589*

Makale Bilgileri
Geliş : 08.04.2025
Kabul : 06.01.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1671306

Sorumlu Yazar
Arif ÇUTAY
arif.cutay@gmail.com

Anahtar Kelimeler
Laminer
Türbülans
Damar
Kan akışı
HAD

***Atıf şekli:** ÇUTAY, A., KASAPKARA, S., ÇERMİK, Ö., (2026). Stenozlu Dallanmış Bir Damardaki Kan Akışının Newtonyen ve Casson Viskozite Modelleriyle Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(1), 165-180.*

ÖZ

Kan sağlıklı bir damarda laminer rejimde bir akış profili gösterirken, ani görülen daralma veya genişlemelerde damarlarda kan dolaşımını türbülanslı hale dönüştürür. Bu ani görülen daralma veya genişlemeler arttıkça türbülansın derecesinde bir artış görülür. Bu çalışmada, Nagaratham ve Chinyoka'nın geometrisi kullanılarak dallanmış bir damarın katı modeli oluşturulmuş ve %40, %50, %60, %70, %80 daralmalar uygulanmıştır. Kan akışı Newtonyen ve Casson modelleri ile simüle edilmiş, laminer ve türbülanslı akışlar k-ε modeliyle ANSYS CFD'de çözülmüştür. Sistol ve diastol fazları için hız sınır koşulları sırasıyla 1 m/s ve 0,2 m/s olarak belirlenmiştir. Daralma arttıkça akış karmaşıklığı yükselmiş, özellikle 1 m/s hızda farklar belirginleşmiştir. Laminer rejimde hız daha yüksek gözlemlenirken, türbülans modeli daha stabil sonuçlar vermiştir. %70 daralma sonrası akım çizgileri daha karmaşık hale gelmiş ve kayma gerilmesi artmıştır. Casson modeli ile yapılan analizlerde, hematokrit değeri arttıkça Newtonyen ve Casson modelleri arasındaki fark azalmış, %70 daralma seviyesinde Casson modeli Newtonyen modele daha yakın sonuçlar vermiştir.

Analysis of Blood Flow in a Stenosed Branched Vessel Using Newtonian and Casson Viscosity Models

Article Info
Received : 08.04.2025
Accepted : 06.01.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1671306

Corresponding Author
Arif ÇUTAY
arif.cutay@gmail.com

Keywords
Laminar
Turbulence
Vessel
Blood flow
CFD

***How to cite:** ÇUTAY, A., KASAPKARA, S., ÇERMİK, Ö., (2026). Analysis of Blood Flow in a Stenosed Branched Vessel Using Newtonian and Casson Viscosity Models. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(1), 165-180.*

ABSTRACT

In a healthy vessel, blood exhibits a laminar flow profile, whereas sudden narrowing or expansion in the vessels transforms blood circulation into a turbulent state. As the severity of these sudden constrictions or expansions increases, the degree of turbulence also increases. In this study, a solid model of a branched vessel was created using the geometry of Nagaratham and Chinyoka, and stenoses of 40%, 50%, 60%, 70%, and 80% were applied. Blood flow was simulated using Newtonian and Casson models, and laminar and turbulent flows were solved in ANSYS CFD using the k-ε model. The velocity boundary conditions were set at 1 m/s and 0.2 m/s for the systolic and diastolic phases, respectively. As the stenosis increased, flow complexity also increased, with differences becoming more pronounced at a velocity of 1 m/s. While higher velocities were observed in the laminar regime, the turbulence model provided more stable results. After 70% stenosis, the flow streamlines became more complex, and shear stress increased. In analyses conducted with the Casson model, as the hematocrit value increased, the difference between the Newtonian and Casson models decreased, with the Casson model yielding results closer to the Newtonian model at the 70% stenosis level.

1. GİRİŞ

Arteriyel kan akışı, vücudun tüm dokularına oksijen ve besin maddelerinin etkin bir şekilde taşınmasında hayati bir rol oynayan karmaşık ve dinamik bir süreçtir. Kanın arterler boyunca nasıl hareket ettiğinin anlaşılması hem normal fizyolojik koşullarda hem de akış alanının daralmasını temsil eden stenoz gibi çeşitli patolojik durumlarda büyük önem taşır. Bu makalede, arterdeki kan akışının temel mekanizmalarını detaylı bir şekilde ele alınmış, hemodinamik prensiplerin yanı sıra kan akışını etkileyen faktörleri incelenmiştir. Son olarak, arteriyel kan akışının daha iyi anlaşılması ve yönetilmesi için yapılan güncel hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) araştırmaları aşağıda verilmiştir. Kamada ve arkadaşları hesaplamalı akışkan dinamiği (HAD) ve 4D-flow MRI kullanarak zamanla değişen kan akımını incelemiş ve her iki yöntemin özelliklerini, vasküler hastalıklardaki uygulamalarını tartışmışlardır. Kan akışı analizinin faydaları, zorlukları, sınırlamaları ve gelecekteki gelişim yönleri ele alınmıştır [1]. Zhao ve arkadaşları Budd-Chiari sendromu hastalarında inferior vena kava stenozundaki kan akış dinamiklerini HAD ile simüle etmiş ve bu simülasyonun patogenezi anlamaya ve postoperatif etkinliği değerlendirmeye katkı sağlayabileceğini belirtmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, hemodinamik özellikler ile patolojik mekanizmalar arasındaki ilişkinin teşhis ve cerrahi planlama için nicel bir yaklaşım sunabileceğini göstermektedir [2]. Qiu ve arkadaşları abdominal aort anevrizmalarındaki (AAA) kan akış paternlerini HAD ile sınıflandırarak, bu paternlerin yırtılma riskini öngörme değerini araştırmışlardır. Tip III akış paterninin, AAA yırtılma riskiyle anlamlı ilişki gösterdiği ve bu paternin yüksek riskli anevrizmaların tanımlanmasına katkı sağlayabileceği sonucuna varılmıştır [3]. Hamidah ve Hossain böbrek bifurkasyon arterinde farklı stenoz vakalarını incelemek için zamana bağlı bir akış modeli oluşturarak çeşitli simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Kan bu çalışma için viskozite modeli Newtonyen olmayan olarak seçilmiş ve pulsatile akış formu tercih edilmiştir. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile çözülen doğrusal olmayan denklemlerle, farklı stenoz şiddetleri ve uzunluklarına bağlı olarak çeşitli hemodinamik parametreler incelenmiştir. Stenozun neden olduğu kesme stresinin zamana bağlı tepkisi analiz edilmiş ve stenozun varlığıyla birlikte duvar hareketinin arttığı ve gerilimin oluştuğu gözlemlenmiştir. Pulsatile akış süresi arttıkça duvar kesme gerilimi azalmıştır. Ayrıca, Reynolds sayısı ve power law indeksi gibi faktörlerin basınç ve hız profilleri üzerindeki etkisi incelenmiştir [4]. Yin ve arkadaşları intrakraniyal arter darlığında beyin CT türetilmiş fraksiyonel akış rezervinin (CT-FFR) uygulanabilirliğini HAD ile simüle etmişlerdir. Sonuçlar, darlık sonrası 1 cm distalde ölçülen CT-FFR'nin, invaziv FFR ile en uyumlu sonuçları verdiğini ve intrakraniyal arter darlığının değerlendirilmesinde umut verici bir klinik uygulama olabileceğini göstermiştir [5]. Hussain ve arkadaşları anevrizma ve stenozun bir arada bulunduğu bir damar yapısında akış dinamiğini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak incelemişlerdir [6]. Bu araştırmada, damar içindeki stenoz ve anevrizma bölgelerinde kan basıncı ve hızında önemli değişimlerin olduğunu ortaya koymuşlardır. Nadeem ve arkadaşları koroner arterlerde plak altındaki kan akışını non-Newtonian özelliklerle modellemişlerdir. Casson ve Quemada akış modelleri kullanılarak, %50, %60, %70 ve %80 daralma durumları analiz edilmiştir. Sonlu hacim yöntemi ile çözülen matematiksel model, Newtonian ve non-Newtonian akış dinamiklerini karşılaştırmıştır. Sonuçlar, stenoz derecesi arttıkça hız ve basınç düşüşünün arttığını, daralma bölgelerinde ise duvar kayma geriliminin önemli ölçüde yükseldiğini göstermektedir [7]. Liu ve arkadaşları CT anjiyografi kullanılarak yeniden oluşturulan 20 hasta spesifik koroner arterinde hemodinamik etkilerin değerlendirilmesi için invaziv olmayan, görüntü tabanlı yöntemler kullanılarak HAD analizi gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen bulgular, duvar kayma gerilimi (DKG) analizi ile birleştirilen FFRCT geri çekme eğrilerinin segmental daralmanın ve arterlerin eğriliğinin fizyolojik önemini değerlendirmede etkili bir araç sağladığını göstermektedir. Bu yöntem, koroner arter stenozunun değerlendirilmesinde invaziv FFR için güvenilir, invaziv olmayan bir alternatif sunmakta ve sanal revaskülarizasyon simülasyonlarının, PCI planlaması ve sonuçlarını iyileştirmek potansiyeli gösterdiği kanısına varmışlardır [8]. Gataa ve arkadaşları bu çalışmada, stenoz ve greftlenmiş damarların etkisiyle kan akışındaki DKG değişiklikleri incelenmiştir. Stenoz, damarın kesit alanını azaltarak akış daralmasına ve sonrasında ani genişlemeye neden olur; bu durum hipertansif bireylerde daha şiddetli DKG değerlerine yol açmaktadır [9]. Jack ve arkadaşları Williams sendromuna sahip hastalarda aort damarındaki hemodinamik akışı HAD yöntemi kullanarak analiz etmişlerdir. Geliştirilen modelde, karmaşık kan akış desenlerinin analizini ve görselleştirmesini sağlayarak, kalp fonksiyonunu etkileyen geometri ve akış dinamikleri değişiklikleri hakkında bilgiler sunmaktadır. Çalışmada aort defektinin cerrahi müdahale ile düzeltilmesinin etkinliği değerlendirilmiştir [10].

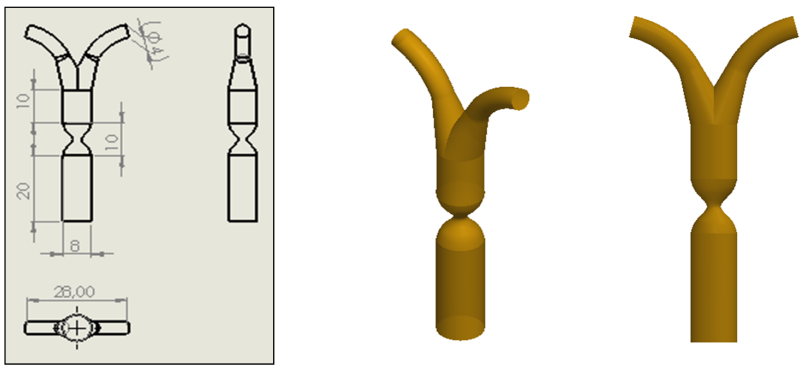
Bu çalışmada dallanmış bir damarda farklı darlık durumları ve akış rejimlerinin akış dinamiğine etkileri incelenmiştir. Kanın sistol ve diastol fazlarında damar girişindeki sınır koşulları esas alındığında laminer bir akış rejimi var olsa da sıkça karşılaşılan bir durum olan damar darlığında hem daralmanın etkisiyle

oluşan hız artışı ve akış alanında oluşan şekil değişimleri türbülans rejimine doğru bir geçiş etkisi ortaya çıkarabilmektedir. Araştırmacılar geçmiş çalışmalarında akışın rejiminin belirlenmesinde kesin bir kanıya varılamadığından çeşitli varsayımlarda bulunarak analizler gerçekleştirmişlerdir [11-13]. Bunun yanı sıra arteriyel stenozun ilerlemesi aterosklerotik plak rüptürü, anevrizma oluşumu ve stent tasarımı gibi klinik açıdan kritik durumlarla doğrudan ilişkilidir. Farklı viskozite modelleriyle elde edilen hemodinamik parametrelerin anlaşılması, hem hastalıkların öngörülmesi hem de biyomedikal cihaz tasarımlarının optimize edilmesi için önemlidir [14,15].

Çalışmanın gerçeğe yatkınlığını artırmak amacıyla ölçüleri orijinal damar yapısından alınan bir geometri literatürden faydalanılarak oluşturulmuştur. Bunun yanı sıra 2 farklı viskozite modeli dahil edilerek bunların farklı darlık oranlarındaki modelleme kabiliyeti ve sonuçlarda oluşacak farklılıklar tespit edilmiştir. Tüm bunlar göz önüne alındığında bu alanda yapılacak ileriki çalışmalarda doğru bir nümerik kombinasyon bulunması son derece önem arz etmektedir. Bu çalışmayla bu yönüyle farklı kombinasyonların birbiriyle etkileşimi sonucunda çıkan veriler incelenerek gelecekteki çalışmalara ışık tutmayı amaçlamaktadır. Literatüre bakıldığında yapılan çalışmalarda kan akışı laminer ya da türbülanslı rejimlerden biri seçilerek modellenmiştir. Bu çalışmada farklı rejimler kullanılarak sonuçlar farklı stenoz durumları için kıyaslanmıştır.

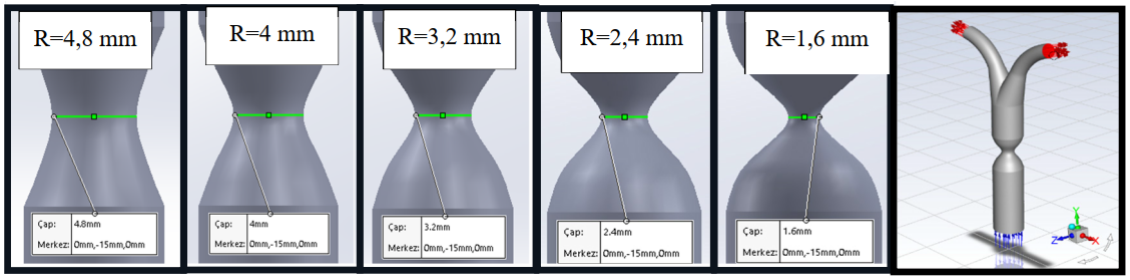
2. SAYISAL YÖNTEMLER

Bu çalışmada kullanılan dallanmalı damar geometrisi, Nagarathnam ve Chinyoka'nın çalışmasından alınmış olup, ölçüleri bire bir şekilde kullanılarak katı model oluşturulmuştur [16]. Modelin teknik resmi ve katı modeli, iki farklı açıdan Şekil 1'de gösterilmiştir. Ayrıca, bu modelde damarın girişinden 25 mm uzaklıktaki noktada ana karotid artere, literatüre uyumlu bir şekilde %40, %50, %60, %70 ve %80 oranında daralmalar uygulanarak farklı geometriler oluşturulmuştur [12]. Akışın hareket yönü, Şekil 2'de gösterildiği üzere ana karotid arterden girmekte ve iki dala ayrılarak damarı terk etmektedir. Kan akışı, Newtonyen olmayan davranış karakteristiğine rağmen, büyük çaplı arterlerde Newtonyen bir akışkan olarak kabul edilebilmektedir [13,16,17]. Orta ve büyük arterlerde, kayma hızları yüksek olduğu için kanın viskozitesi neredeyse sabittir. Bu nedenle, kan akışının hesaplamalı analizlerinde genellikle Newtonyen bir akışkan olarak kabul edilir [18]. Bu çalışmada kan, Newtonyen, ve Newtonyen olmayan Casson viskozite modelleriyle modellenmiş olup, laminer ve sıkıştırılamaz bir akışkan olarak kabul edilerek analizler yapılmıştır.



(a) (b)

Şekil 1. Çalışmada kullanılan geometrik modelin teknik resmi (a) ve katı modeli (b)



Şekil 2. Çalışılan stenoz oranlarının en azdan en çoğa doğru sırasıyla gösterimi

Kan akışı problemi, Navier-Stokes eşitliği ile ANSYS programının CFD bölümünde çözdürülmüştür. Bu yorum doğrultusunda yöntem kısmında türbülans modeli seçimi gerekçelendirilmiştir. k-ε modeli, kardiyovasküler Standart k–ε türbülans modeli, kardiyovasküler CFD çalışmalarında yaygın olarak kullanılan ve özellikle stenoz, aort gibi yüksek hız gradyenlerinin ve ayrılma/geri akım bölgelerinin görülebildiği durumlarda türbülansın ortalama etkilerini temsil etmek için tercih edilen bir RANS kapanışıdır. Ayrıca literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılabilirliği artırmak amacıyla kullanılmıştır [19-22]. Bu çalışmada akış, sıkıştırılamaz Newtonyen akışkan kabulüyle Reynolds-ortalamalı Navier–Stokes (RANS) eşitlikleri kullanılarak çözülmüştür. Eşitlik (1) süreklilik (kütlenin korunumu), Eşitlik (2) momentum eşitliğini ifade etmektedir. Reynolds gerilmeleri, Boussinesq varsayımı ile tanımlanan türbülanslı viskozite $\mu_t$aracılığıyla modellenmiştir. Türbülans kinetik enerjisi $k$ve disipasyon oranı εiçin taşınım eşitlikleri sırasıyla türbülans enerjisinin üretimini ve viskoz disipasyonunu temsil eder.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\rho\left(\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j\frac{\partial U_i}{\partial x_j}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu+\mu_t)\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)\right] + \rho g_i \tag{2}$$

$$\rho\left(\frac{\partial k}{\partial t} + U_j\frac{\partial k}{\partial x_j}\right) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + P_k - \rho\varepsilon \tag{3}$$

$$\rho\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}P_k - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{4}$$

$$P_k = 2\mu_t S_{ij}S_{ij}, \qquad S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right) \tag{5}$$

$$\mu_t = C_\mu\rho\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{6}$$

$$C_\mu = 0.09, \quad C_{1\varepsilon} = 1.44, \quad C_{2\varepsilon} = 1.92, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3 \tag{7}$$

Sayısal analizde kullanılan nümerik ayarlar ve sınır koşulları Çizelge 1'de gösterilmektedir. Bu çalışmada, karotis arter bifurkasyon modelinin giriş ve çıkışlarına gerçekçi sınır koşulları uygulanmıştır. Kanın bir periyotta maksimum seviyeye ulaşılan sistol fazı 1 m/s hızı ile modellenirken, kanın durgun durumda olduğu diastol fazı ise 0,2 m/s giriş hız sınır koşulu olarak girilmiştir. Bu şekilde analiz zamandan bağımsız bir şekilde yürütülmüştür. Damar duvarı rijit olarak kabul edilmiştir. Kan, büyük çaplı arterlerde Newtonyen bir akışkan olarak kabul edilebilmesine rağmen, bu çalışmada kan ayrıca Newtonyen olmayan bir akışkan olarak da Casson modeli kullanılarak ele alınmıştır. Simülasyonlar geçici durumun sonuçlarda değişkenliğe yol açmasına engel olmak amacıyla her çalışma üç periyod boyunca çalıştırılarak Ansys FLUENT yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm sonuçlar, 2 saniyeden 3 saniyeye kadar olan üçüncü döngüden alınmıştır. Simülasyonlar 32 GB RAM, 16 çekirdekli ve 16 mantıksal işlemcili bir AMD 5950X CPU'ya sahip ve 64 bit Windows 10 işletim sisteminde çalışan bir iş istasyonunda gerçekleştirilmiştir. Modeller paralel olarak birden fazla çekirdekte çalıştırılmıştır.

Çizelge 1. Sayısal analizde kullanılan parametreler

Genel	Gravity	-9,81 m/s (y)
Model	Viskozite modeli	Laminer k-ε (Türbülans)
Akışkan özellikleri	Akışkan	Kan
	Yoğunluk	1060 kg/m^3 [22]
	Viskozite	0,00345 kg/ms [12-13, 16-17], Casson
Sınır koşulları	Giriş	1 m/s-0,2 m/s [26]
	Çıkış 1	0 Pa [25-27]
	Çıkış 2	0 Pa [25-27]
Metot	Basınç	First Order
	Momentum	First Order Upwind

Çalışmada uygulanan Newtonyen olmayan Casson viskozite modeli ve parametreleri Eşitlik 8-11'de gösterilmektedir.

$$\mu = \frac{\mu^2{}_\infty}{\ddot{y}} + \frac{2\mu_\infty N_\infty}{\sqrt{\ddot{y}}} + N^2{}_\infty \quad (8)$$

$$N_\infty = \sqrt{\mu_\infty (1 - Hct)^{-0,25}} \quad (9)$$

$$\mu_\infty = \sqrt{(0,625 Hct)} \quad (10)$$

$$Kan\ \text{İçin}\ \ \mu_p = 0,00345[Pa.s]\ \ Hct = [0,2'den\ 0,6'ya] \quad (11)$$

Reynolds sayısı, akışta atalet kuvvetleri ile viskoz kuvvetlerin oranını ifade eden ve akış rejimini (laminer, geçiş veya türbülanslı) belirlemede kullanılan boyutsuz bir sayıdır. Bu çalışmada, farklı darlık oranlarındaki laminer ve k-ε modelleri kullanılarak yapılan simülasyonlarda oluşacak maksimum hızlar hesaplanmıştır. Maksimum hızlar temel alınarak Reynolds sayıları Eşitlik (12)'e göre belirlenmiştir.

$$Re = \frac{\rho v_{max} d}{\mu} \quad (12)$$

Burada, ρ kanın yoğunluğunu (kg/m³), v hızı (m/s), d arterin çapını (m) ve μ dinamik viskoziteyi (Pa·s) temsil eder.

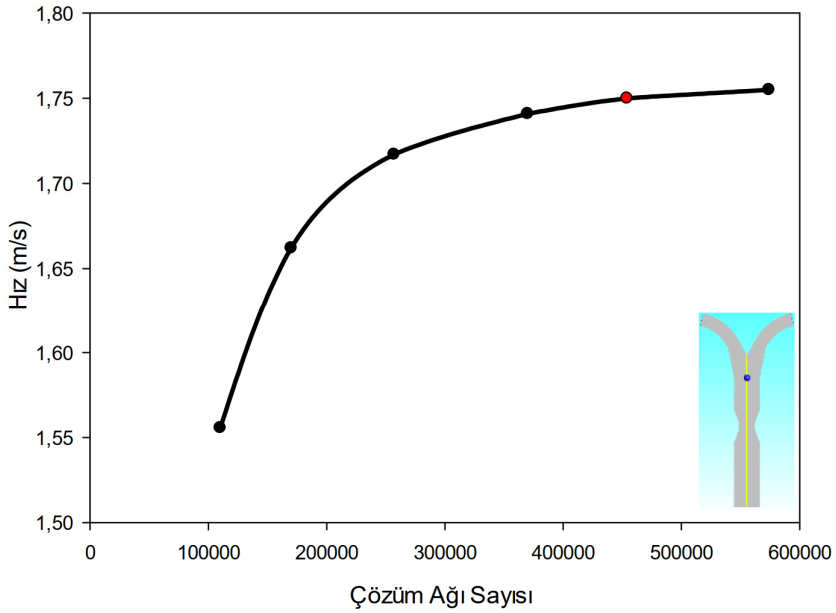
Daralma oranlarına göre oluşan hem laminer hem de türbülans akışları içeren 2 farklı hızdaki maksimum Reynolds sayılarının hesabı Çizelge 2 de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, daralma oranı arttıkça, Reynolds sayısı da artmıştır. Bu durum akışın hızının ve akışkanın viskozitesinin arttığı durumlarla uyumludur. Örneğin, daralma oranı %40'ta Reynolds sayıları laminer akışta 1m/s için 3974,1641 ve 0.2m/s için 891,7083 iken, %80 daralma oranında bu değerler sırasıyla 10900,3858 ve 2237,9447 olarak çok daha yüksektir. Bu durum, daha yüksek bir hızda ve viskozite etkisinin arttığı bir akışın daha yüksek Reynolds sayılarına sahip olacağını göstermektedir. Benzer şekilde, daralma oranı sabitken, akış hızı arttıkça Reynolds sayısı da artar. Örneğin, daralma oranı %50'de laminer akış için 1m/s hızda Reynolds sayısı 4511,1177 iken, aynı daralma oranında akış hızı 0.2m/s olduğunda bu değer 999,4286'ya düşer. Bu durum daha yüksek bir akış hızının, aynı viskozite koşullarında daha yüksek bir Reynolds sayısına neden olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, giriş hız sınır koşulu daha düşük Reynolds sayıları verse de daralmış bir damar akışı modellerinde daralmanın oranına göre daha yüksek hız ve bunun sonucunda daha yüksek Reynolds sayıları ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple daralmanın olduğu akışlarda hangi modelin daha doğru sonuçlar vereceği değişkenlik gösterebilmektedir. Bu amaçla değişken Reynolds sayısı göz önüne alınarak iki farklı viskozite modeli tüm daralma durumlarında hem Newtonyen hem de Casson viskozite modeli için hesaplanmıştır.

Çizelge 2. Daralma oranlarına göre oluşan maksimum Reynolds sayılarının hesabı

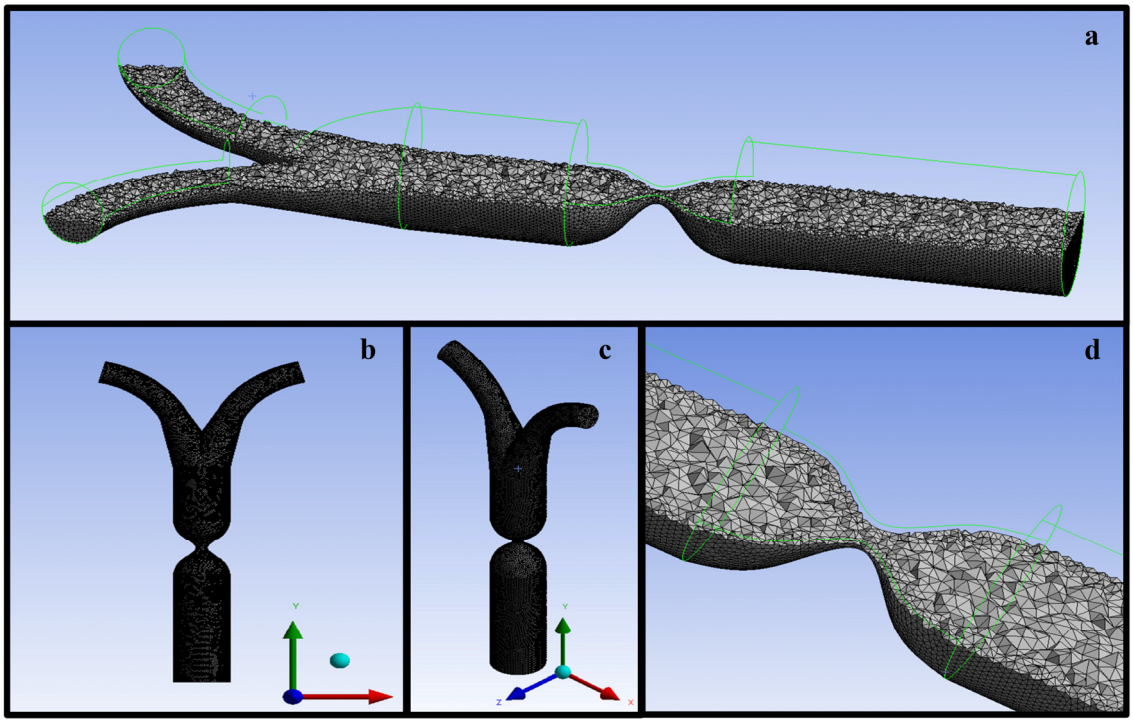
	Reynolds sayısı			
Daralma oranı	Laminer model (1m/s)	Laminer model (0,2m/s)	Türbülans model (1m/s)	Türbülans model (0,2 m/s)
%40	3974,1641	891,7083	3787,9700	900,8667
%50	4511,1177	999,4286	4529,1680	1007,0606
%60	5410,9100	1171,9845	5455,5959	1185,2600
%70	7169,1374	1504,3762	7264,7191	1526,1819
%80	10900,3858	2237,9447	11136,6144	2256,4069

Akış hacmi çeşitli ağ elemanlarına ayrılarak ağ elemanlarının değişimine bağlı olarak 0 noktasındaki akış hızı değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 3'te gösterilen ağ yakınsama çalışması ağdan bağımsızlığını sağlamak için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, 454200 elemandan 574781 elemana olan ağ yoğunluğunun %26 oranında artırılmasının, hız büyüklüğü üzerinde %0,285 oranında minimal bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple, 454200 eleman sayısına sahip olan ağ yapısı zamandan tasarruf etmek amacıyla seçilmiştir. Çalışılan modelin çözüm ağının farklı açılardan görüntüleri ise Şekil 3'te

verilmektedir. Yakınsama kriterlerinin değerlendirilmesinde yalnızca eşitliklere ait rezidüeller değil, aynı zamanda akışa özgü fiziksel değişkenler de gözlemlenmiştir. Çalışmada kütle sürekliliği ve momentum eşitliklerine ait rezidüeller 10^{-5} seviyesinin altına düşürülerek hesaplamaların nümerik doğruluğu güvence altına alınmıştır. Buna ek olarak, klinik bağlamda önem arz eden hacimsel debi, damar giriş-çıkış basınç farkı, değerleri izlenmiş, iterasyonlar boyunca bu parametrelerin sabitlenmesi sağlanmıştır. Böylelikle hem rezidüel yakınsama hem de fizyolojik olarak anlamlı değişkenlerde kararlılık elde edilerek sayısal sonuçların güvenilirliği artırılmıştır.



Şekil 2. Çözüm ağından bağımsızlık çalışması



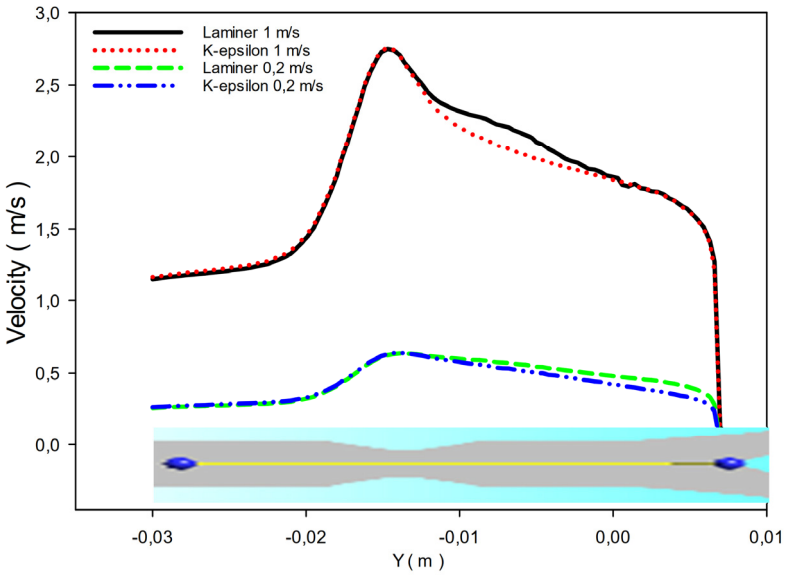
Şekil 3. Çalışılan akış modelinin çözüm ağı görüntüleri (a) modelin genel görünümü XY plane oluşturulmuş kesit görüntü ve mesh yapısının detayları (b) modelin XY düzleminden görünümü iki kola ayrılan bölgenin ön görünüşü (c) modelin izometrik görüntüsü (d) modelin daralma bölgesinin yakınlaştırılmış bir bölümü ve mesh yapısının detayları

Bu çalışmada %40'tan %80'ne değişen 5 farklı darlık oranına laminar ve türbülans akım rejimleri uygulanmış olup bunun yanı sıra Newtonyen ve Newtonyen olmayan viskozite modelleri (Casson) altında sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kanın damar içerisindeki akışında oluşan tepe (1 m/s) ve dip (0,2 m/s) noktaları Newtonyen durumda laminar ve türbülans durum için ayrı ayrı çözdürülmüştür. Çıkan sonuçlar uygun akışkanlar dinamiği parametreleri ile birbiriyle kıyaslanmıştır.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölüm, farklı darlık oranlarındaki stenoz durumlarına ait akış hemodinamik parametrelerini sayısal değerler ve renklendirilmiş konturlar aracılığıyla inceleyip kanın damar içerisindeki davranışında bilgi sahibi olmayı amaçlamaktadır. Arteriyel stenozun farklı darlık oranları, hız profilleri, basınç değişimleri ve viskozite modellerine göre hemodinamik parametreler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bulgular hız profilleri, basınç düşümü, akım çizgileri ve duvar kayma gerilmesi değerleri altında detaylandırılmıştır:

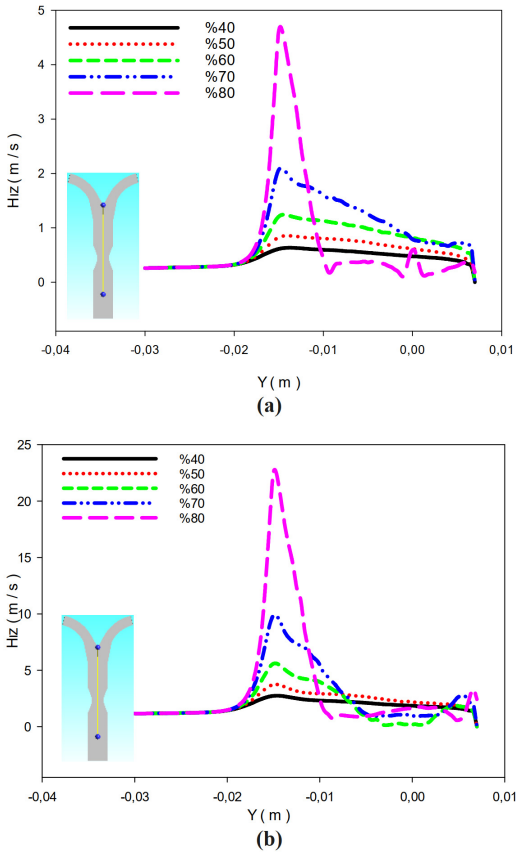
Şekil 4'te %40 darlığa sahip stenozlu damarın 2 farklı hız durumu (0.2 ve 1 m/s) ve 2 farklı akış rejimi için ana karotis arter damar girişinden çıkışına kadar olan hız profili gösterilmektedir. Stenoz gibi akış alanının ani bir şekilde değiştiği durumlarda akış rejimi giriş sınır şartı laminar olsa da türbülansa veya kararsız rejime geçiş gösterebilmektedir. Bu sebeple hem laminar hem de türbülans k-ε modeli kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Grafikte de görüldüğü üzere laminar durum türbülans durumdan iki farklı hız için de daralma öncesi çok az bir farkla daha düşük sonuçlar verirken buna karşın daralma sonrası laminar durum türbülanslı akıştan daha belirgin bir şekilde yüksek hız değerleri vermiştir. Bu sonuç, hızın 1 m/s olduğu durumda daha belirgin bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir. Tam daralma bölgesinin orta noktasında ise laminar ve türbülans arasındaki sonuç farkı 1 m/s için % 0.27 iken 0.2 m/s için ise %0.91 olarak bulunmuştur.



Şekil 4. %40 darlığa sahip stenozlu damarın 2 farklı hız durumu ve 2 farklı akış rejimi durum için ana karotis arter damar girişinden çıkışına kadar olan hız profili

Şekil 5'te laminer rejimde iki farklı hızda (0.2 ve 1 m/s) ana arterden ayrılma bölgesine kadar beş farklı darlık durumunda hızın değişimi gösterilmektedir. Bu şekilde daralma öncesi daralma bölgesi ve daralma sonrası bölge incelenebilmektedir. Hız profilinin alındığı noktalar grafik üzerinde gösterilmiş olup, damarın girişinden bir miktar uzakta alınmış olması sonuçları giriş etkisinden arındırmak amacıyladır. Daralma noktasına yaklaşıncaya kadarki bölümde hız profili üzerinde tüm durumlar yakın sonuçlar vermektedir. Ancak daralma bölgesine girişle birlikte sonuçlar birbirinden ayrışmaktadır. Hızın 1 m/s olduğu sistol fazında artan daralma miktarı darlık bölgesinde hızı arttırırken, daralma sonrası ise artan darlık miktarı hız büyüklüklerinde tam tersi bir yönde etki göstermiştir. Bu durum hızın 0,2 m/s olduğu durumda ise farklı bir karakteristik göstermiştir. Bu durumda darlık bölgesinde benzer bir sıralama gözlemlenirken darlık sonrası sıralama sadece darlığın %80 olduğu durumda değişkenlik göstermiştir. %40 ve %50 daralma durumlarında daralma bölgesinde en düşük sonuçları verirken daralma sonrasında ise en yüksek

sonuçları veren durumlar olarak göze çarpmaktadır. Artan daralma miktarları daralma bölgesinde kanın akış hızı değerlerinde logaritmik bir artış seyri göstermektedir. Laminer durumda darlık miktarının artması akış profilindeki kararsızlıkları ve ani değişimleri her iki hız durumu içinde arttırdığı tespit edilmiştir. Ancak hızın 1 m/s olduğu durum bu etkilerin daha bariz bir şekilde ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Şekil (a) ve (b) birlikte değerlendirildiğinde, her iki grafikte de darlık oranı arttıkça hız dağılımında doğrusal olmayan bir artış eğilimi olduğu açıkça görülmektedir. %40 darlıkta hız artışı sınırlı kalmış olup (a)'da yaklaşık 1,0 m/s, (b)'de ise 3–4 m/s değerine ulaşmıştır. %50 darlıkta bu değerler sırasıyla 1,2 m/s ve 5 m/s seviyelerine yükselmiştir. %60 darlıkla birlikte belirgin bir ivmelenme gözlenmiş, (a)'da yaklaşık 1,5–1,6 m/s, (b)'de ise 7–8 m/s değerine ulaşılmıştır. Kritik eşiklerden biri olan %70 darlıkta hız artışı daha keskin hale gelmiş, (a)'da 2,5–3,0 m/s'ye çıkarken, (b)'de 10–12 m/s gibi oldukça yüksek değerlere ulaşmıştır. En yüksek ivmelenme ise %80 darlıkta gerçekleşmiş, (a)'da 4,5–5,0 m/s, (b)'de ise 20–22 m/s seviyelerine kadar çıkmıştır. Bu sonuçlar, %40–%60 arası darlıklarda hız artışının daha kontrollü ve sınırlı olduğunu, ancak %70 sonrası darlıklarda akışın ani ve keskin bir ivmelenme göstererek kritik stenoz seviyelerine ulaştığını göstermektedir. Ayrıca, (b)'de elde edilen hızların (a)'ya göre yaklaşık 4–5 kat daha yüksek olduğu dikkat çekmekte olup, bu durum farklı sınır koşullarında akışın çok daha agresif bir rejime geçebileceğini ortaya koymaktadır.



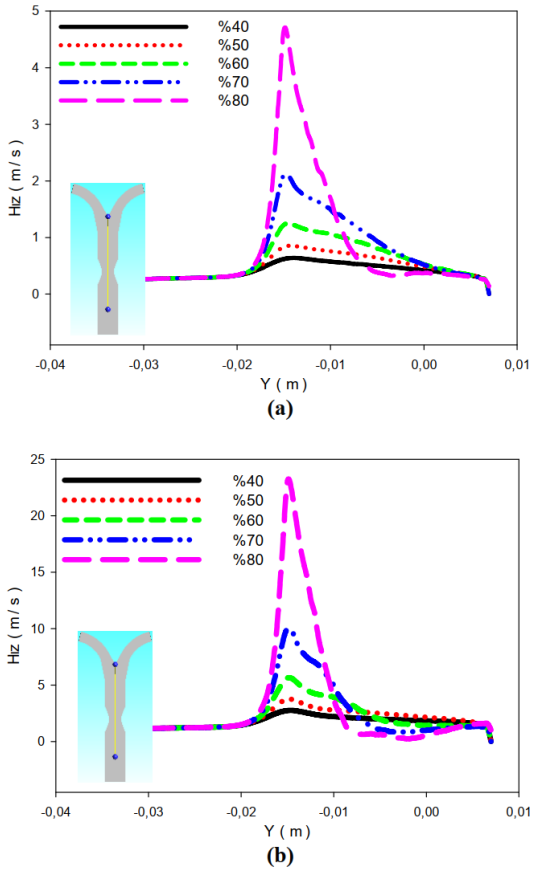
Şekil 5. Tüm darlık durumları için laminar durumda ana karotis arter damar girişinden çıkışına kadar olan hız profili 0,2 m/s (a) 1 m/s (b)

Şekil 6'da tüm darlık durumları için türbülans durumda ana karotis arter damar girişinden çıkışına kadar iki farklı hız durumu için (0.2 ve 1 m/s) hız profilleri gösterilmektedir. Bu durum akışın laminer olarak modellendiği analizlerle karşılaştırıldığında kanın akış hızındaki dalgalanmaların azaldığı tespit edilmiştir. Kan akışı hız büyüklüğü açısından sıralandığında ise hem 0,2 m/s için hem de 1 m/s için laminar ve türbülans durumun sadece daralma bölgesinde benzer bir sonuç verdiği tespit edilmiştir. Daralma sonrası bölgede ise türbülans durum daralma bölgesindeki hız sonuçlarının büyüklük açısından tam tersi sonuçları vermektedir. Hız büyüklükleri açısından daralma oranına bakılmaksızın laminar ve türbülans durumları benzer sonuçlar göstermektedir. Ancak daralmanın artışıyla birlikte türbülans modeli daha stabil sonuçlar verme eğiliminde olmuştur. Özetle, giriş hızı 0.2 m/s olan durumda (a), hız değerleri daha düşük seviyelerde seyretmektedir. %40 darlıkta maksimum hız yaklaşık 1.0 m/s civarında iken, %50 darlıkta 1.2 m/s'ye

yükselmiştir. %60 darlıkta hız 1.5–1.6 m/s değerine ulaşmış, %70 darlıkta ise 2.5–3.0 m/s seviyelerine çıkmıştır. En kritik artış %80 darlıkta gerçekleşmiş olup hız yaklaşık 4.5–5.0 m/s'ye ulaşmıştır.

Buna karşılık giriş hızı 1.0 m/s olan durumda (b), aynı darlık oranları için hız değerlerinin yaklaşık 4–5 kat arttığı görülmektedir. %40 darlıkta maksimum hız 3–4 m/s iken, %50 darlıkta 5 m/s seviyelerine çıkmıştır. %60 darlıkta hız 7–8 m/s civarında ölçülmüş, %70 darlıkta bu değer 10–12 m/s'ye yükselmiştir. En çarpıcı artış ise %80 darlıkta ortaya çıkmış ve hız değeri 20–22 m/s seviyelerine kadar çıkmıştır.

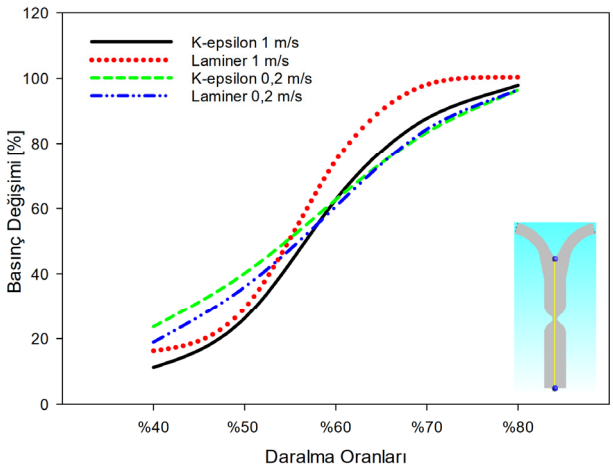
Dolayısıyla, her iki durumda da darlık oranı arttıkça hız artışının doğrusal değil üstel bir karakter sergilediği, özellikle %70 ve üzerindeki darlıklarda akışın ani bir ivmelenme ile kritik stenoz seviyesine ulaştığı anlaşılmaktadır. Ayrıca giriş hızındaki artışın, özellikle yüksek darlık oranlarında, hız değerlerini birkaç kat büyüttüğü görülmekte olup bu durum damar içi türbülans ve hemodinamik stresin şiddetini önemli ölçüde artırmaktadır.



Şekil 6. Tüm darlık durumları için türbülans durumda ana karotis arter damar girişinden çıkışına kadar olan hız profili 0,2 m/s (a) 1 m/s (b)

Şekil 7'de iki farklı hız ve iki farklı akış rejimi için damar girişinden ayrılma bölgesine kadar tüm darlık oranlarında basınç düşümü verilmiştir. Ölçümler damar girişinde ayrılma bölgesindeki 2 nokta arasında alınmıştır. Herhangi bir boru içi akışta olduğu üzere damar içi kan akışında da akım alanındaki ani daralmalar ve gelişmeler akım basıncında bir kayba neden olmaktadır. Hızın sistolik fazı olan 1 m/s durumunda hem laminer hem de türbülans durum davranış açısından benzer bir seyir göstermiştir. Ancak hızın 0,2 m/s olduğu diastolik durumda basınç düşüşü açısından lineer bir grafik seyri gözlemlenmektedir. Daralmanın %40 ve %50 olduğu durumda basınç düşüşü açısından en yüksek sonucu hızın 0,2 olduğu durumlar verirken bu noktadan sonra hızın 1 m/s olduğu durumlar daha yüksek değerler vermektedir. Bu durumlar kendi içerisinde karşılaştırıldığında ise diastolik fazda %60 daralmaya kadar k-ε durumu daha yüksek basınç düşüşü sonucu verirken bu noktadan sonra bu nokta da dâhil olmak üzere birbirine yakın basınç düşüşü sonuçları gözlemlenmiştir. Sistolik fazda ise laminer durum değişen farklarda olmakla birlikte türbülans durumdan daha yüksek basınç değişimi değeri bütün daralma durumlarında

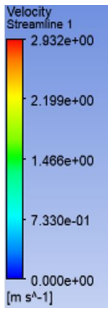
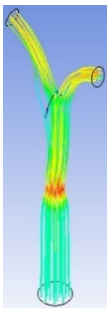
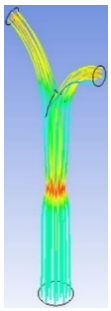
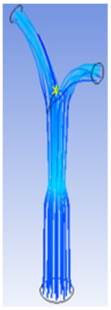
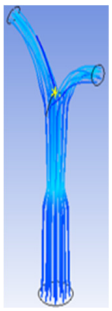
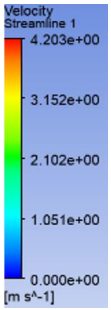
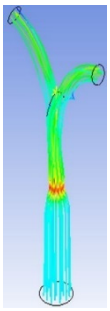
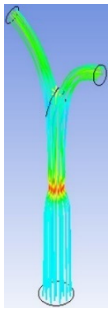
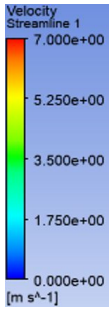
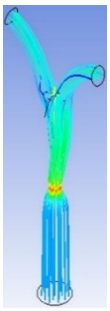
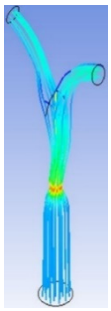
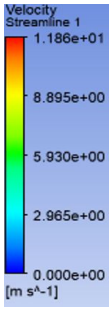
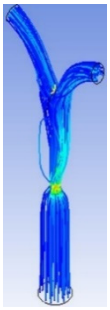
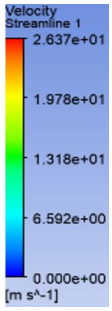
göstermektedir. %50 darlık oranından sonra laminer durum 1 m/s hız için ani bir artış eğilimine girdiği anlaşılmaktadır. Ancak %70 daralmadan sonra laminer durumda kayda değer bir değişiklik görülmez iken türbülans durumda bunun aksine basınç değişiminde artış devam etmiştir. Bu durum laminer durumun daralmanın artmasıyla oluşan kaotik akışın etkisini yeterli şekilde modelleyememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Değişen modellerden ve hızlardan bağımsız olarak artan darlık miktarı kanın damarda ilerleme kabiliyetini belirleyecek olan basıncında azalmaya sebep olacağı sonucuna yapılan analizler neticesinde varılmıştır. %40 daralma oranında basınç değişimi laminer akışta 1 m/s için yaklaşık 20–25%, k-ε modelinde ise 15–20% civarında kalmaktadır. Giriş hızı 0,2 m/s olduğunda ise değerler laminer için yaklaşık 18–20%, k-ε için 15% seviyelerindedir. %50 daralma oranında bu fark daha belirginleşmekte, laminer 1 m/s için basınç değişimi 40–45%, k-ε için 35–40%, düşük hızda (0,2 m/s) ise her iki modelde de 30–35% aralığında değerler elde edilmektedir. %60 daralma oranına gelindiğinde artış eğilimi keskinleşmektedir. Laminer 1 m/s için basınç değişimi yaklaşık 65–70%, k-ε için 60–65%, düşük hızda ise (0.2 m/s) hem laminer hem de k-ε modellerinde 55–60% seviyelerine çıkmıştır. %70 daralma oranında basınç kaybı laminer 1 m/s'de 90–95%, k-ε modelinde 85–90%, düşük hızlarda ise 75–80% civarındadır. En yüksek daralma olan %80 oranında, tüm modellerde basınç değişimi neredeyse %100 seviyesine ulaşmaktadır. Bu noktada giriş hızının veya modelin etkisi azalmakta, basınç kaybı tamamen darlığın baskın etkisiyle belirlenmektedir. Sonuç olarak, giriş hızı arttığında (1 m/s) basınç değişimi daha yüksek seviyelere çıkmakta, özellikle laminer akışta bu artış daha belirgin olmaktadır. k-ε modeli ise basınç değişimini laminer akışa kıyasla biraz daha düşük öngörmektedir. %60 sonrası daralmalarda artış eğimi hızlanarak kritik stenoz seviyelerini işaret etmektedir.



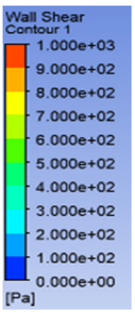
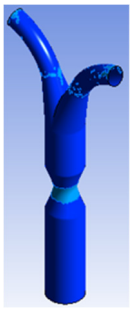
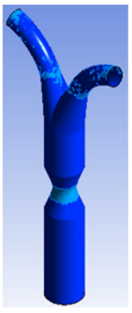
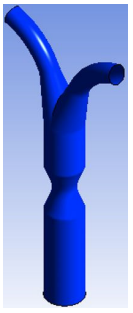
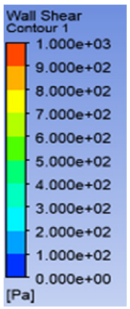
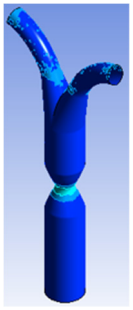
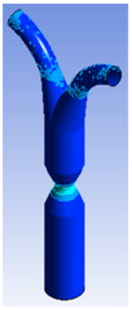
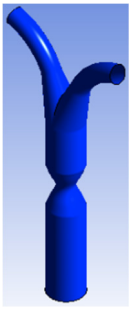
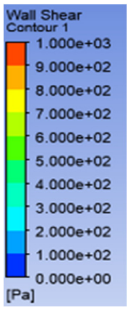
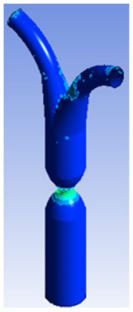
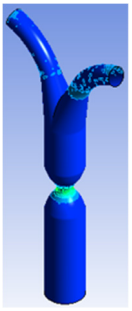
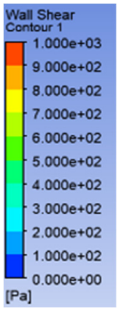
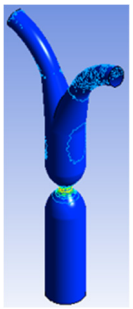
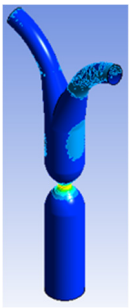
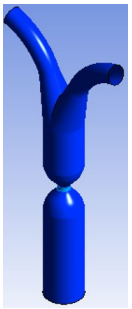
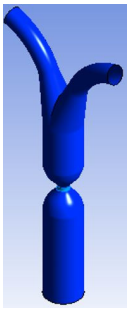
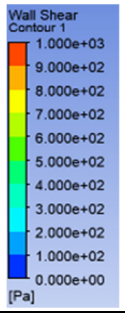
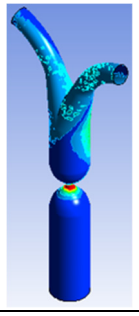
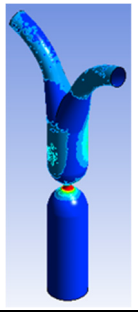
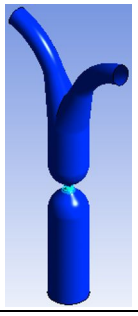
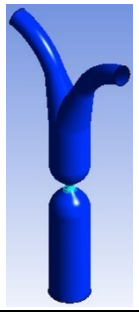
Şekil 7. Tüm darlık oranlarında ana arter girişinden ayrılma noktasına kadar olan basınç değişimi

Çizelge 4'te Newtonyen viskozitede çalışılan tüm darlık durumlarının akım çizgileri gösterilmektedir. Artan darlık oranı sistol veya diastol fazından bağımsız olarak akım çizgilerinde karmaşaya neden olduğu ve var olan karmaşayı arttırdığı tespit edilmiştir. Ana arterdeki akım çizgilerinde belirgin karmaşa %70 darlık oranından daha sonra başladığı görünmektedir. Ancak darlık durumu %80 oranına geldiğinde akımdaki karmaşa hem ana arterde hem de dallanmanın kollarında oluşmaktadır. Ayrıca akım çizgileri laminer ve k-ε türbülans modeli arasında %80 darlık durumu dışında görünür bir fark göstermemektedir. Laminer durumun hızı türbülans durumdan görece olarak biraz daha fazla hesapladığı konturlar yardımıyla da anlaşılmaktadır. Newtonyen viskozitede çalışılan beş farklı durumunun farklı hızlarda ve rejimlerdeki duvar kayma gerilmesi konturları Çizelge 5'te gösterilmektedir. %40, 50 ve 60 darlık durumunda sistol fazında darlık bölgesinde duvar kayma gerilmesi değerlerinde artış gözükürken bu durum diastol fazda tespit edilememiştir. Ancak darlık oranı %70'e ulaştığında diastol fazında darlık bölgesinde darlığın daha az olduğu durumlara kıyasla konturlardaki renk değişiminin koyulaşmasından da anlaşılacağı üzere yükselmiş duvar kayma gerilmesi değerleri vermiştir. Bu davranışın literatürde yapılan çalışmalarla benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir [25,26]. Ayrıca sistol fazda artan darlık oranı ile duvar kayma gerilmesi konturundaki renk değişimi sadece darlık bölgesinde değil damarın diğer bölgelerinde de duvar kayma gerilmesi değerlerinde artışa neden olmuştur. Bunun yanı sıra artan darlık oranı diğer incelenen akış parametrelerinde olduğu gibi laminer ve türbülans modelleri arasındaki sonuç farklılıklarını da arttırmaktadır. Bu durum duvar kayma gerilmesi konturlarında darlığın %60, 70 ve 80 olduğu durumlarda tespit edilirken, daha düşük darlık durumları olan %40 ve 50 durumunda belirgin bir şekilde tespit edilememektedir.

Çizelge 4. Beş farklı darlık durumunda Newtonyen viskozitede 2 farklı hız ve rejim için akım çizgileri

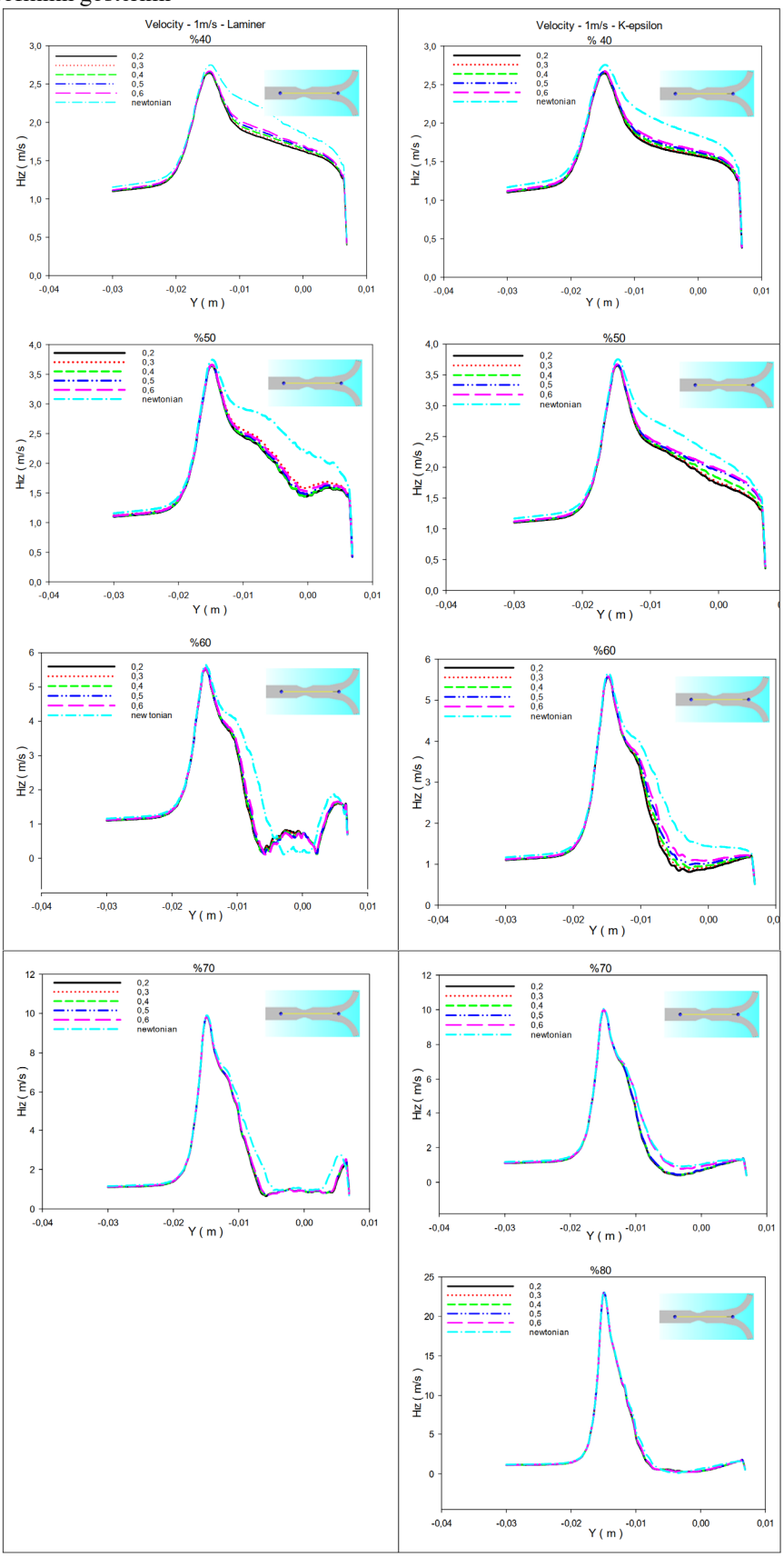
Daralma oranları		1 m/s (Sistol)		0,2 m/s (Diastol)	
		Laminer	k-ε	Laminer	k-ε
% 40					
% 50					
% 60					
% 70					
% 80					

Çizelge 5. Beş farklı darlık durumunda Newtonyen viskozitede iki farklı hız ve rejim için duvar kayma gerilmesi gösterimi

Daralma oranları	DKG	1 m/s (Sistol)		0,2 m/s(Diastol)	
		Laminer	k-ε	Laminer	k-ε
% 40					
% 50					
% 60					
% 70					
% 80					

Çizelge 6'da, Casson viskozite modeli kullanılarak oluşturulan hız profilleri sunulmaktadır. Çalışmada, farklı viskozite modellerinin akış alanı üzerindeki etkilerini karşılaştırmak amacıyla, Casson modeli beş farklı hematokrit (Hct) değeri (0.2, 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6) için çözülmüş; aynı geometrik koşullarda Newtonyen model de referans olarak eklenmiştir. Bu analizler, hem laminer hem de k–ε türbülans rejimlerinde gerçekleştirilmiş olup, darlık oranları %40, %50, %60, %70 ve %80 olacak şekilde kademeli olarak artırılmıştır. Böylece, darlık oranı ve hematokrit değişiminin hız profilleri üzerindeki etkisi sistematik biçimde incelenmiştir. %40 darlık oranında elde edilen sonuçlar, laminer ve k–ε modelleri arasında oldukça yakın değerler göstermektedir. Her iki rejimde de darlık öncesi bölgede akış düzenli olup hız dağılımları simetrik karakterdedir. Darlık bölgesine yaklaştıkça hız artmakta ve tepe noktasına ulaştıktan sonra akış yeniden genişleyen kesitte düşmektedir. Laminer modelde maksimum hız yaklaşık 2.8 m/s, k–ε modelinde ise 2.7 m/s olarak hesaplanmıştır. Türbülans modeli, daralma sonrası bölgede hızın daha yavaş azaldığını ve akış ayrılmasının daha geniş bir alana yayıldığını göstermektedir. Newtonyen ve Casson modelleri karşılaştırıldığında, Newtonyen modelin tüm hematokrit değerleri için daha yüksek hızlar ürettiği görülmektedir. Bu fark düşük darlık oranlarında ortalama %3–5 mertebesindedir. Darlık oranı %50'ye çıkarıldığında, akış yapısı daha karmaşık hale gelmiş ve laminer ile türbülans modelleri arasındaki fark belirginleşmiştir. Laminer modelde tepe hız yaklaşık 3.4 m/s, k–ε modelinde ise 3.5 m/s civarındadır. Darlık sonrası bölgede laminer modelde hız keskin şekilde düşerken, k–ε modelinde ayrılma bölgesi daha uzun ve yumuşak bir hız geçişiyle karakterizedir. Bu durum, türbülans modelinin akış ayrılmasını daha gerçekçi biçimde temsil ettiğini göstermektedir. Newtonyen model, Casson modeline göre darlık öncesinde benzer davranış sergilerken, darlık sonrasında daha yüksek hız değerleri üretmiştir. Bu fark, özellikle hematokrit değeri arttıkça artan efektif viskozitenin sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Casson modelinde Hct = 0.6 için tepe hız yaklaşık %7 daha düşük bulunmuştur. %60 darlıkta akış ayrılmaları belirgin hale gelmiş, viskozite modelleri arasındaki fark daha görünür olmuştur. Darlık öncesinde Newtonyen ve Casson modelleri birbirine yakın sonuç verirken, darlık sonrası bölgede Newtonyen viskozite modeli 3.8–3.9 m/s tepe hız değerlerine ulaşmış, Casson modelinde ise bu değer 3.5–3.6 m/s aralığında kalmıştır. Türbülans modeli, ayrılma ve yeniden bağlanma bölgelerini laminer çözüme kıyasla daha ileri bir konumda göstermektedir. Laminer akışta, viskoz kuvvetlerin baskın olması nedeniyle darlık sonrası bölgede akış hızında salınımlar ve kararsızlıklar gözlenmiştir. Türbülans modelinde ise bu bölgede hız değişimleri daha dengelidir. Casson modelinde hematokrit değeri arttıkça viskozite artmakta ve bu durum hız profilinde belirgin bir sönümleme etkisi yaratmaktadır. Darlık oranı %70 olduğunda akışın rejimi daha karmaşık hale gelmiş, ancak Casson ve Newtonyen modelleri arasındaki fark azalmıştır. Bu durum, daralmanın etkisiyle yüksek hız gradyenlerinin hâkim olduğu bölgelerde kayma hızına bağlı viskozite değişiminin göreceli etkisinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Newtonyen model darlık sonrası bölgede hâlâ daha yüksek hız değerleri göstermektedir; ancak Casson modelinde Hct = 0.6 için sonuçlar Newtonyen modele oldukça yaklaşmıştır. Bu hematokrit değeri, özellikle türbülans rejiminde Newtonyen akışla neredeyse çakışan bir profil oluşturmuş ve diğer Casson modellerinden ayrışmıştır. Bu sonuç, yüksek hematokrit seviyelerinde kanın akış davranışının Newtonyen akışa yakınlaştığını göstermektedir. %80 darlık oranında, türbülans rejiminde tüm modellerin hız profilleri neredeyse üst üste binmiş ve farklar minimal düzeye inmiştir. Darlık öncesi bölgede hız dağılımları simetrik, darlık sonrası bölgede ise akış ayrılması belirgin fakat modellere göre fark yaratmayacak düzeydedir. Bu darlık seviyesinde, kanın non-Newtonyen özellikleri akışın genel dinamiğine belirgin bir etkide bulunmamaktadır. Laminer durumda ise darlık sonrası bölgede küçük dalgalanmalar görülse de genel hız seviyesi modeller arasında benzer kalmıştır. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, Casson viskozite modeli artan hematokrit değeriyle birlikte düşük darlık oranlarında (özellikle %40–%50) daha yüksek hız sonuçları üretmektedir. Ancak darlık oranı arttıkça hematokrit değişiminin hız profili üzerindeki etkisi azalmaktadır. Türbülans rejiminde Casson modelleri arasındaki farklar laminer rejime göre daha belirgin olup, özellikle ayrılma bölgesine kadar olan bölgede hematokrit değişimine karşı daha yüksek hassasiyet gözlenmiştir. Sonuç olarak, Casson modelinin Newtonyen modele göre farkı, darlık sonrası akış yapısında ve ayrılma bölgesinde açıkça ortaya çıkmaktadır. Türbülans modeli (k–ε) bu farklılıkları daha net biçimde yansıtarak, akış ayrılması ve yeniden bağlanma bölgelerinin konumlarını laminer çözüme göre daha doğru tahmin etmektedir. Bu durum, özellikle yüksek Reynolds sayılı damar akışlarında türbülans modelinin kullanımının gerekliliğini ve Casson viskozite modelinin kanın gerçek reolojik davranışını temsil etmedeki önemini ortaya koymaktadır.

Çizelge 6. Beş farklı darlık durumunda Casson viskozitede modelinde iki farklı hız ve rejim için hız profilinin gösterimi



4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, arteriyel darlıkların akış dinamikleri üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Newtonyen ve Casson viskozite modelleri kullanılarak farklı darlık oranlarına sahip iki kollu arter geometrilerinde akış profilleri, basınç değişimleri, duvar kayma gerilmesi ve akım çizgileri konturları analiz edilmiştir. Çalışmanın amacı, arterlerde meydana gelen darlıkların kan akışı üzerindeki etkilerini anlamak ve bu etkilerin klinik sonuçlara olası yansımalarını değerlendirmektir.

- Yapılan analizlerde, %40 darlığa sahip stenozlu damarda laminer akışta daralma sonrası hızın türbülanslı akışa göre daha yüksek olduğu, bu farkın özellikle 1 m/s giriş hızında belirginleştiği görülmüştür. Darlık oranı arttıkça daralma bölgesinde hızın logaritmik olarak arttığı, daralma sonrasında ise azaldığı belirlenmiştir. Türbülanslı akış rejiminde hız dalgalanmalarının azaldığı ve artan darlık oranıyla modelin daha kararlı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.
- Casson viskozite modeliyle, darlık sonrası bölgede Newtonyen modele göre hız farklarının arttığı; yüksek hematokrit değerlerinde bu farkın azaldığı gözlenmiştir. Özellikle %70 darlıkta 0.6 hematokrit değerinde Casson modeli Newtonyen modele yaklaşmıştır. Genel olarak, artan darlık oranıyla türbülans modelinin akışı daha gerçekçi temsil ettiği ve Casson modelinin non-Newtonyen etkileri başarıyla yansıttığı sonucuna varılmıştır.
- Daralma sonrası hız artışı ve türbülansın stabil hale gelmesi, aterosklerotik plak üzerinde artan mekanik yükleri işaret etmektedir.
- Artan darlıkla birlikte gözlenen basınç kaybı, distal dokulara yeterli perfüzyon sağlanamamasına yol açabilir, bu da iskemik olayların biyomekanik açıklaması olarak değerlendirilebilir.
- Duvar kayma gerilmesi (WSS) → "%70 üzeri darlıklarda artan WSS değerleri, özellikle plak rüptürü ve anevrizma progresyonu açısından risk faktörü olarak literatürde sıkça vurgulanmaktadır [28,29].

Elde edilen hemodinamik sonuçların, özellikle stent tasarımı ve implantasyon stratejilerinin optimize edilmesinde yol gösterici olabileceği literatürle de uyumludur [19,30].

5. KAYNAKLAR

1. Kamada, H., Nakamura, M., Ota, H., Higuchi, S. ve Takase, K. (2022). Kan damar hastalıkları için hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve 4D-flow MRI ile kan akışı analizi. *Journal of Cardiology, 80*(5), 386-396.
2. Zhao, Y., Ping, J., Yu, X., Cui, Y., Yin, J., Sun, C. ve Tang, L. (2021). Budd-Chiari sendromunda inferior vena kava darlığı ile zamana bağlı kan akışı için hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonu ve ameliyat sonrası etkinlik değerlendirmesine yönelik çıkarımlar. *Clinical Biomechanics, 82*, 105256.
3. Qiu, Y., Wang, J., Zhao, J., Wang, T., Zheng, T. ve Yuan, D. (2022). Karın aort anevrizmasında kan akış modeli ile rüptür riski arasındaki ilişki: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği tabanlı analiz. *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery, 64*(2-3), 155-164.
4. Hamidah, M.A. ve Hossain, S.C. (2024). Stenozlu renal bifurke arterde nabızlı Newtonyen olmayan kan akışının modelleme analizi. *International Journal of Thermofluids, 22*, 100645.
5. Yin, Z., Zhou, C., Guo, J., Wei, Y., Ma, Y., Zhou, F. ve Zhang, L.J. (2024). İntrakraniyal arter darlığında BT türevli fraksiyonel akış rezervi: Hesaplamalı akışkanlar dinamiğine dayalı bir pilot çalışma. *European Journal of Radiology, 171*, 111285.
6. Hussain, A., Dar, M.N.R. ve Tag-Eldin, E.M. (2023). Darlık ve anevrizmanın darlıktan-anevrizmalı arterde kan akışı üzerindeki etkileri. *Heliyon, 9*(7), e17788.
7. Nadeem, S., Ali, S., Akkurt, N., Hamida, M.B.B., Almutairi, S., Ghazwani, H.A. ve Al-Shafay, A.S. (2023). Hafif ve şiddetli darlık durumları için Newtonyen olmayan arteriyel kan akışının modellenmesi ve sayısal simülasyonu. *Alexandria Engineering Journal, 72*, 195-211.
8. Liu, X., Peng, C., Xia, Y., Gao, Z., Xu, P., Wang, X. ve Zhang, H. (2017). Seri stenotik koroner arterlerin hemodinamik analizi. *Biomedical Engineering Online, 16*, 1-16.
9. Gataa, I.S., Abdullah, Z.Y., Mozoun, M.A., Salahshour, S., Yazdekhasti, A. ve Esmaeili, S. (2024). Darlık ve transplantasyonun, konakçı ve nakledilen damarlardaki kan akışı üzerindeki etkileri: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak yapılan analiz. *International Journal of Thermofluids, 23*, 100800.

10. Jack, J.T., Jensen, M., Collins, R.T., Chan, F.P. ve Millett, P.C. (2024). Williams sendromu hastasının konjenital kalp hastalığı olan aort damarında hemodinamik akışın sayısal incelenmesi. *Journal of Biomechanics, 168*, 112124.
11. Perinajová, R., Juffermans, J.F., Westenberg, J.J., van der Palen, R.L., van den Boogaard, P.J., Lamb, H.J. ve Kenjereš, S. (2021). Torasik aortalarda CFD-MRI bağlantılı simülasyonlarda geometrik olarak indüklenen duvar kayma gerilimi değişkenliği. *Computers in Biology and Medicine, 133*, 104385.
12. Varghese, S.S. ve Frankel, S.H. (2003). Darlıktaki damarlarda nabızlı türbülanslı akışın sayısal modellenmesi. *Journal of Biomechanical Engineering, 125*(4), 445-460.
13. Nadeem, S., Akhtar, S., Saleem, A., Akkurt, N., Ghazwani, H.A. ve Eldin, S.M. (2023). OpenFOAM kullanılarak darlık olan arterlerde kan akışı için sayısal hesaplamalar. *Alexandria Engineering Journal, 69*, 613-637.
14. Malek, A.M., Alper, S.L. & Izumo, S. (1999). Hemodynamic shear stress and its role in atherosclerosis. JAMA*, 282*(21), 2035-2042.
15. Stone, P.H., Saito, S., Takahashi, S., Makita, Y., Nakamura, S., … & Katsuki, T. (2012). Prediction of progression of coronary artery disease and clinical outcomes using vascular profiling of endothelial shear stress and arterial plaque characteristics: The PREDICTION Study. *Circulation, 126*(2), 172-181.
16. Nagarathnam, S. ve Chinyoka, T. (2023). Sonlu hacim yöntemleri ve OpenFOAM kullanılarak bifurkasyon ve darlık içeren arterde kan akışı simülasyonu. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 322*, 105157.
17. Shakya, K. ve Chowdhury, S.R. (2024). Karotid arter stenozunun farklı konumlardaki şiddetini ve çeşitli hemodinamik biyobelirteçler üzerindeki etkisini analiz etmek için bir akışkan-yapı etkileşimi çalışması. *European Journal of Mechanics-B/Fluids, 106*, 227-237.
18. Chen, C., Chen, H., Freed, D., Shock, R., Staroselsky, I., Zhang, R. ve Feldman, C.L. (2006). Genişletilmiş Boltzmann kinetik yaklaşımı kullanılarak kan akışının simülasyonu. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 362*(1), 174-181.
19. Morbiducci, U., Gallo, D., Massai, D., Consolo, F., Ponzini, R., Antiga, L., … & Redaelli, A. (2011). On the importance of blood rheology for bulk flow in hemodynamic models of the carotid bifurcation. Journal of Biomechanics*, 44*(13), 2427-2438.
20. Chnafa, C., Mendez, S. & Nicoud, F. (2014). Image-based large-eddy simulation in a realistic left heart. *Computers & Fluids, 94*, 173-187.
21. Steinman, D.A. (2002). Image-based computational fluid dynamics modeling in realistic arterial geometries. *Annals of Biomedical Engineering, 30*(4), 483-497.
22. Morales, H.G., Larrabide, I., Geers, A.J., Aguilar, M.L. ve Frangi, A.F. (2013). Koil yapılı serebral anevrizmalarda Newtonyen ve Newtonyen olmayan kan akışı. *Journal of Biomechanics, 46*(13), 2158-2164.
23. Merrill, E.W., Gilliland, E.R., Cokelet, G., Shin, H., Britten, A. ve Wells, R.E. (1963). Sıfır akışa yakın ve sıfır akışta insan kanının reolojisi: Sıcaklık ve hematokrit düzeyinin etkileri. *Biophysical Journal, 3*(3), 199-213.
24. Kumar, G., Kumar, H., Mandia, K., Zunaid, M., Ansari, N.A. ve Husain, A. (2021). İki stenoz içeren bir arterde Newtonyen olmayan nabızlı akış. *Materials Today: Proceedings*.
25. Husain, I., Labropulu, F., Langdon, C. ve Schwark, J. (2013). Kan akışı simülasyonları için Newtonyen ve Newtonyen olmayan modellerin karşılaştırılması. *Journal of the Mechanical Behaviour of Materials, 21*(5-6), 147-153.
26. Buradi, A. (2019). Dolambaçlı ve darlık içeren koroner arterlerde kan akışının çok fazlı yaklaşımla sayısal simülasyonu. *Doktora tezi.* National Institute of Technology Karnataka, Surathkal.
27. Hoskins, P.R., Loupas, T. ve McDicken, W.N. (1990). Bir akış fantomunda insan kanı ve yapay kan kullanılarak elde edilen Doppler spektrumlarının karşılaştırılması. *Ultrasound in Medicine & Biology, 16*(2), 141-147.
28. Chatzizisis, Y.S., Coskun, A.U., Jonas, M., Edelman, E.R., Feldman, C.L. & Stone, P.H. (2007). Role of endothelial shear stress in the natural history of coronary atherosclerosis and vascular remodeling: Molecular, cellular, and vascular behavior. *Journal of the American College of Cardiology, 49*(25), 2379-2393.
29. Meng, H., Tutino, V.M., Xiang, J. & Siddiqui, A. (2014). High WSS or low WSS? Complex interactions of hemodynamics with intracranial aneurysm initiation, growth, and rupture. *Journal of NeuroInterventional Surgery, 6*(2), 146-151.
30. Holzapfel, G.A., Stadler, M. & Schulze-Bauer, C.A. (2002). A layer-specific three-dimensional model for the simulation of balloon angioplasty using magnetic resonance imaging and mechanical testing. *Annals of Biomedical Engineering, 30*(6), 753-767.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 1 MART/MARCH 2026

Sıkılama Malzemesi Seçiminin Patlatma Performansına Etkisi: Taş Tozu ile Taş Tozu-Mıcır Karışımının Karşılaştırmalı Analizi

Meriç Can ÖZYURT [1,a]

[1]*İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0002-7545-7756*

Makale Bilgileri
Geliş : 13.10.2025
Kabul : 23.02.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1802584

Sorumlu Yazar
Meriç Can ÖZYURT
meric.ozyurt@iuc.edu.tr

Anahtar Kelimeler
Delme ve patlatma
Sıkılama malzemesi
Patlatma kaynaklı çevresel etkiler
Patlatma ile kaya parçalanması

***Atıf şekli:** ÖZYURT, M.C., (2026). Sıkılama Malzemesi Seçiminin Patlatma Performansına Etkisi: Taş Tozu ile Taş Tozu-Mıcır Karışımının Karşılaştırmalı Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(1), 181-194.*

ÖZ

Patlatma uygulamalarında, zaman kısıtı veya özensizlik nedeniyle sıkılama genellikle yetersiz kalmakta ve uygun malzeme seçiminde belirsizlikler yaşanmaktadır. Mevcut literatür, yaygın olarak kullanılan taş tozu ve taş tozu-mıcır karışımının performansını kapsamlı ve karşılaştırmalı bir şekilde inceleyen çalışmalar açısından sınırlıdır. Bu bağlamda, bu çalışmanın temel amacı, söz konusu malzemelerin hem parçalanma performansı hem de titreşim/hava şoku gibi çevresel etkiler üzerindeki rolünü sistematik bir saha çalışması ile araştırmaktır. Elde edilen bulgular, taş tozu-mıcır karışımının, gaz kaçağını minimize etmede, enerji verimliliği sağlamada ve parçalanma performansını artırmada taş tozuna kıyasla belirgin bir üstünlük sergilediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, titreşim ve hava şoku yayılımında daha kontrollü ve öngörülebilir bir davranış paterni oluşturduğu tespit edilmiştir.

The Effect of Stemming Material Selection on Blasting Performance: A Comparative Analysis of Pure Stone Dust and Stone Dust-Gravel Mixture

Article Info
Received : 13.10.2025
Accepted : 23.02.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1802584

Corresponding Author
Meriç Can ÖZYURT
meric.ozyurt@iuc.edu.tr

Keywords
Drilling and blasting
Stemming material
Blast-induced environmental effects
Rock fragmentation by blasting

***How to cite:** ÖZYURT, M.C., (2026). The Effect of Stemming Material Selection on Blasting Performance: A Comparative Analysis of Pure Stone Dust and Stone Dust-Gravel Mixture. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(1), 181-194.*

ABSTRACT

In blasting applications, stemming is often neglected or performed inadequately, leading to uncertainties in optimal material selection. While stone dust and stone dust-gravel mixtures are commonly used, a comprehensive, field-based comparison of their performance is lacking in the literature. This study systematically investigates the role of these two materials on both fragmentation performance and environmental effects through a secondary analysis of extensive field data from 10 quarries. The findings demonstrate that the stone dust-gravel mixture exhibits distinct superiority over pure stone dust in minimizing gas leakage, providing energy efficiency, and enhancing fragmentation performance. Furthermore, the mixture resulted in a more controlled and predictable behavior pattern in the propagation of ground vibration and air overpressure.

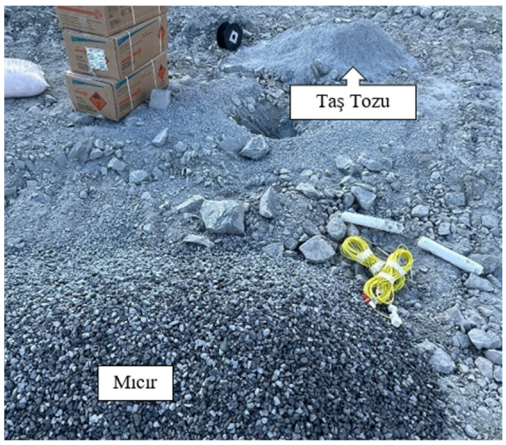
1. GİRİŞ

Patlatma, maden, taş ocağı ve inşaat sektörlerinde kayaların parçalanmasında vazgeçilmez bir yöntemdir. Hem Türkiye'de hem de dünyada milyar dolarlık iş hacmine sahiptir [1]. Verimli bir şekilde uygulandığında büyük ekonomik kazançlar sağlarken, verimsiz uygulamalar ise enerji kaybı, maliyet artışı ve istenmeyen çevresel etkilere yol açmaktadır [2]. Madencilik endüstrisinin sürdürülebilirliği ile doğrudan bağlantılı olan patlatma verimliliğinin artırılması, artan küresel mineral talebi karşısında kritik bir öneme sahiptir [3]. Ne var ki, kaya parçalanmasında kullanılan patlayıcıların enerji kullanım verimliliği halen düşük seviyelerde olup, patlama enerjisinin önemli bir kısmı titreşim veya hava şoku olarak israf olmaktadır [4-6].

Bu genel verimsizlik bağlamında, patlatma performansını iyileştirmede kilit rol oyun parametrelerden biri sıkılamadır. Patlatma deliğinin serbest yüzeye yakın kısmının patlayıcı olmayan malzemeyle tıkanması işlemidir [7,8]. Birincil işlevi, patlayıcı gazların kaya içinde bir kırık ağı oluşturup parçalanmayı sağlayacak yeterli süre boyunca delik içinde hapsedilmesidir. Snelling [9] tarafından yapılan öncü çalışmada, iyi bir sıkılamanın patlatma verimliliğini %40'a varan oranlarda artırabileceği belirtilmiştir. Sıkılamanın önemi, parçalanma verimliliğini artırmasının yanı sıra, çevresel etkileri minimize etmesiyle de ortaya konmuştur [10-12].

Sıkılama konusundaki bu önem, onu kapsamlı bir şekilde inceleyen değerli bilimsel çalışmaların odağı haline getirmiştir. Sıkılama boyunun optimizasyonu [12-16], sıkılama davranışı [17] ve sıkılama uygulamasının parçalanma ve titreşim üzerine etkileri [18,19] detaylıca incelenmiştir. Oates ve Spiteri [20] tarafından yapılan bir literatür incelemesi, madencilik endüstrisinde sıkılama ve en iyi uygulamaları kapsamlı bir şekilde özetlemiştir.

Pratikte ise sıkılama malzemesi seçimi büyük çeşitlilik göstermektedir. Sıkılama malzemesi olarak, başta delme makinesi pasası (taş tozu) ve taş tozu-mıcır karışımı (Şekil 1) olmak üzere çeşitli malzemeler yaygın şekilde kullanılmaktadır [21,22]. Taş tozunun temin kolaylığı ve sıfır maliyeti gibi avantajları bulunmakla birlikte [18], ince ve yuvarlak taneli yapısı nedeniyle yüksek gaz basıncı karşısında gaz kaçağına izin verme eğilimindedir. Buna karşılık, mıcırın kaba, köşeli ve geniş tane dağılımı, mekanik kenetlenme ve yüksek sürtünme direnci sağlayarak daha etkili bir bariyer oluşturur. Bu iki malzemenin karışımından oluşan taş tozu-mıcır, mıcırın oluşturduğu "iskelet" yapı ile mekanik mukavemeti, taş tozunun dolgu özelliği ile de geçirimsizliği bir arada sunarak üstün bir performans potansiyeli taşımaktadır.



Şekil 1. Sıkılama için kullanılan taş tozu ve mıcır

Ayrıca, literatürde alçı [7,23-26], su kartuşu, kauçuk tıkaçlar ve özel kimyasal karışımlar gibi alternatif malzemeler de araştırılmıştır [10,27]. Hatta Zhang ve arkadaşları [28] çelik sıkılama üzerine deneysel bir çalışma yürütmüştür. Ancak, bu malzemelerin bir kısmı maliyet, ulaşılabilirlik ve uygulama zorluğu gibi nedenlerle yaygın kabul görmemiştir. Kil ve kum gibi geleneksel malzemeler ise yaygın bulunurluk, düşük maliyet ve toksik olmama gibi avantajlara sahiptir, ancak bu malzemelerle ilgili araştırmalar halen sınırlıdır [3]. Son dönemde yapılan çalışmalar, sıkılama malzemesinin karakteristik empedansının patlama verimi üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Sıkılama malzemesinin empedansı patlayıcınınkini aştığında, delik içindeki patlama basıncının arttığı, bunun da kaya parçalanmasını olumlu etkilediği gösterilmiştir [28-30]. Shi ve arkadaşları [3], kilin yüksek karakteristik empedansı sayesinde kum, su veya

sıkılama yapılmamasına kıyasla daha yüksek gerinim tepe değerleri ve kaya parçalanma verimi sağladığını deneysel olarak kanıtlamıştır.

Ancak, pratikte birçok maden sahasında zaman tasarrufu amacıyla veya özensizlik nedeniyle sıkılama ya yetersiz bırakılmakta, ayrıca uygun sıkılama malzemesi seçiminde belirsizlikler bulunmaktadır [3]. Mevcut literatür, özellikle yaygın olarak kullanılan taş tozu ve taş tozu-mıcır karışımının performansını, hem parçalanma verimi hem de titreşim/hava şoku gibi çevresel parametreler üzerinden kapsamlı ve karşılaştırmalı bir şekilde inceleyen çalışmalar açısından nispeten sınırlıdır. Bu bağlamda, bu çalışmanın temel amacı, sıkılama malzemesi olarak taş tozu ve taş tozu-mıcır karışımı kullanımının, bir yandan patlatma ile elde edilen parçalanma performansına, diğer yandan titreşim ve hava şoku gibi çevresel etkilere olan etkisini karşılaştırmalı olarak incelemektir. Bu çalışmanın bulguları, endüstride yaygın, ekonomik ve erişilebilir malzemeler kullanılarak patlatma optimizasyonu için somut veri ve öneriler sunmaktadır.

Bu amaçla, bu çalışmada mevcut saha verilerinin sistematik bir ikincil analizi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın analizleri, Arslan ve arkadaşları [31] ve Ozyurt ve arkadaşları [32] tarafından Trakya Bölgesi'ndeki 10 farklı taş ocağından toplanan kapsamlı bir ham veri seti üzerinden gerçekleştirilmiştir. Söz konusu önceki çalışmalar patlatma verimliliğinin genel değerlendirmesi ve patlatma ile kaya parçalanmasına yönelik tahmin modeli geliştirilmesi üzerine odaklanmıştır. Mevcut çalışma ise, aynı veri setini, sıkılama malzemesi performansının karşılaştırmalı analizine odaklanarak yeniden değerlendirmiş; titreşim ve hava şoku verileri için yeni regresyon modelleri türetmiş, parçalanma verilerini sıkılama tipi temelinde kıyaslamış ve gaz kaçağı gözlemlerini sistematize etmiştir. Böylece, aynı ham verilerden yola çıkılarak özgün bir bakış açısı ve yeni sonuçlar elde edilmiştir.

2. ÇALIŞMA SAHALARI

Bu çalışma, Arslan ve arkadaşları [31] ve Ozyurt ve arkadaşları [32] tarafından Kırklareli, Trakya bölgesindeki 10 farklı taş ocağından toplanan bir ham veri setinin ikincil analizine dayanmaktadır. Söz konusu birincil çalışmalar, 19 patlatma atımına ait jeolojik, tasarım, parçalanma, titreşim ve hava şoku verilerini içermektedir. Mevcut çalışmanın amacı, aynı veri setini sıkılama malzemesi performansı odağında yeniden değerlendirmektir. Çizelge 1, bu çalışma sahalarının birincil çalışmalardan derlenen jeolojik ve mekanik özelliklerini özetlemektedir.

Çizelge 1. Çalışma sahalarının jeolojik ve mekanik özellikleri [31, 32]

Çalışma sahası	Formasyon	Kaya birimi	TEBD* (MPa)	Kaya sınıfı**	ρ* (t/m^3)	D*** (mm)		
						En düşük	Ort. (D_{50})	En büyük
1	Pınarhisar	Kireçtaşı	89	Sağlam	2.54	1030	2515	5635
2	Pınarhisar	Kireçtaşı	98	Sağlam	2.52	930	3355	7520
3	Pınarhisar	Kireçtaşı	71	Sağlam	2.52	755	3665	4690
4	Süloğlu	Kumtaşı	95	Sağlam	2.55	365	3600	1865
5	Soğucak	Kireçtaşı	48	Sağlam	2.50	520	3430	2960
6	Soğucak	Kireçtaşı	42	Sağlam	2.44	1580	2705	4970
7	Trakya	Kireçtaşı	76	Sağlam	2.51	310	1925	3395
8	Süloğlu	Kumtaşı	55	Sağlam	2.50	330	1660	3200
9	İslambeyli	Marn	130	Çok sağlam	2.55	310	2170	4360
10	Süloğlu	Kireçtaşı	186	Çok sağlam	2.60	1430	1990	6135

T.E.B.D.: Tek eksenli basınç dayanımı, ρ: Birim hacim ağırlığı, D: Basamak aynasındaki blok Boyutu

Birincil verilere göre, incelenen kaya birimleri sağlam ve çok sağlam kaya sınıfına girmektedir. Ayrıca, kaya kütlelerindeki süreksizler ve bu süreksizliklerin oluşturduğu blok boyutlarında da belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir. Kayaların dayanımındaki (37-186 MPa) ve doğal blok boyutlarındaki (D_{50}: 1660-3665 mm) bu çeşitlilik, sıkılama malzemesinin etkilerinin farklı kaya kütlesi koşullarında incelenebilmesi için uygun bir zemin oluşturmaktadır.

Çalışma alanında yer alan formasyonların litolojik özellikleri ve stratigrafik ilişkileri şu şekilde özetlenebilir:

İslambeyli Formasyonu 30-100 m arasında değişen kalınlığıyla dikkat çekmektedir. Birim, temelde zayıf sıkılaşmış, kötü boylanmalı ve açısal bloklu yapıdaki volkanik klastik kumtaşı-konglomera ile başlamakta; üzerine sarı, krem-gri renkli karbonat çimentolu, sert ve sıkı bağlı kumtaşı, kiltaşı-marn ve kireçtaşı

istiflenmektedir [33,34]. Ayrıca bu birimde marnlarla ardalanmalı, konvolüt yapılı tüf ve tüfitler de bulunmaktadır.

Bölgedeki diğer bir önemli birim olan Pınarhisar Formasyonu (Oligosen) [35,36] ise kumtaşı, çakıllı kumtaşı, konglomera ve oolitik, kumlu ile killi kireçtaşı gibi farklı litolojilerden oluşmaktadır. Birim, gri ve boz renkli, ince-orta tabakalı ve yer yer oolitik yapıda olup, üst seviyelerinde manganezli konglomera ve kumtaşı seviyeleri ile balık dişi fosilleri içeren konglomera-kireçtaşı ardalanması dikkat çekmektedir.

Soğucak Formasyonu [37,38] ise Geç Lutesiyen ile Erken Oligosen aralığındaki yaşıyla, Kuzey Trakya Havzası'nda sığ denizel ortamlardan derin açık denizel şartlara uzanan bir çökelme ortamı sürecini yansıtmaktadır.

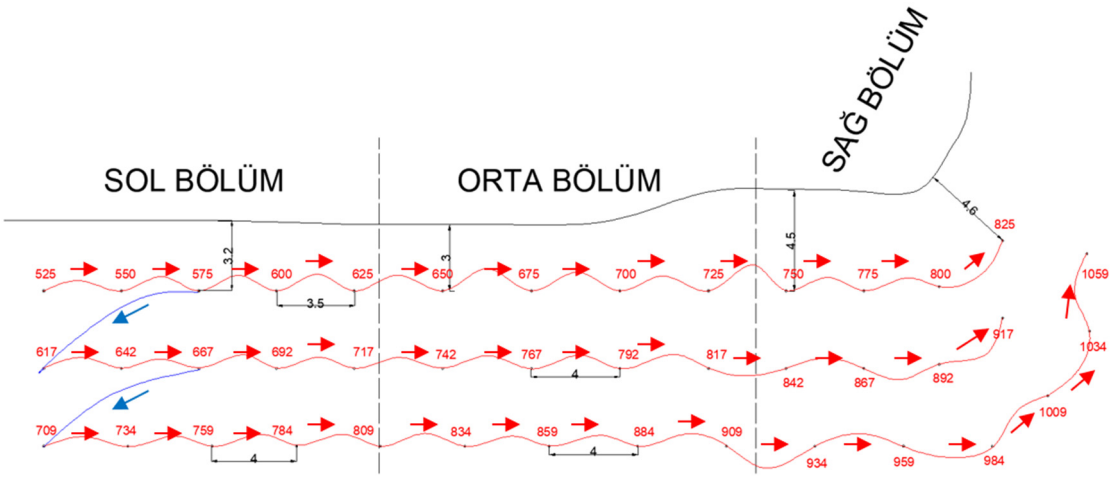
Bunu takiben Süloğlu Formasyonu (Orta-Üst Oligosen) [39] gelmektedir. Formasyon, tabanda gri, kirli sarı ve bej renkli, ince tabakalı, az karbonatlı şeyl ve silttaşı ile balık fosilli miltaşlarından oluşmakta; üste doğru ise sarımsı gri renkli, ince-orta tabakalı, orta-iri taneli ve yer yer sıkı bağlı kumtaşları ile yeşilimsi gri, masif görünümlü kiltaşlarına geçiş yapmaktadır. Batı kesimlerde konkresyonlar ve linyit bantları gözlenirken, metamorfik temele yakın kesimlerde kömür bantları, taban seviyelerinde ise düşey konumlu manganez seviyeleri ve manganezli kumtaşları bulunmaktadır.

Son olarak, bölgede hâkim birim konumundaki Trakya Formasyonu [40] genellikle tabakalı bir yapı sergileyen kiltaşı ve kumtaşı istifinden oluşmakta olup, sahada gözlenen faylar ve sıkışma zonları nedeniyle birim içerisinde ezilmiş, çatlaklı ve kıvrımlı yapılar yaygın olarak karşılaşılan jeolojik unsurlar arasında yer almaktadır.

3. SAHA ÇALIŞMALARI KAYNAKLI VERİ SETİ

3.1. Patlatma Tasarım Parametreleri

Bu çalışmada, birincil veri setindeki parametrelerin yüksek değişkenliğini kontrol altına almak ve sıkılama malzemesinin etkisini daha belirgin bir şekilde ortaya koymak amacıyla bölge temelli bir istatistiksel yöntem benimsenmiştir. Bu kapsamda, atım bölgesi; sol, sağ ve gerektiğinde orta bölge olmak üzere, kritik patlatma parametreleri için belirlenen eşik değerlere göre iki veya üç bölgeye ayrılarak ayrı ayrı analiz edilmiştir (Şekil 2). Bu doğrultuda, 19 atım istatistiksel olarak daha güvenilir 43 veri grubuna ayrılarak analiz edilmiştir. Bu ikincil işlem, parametrelerdeki standart sapma değerlerini önemli ölçüde azaltmış ve sıkılama malzemesi ile performans parametreleri arasındaki nedensel ilişkilerin belirlenmesini kolaylaştırmıştır.



Şekil 2. Bölge temelli analiz için atım paterninin şematik gösterimi [31]

Araştırmada 89, 102 ve 127 mm çaplarındaki delikler kullanılmıştır. Delik dizaynı incelendiğinde; dilim kalınlığının 1,5–4,6 m (ortalama 2,82 ± 0,72 m), delik aralığının 2,2–4,1 m (ortalama 3,24 ± 0,45 m), basamak yüksekliğinin 4–12 m (ortalama 8,52 ± 2,31 m) ve delik boyunun ise 4–13 m (ortalama 9,24 ±

2,15 m) aralıklarında değiştiği tespit edilmiştir. Özgül şarj değerleri 0,23–0,76 kg/m³ (ortalama 0,45 ± 0,13 kg/m³), özgül delme değerleri ise 0,06–0,25 m/m³ (ortalama 0,11 ± 0,05 m/m³) aralığında dağılım göstermiştir.

Sıkılama boyutunun tek başına yeterli bir gösterge olmaması nedeniyle, delik boyu ile ilişkili olarak değerlendirilmesi amacıyla "sıkılama oranı" parametresi tanımlanmıştır. Bu parametre, farklı delik boylarındaki sıkılama uygulamalarının ortak bir temelde karşılaştırılabilmesine olanak sağlamıştır. Sıkılama oranının artması, delik ağzından yüksek sıcaklık ve basınçtaki gaz kaçağının azalması anlamına gelmektedir. Çalışma kapsamında sıkılama oranı %17–36 aralığında değişmektedir.

Çizelge 2. Patlatma tasarım parametrelerinin temsili bir bölümü [31,32]

Saha	1			3			6		8			9		
atım	2			5			10		12			15		
Bölge	Sol	Orta	Sağ	Sol	Orta	Sağ	Sol	Sağ	Sol	Orta	Sağ	Sol	Orta	Sağ
d (mm)	89	89	89	89	89	89	89	89	102	102	102	127	127	127
n (adet)	20	20	20	44	64	40	25	20	35	40	40	62	46	32
B (m)	3.4	4.6	3.8	1.8	1.7	1.9	1.5	1.6	1.9	1.6	1.8	3.2	3.5	3.2
S (m)	3.2	3.1	2.5	3	3.2	3.5	2.5	2.9	4.1	3.6	3.5	3.7	3.6	3.4
K (m)	9	9	9	4	4	4	4	4	9	9	9	10	10	10
U (m)	0.5	0.5	0.5	0	0	0	5	5	1	1	1	1	1	1
H (m)	9.5	9.5	9.5	4	4	4	9	9	10	10	10	11	11	11
S.M.*	T*	T*	T*	T*	T*	T*	K*	K*	T*	T*	T*	K*	K*	K*
h_o (m)	2	2	2	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3
h (m)	7.5	7.5	7.5	3	3	3	6	6	7	7	7	8	8	8
h_o/H (%)	0.21	0.21	0.21	0.25	0.25	0.25	0.33	0.33	0.30	0.30	0.30	0.27	0.27	0.27
P.M.*	A*	A*	A*	A*	A*	A*	E*	E*	A*	A*	A*	A*	A*	A*
VoD (m/sn)	4905	4905	4905	4905	4905	4905	4750	4750	4905	4905	4905	4830	4830	4830
I_b (kg/m)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	7.8	7.8	6.5	6.5	6.5	10.1	10.1	10.1
Q (kg)	38.3	38.3	38.3	15.9	15.9	15.9	94.3	94.3	46.7	46.7	46.7	82	82	82
W (kg)	153.2	153.2	153.2	47.8	47.8	47.8	377.1	377.1	46.7	46.7	46.7	164.1	164.1	164.1
b (m/m³)	0.1	0.07	0.11	0.19	0.18	0.1	0.14	0.12	0.08	0.09	0.1	0.06	0.06	0.08
Q (kg/m³)	0.42	0.39	0.45	0.35	0.39	0.31	0.61	0.58	0.38	0.4	0.46	0.51	0.51	0.55

d: Delik çapı, n: Delik adedi, B: Dilim kalınlığı, S: Delik aralığı, K: Basamak yüksekliği, U: Dip delgi, H: Delik boyu, h_o: Sıkılama boyu, h: Şarj boyu, h_o/H: Sıkılama oranı, VoD: Patlayıcı maddenin detonasyon hızı, Ib: Şarj konsantrasyonu (Bir metre delikteki patlayıcı madde miktarı), Q: Bir delikteki patlayıcı madde miktarı, W: Gecikme başına düşen en yüksek patlayıcı madde miktarı, b: Özgül delme, q: Özgül şarj

* S.M.: Sıkılama malzemesi, P.M.: Patlayıcı madde, T: Taş tozu, K: Taş tozu-Mıcır karışımı, A: ANFO, E: Emülsiyon

3.2. Patlatma Kaynaklı Titreşim ve Hava Şoku Ölçümü

Çalışmada, farklı sıkılama malzemelerinin çevresel titreşim düzeyleri üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, 19 atımdan kaydedilen 32 titreşim olayına ait veriler analiz edilmiştir. Analizlerde parçacık hızı bileşenleri, oluşum frekansları ve hava şoku değerleri (Çizelge 3) dikkate alınmıştır.

Titreşim büyüklüğünü normalize etmek ve tahmin modeli oluşturmak için ölçekli mesafe (SD) parametresi kullanılmıştır.

$$(\text{Titreşim için})\ SD = \frac{R\ (m)}{\sqrt{W\ (kg)}} \quad (1)$$

$$(\text{Hava Şoku için})\ SD = \frac{R\ (m)}{\sqrt[3]{W\ (kg)}} \quad (2)$$

Maksimum parçacık hızı ile ölçekli mesafe arasındaki ilişki, literatürde yaygın kabul gören üstel azalış modeli ile tanımlanmıştır.

$$PPV\ \left(\frac{mm}{sn}\right) = k\ x\ SD^{-\beta} \quad (3)$$

Bu denklemde k ve β sahaya özgü sabitler olup, sismik enerji iletim özelliklerini ve zeminin sönümleme karakteristiğini temsil eder.

Çizelge 3'teki ham veriler incelendiğinde, her iki malzeme için de PPV, frekans ve hava şoku değerlerinin geniş bir aralıkta dağıldığı görülmektedir. PPV değerleri taş tozu için 1.143 mm/sn ile 45.57 mm/sn arasında değişirken, taş tozu-mıcır karışımı için 0.635 mm/sn ile 50.9 mm/sn arasındadır; ancak taş tozu-mıcır karışımı kullanılan Atım No 8'de ölçülen 50.9 mm/sn PPV değeri istisnai olarak yüksektir. Frekans değerleri taş tozu için 11.4 Hz ile 68.1 Hz, taş tozu-mıcır karışımı için ise 5.63 Hz ile 89.9 Hz aralığındadır. Hava şoku seviyeleri taş tozu için 112.8 dBL ile 137.8 dBL, taş tozu-mıcır karışımı için ise 88.0 dBL ile 134.1 dBL arasında ölçülmüştür.

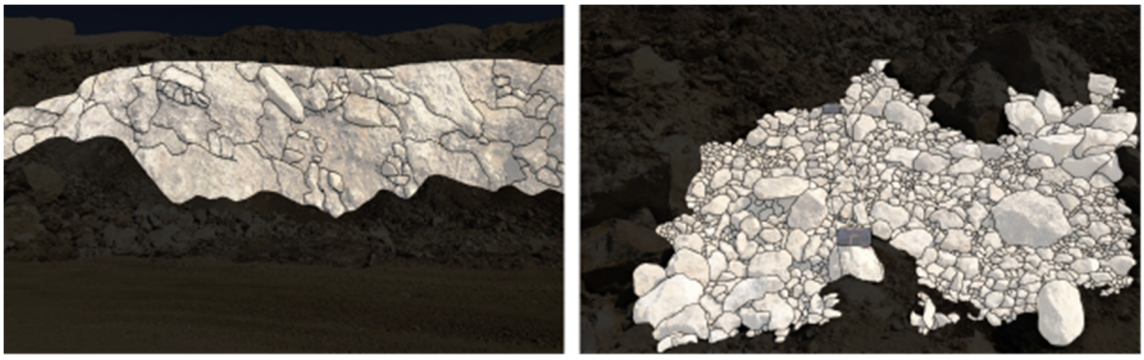
Çizelge 3. Patlatma kaynaklı titreşim ve hava şoku değerlerinin temsili bir bölümü [31]

Çalışma sahası	Atım	PPV (mm/s)	f (Hz)	AoP (dBL)	R (m)	$SD = R/\sqrt{W}$	$SD = R/\sqrt[3]{\sqrt{W}}$
1	2	5.72	27.61	142.1	135.03	25.23	25.23
		27.8	46.5	142.3	75.77	14.16	14.16
3	5	1.143	42.67	114.3	300.73	93.90	93.90
		6.32	47.2	143.8	58.64	18.31	18.31
6	10	1.27	24.38	123.6	392.02	68.13	68.13
		2.794	17.07	130.9	268.9	46.73	46.73
		17.1	89.9	132.0	83.36	14.49	14.49
8	12	0.889	24.38	112.8	454.89	126.28	126.28
		45.57	46.55	145.6	35.39	9.82	9.82
9	15	2.286	17.66	108.0	381.61	70.00	70.00

PPV: Maksimum parçacık hızı, f: Frekans, AoP: Hava şoku, R: Ölçüm mesafesi, SD: Ölçekli mesafe, W: Gecikme başına düşen maksimum şarj miktarı

3.3. Kaya Parçalanma Performansı

Parçalanma performansının değerlendirilmesi için, orijinal çalışmalarda [32] fotogrametri yöntemiyle elde edilmiş veriler kullanılmıştır. Bu veri seti, basamak aynalarının ve yığınların temsili kesitlerine ait fotoğraflar üzerinde dijital görüntü işleme teknikleri uygulanması sırasında Split Engineering'in Split Desktop v2.0 programı kullanılarak analiz edilmesi sonucunda belirlenmiş patlatma öncesi yerinde blok boyutlarını (D_{20}, D_{50}, D_{80}, D_{100}) ve patlatma sonrası tane boyutları (P_{20}, P_{50}, P_{80}, P_{100}) içermektedir (Şekil 3).



(a) (b)

Şekil 3. Dijital görüntü işleme yöntemi ile (a) Basamak aynasındaki blok boyutu dağılımının belirlenmesi, (b) Patlatma sonrası oluşan yığının parça boyutu dağılımının belirlenmesi [32]

Parçalanma performansı, kaya boyutu küçültme oranı (F) kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu oran, patlatma sonrası ortalama tane boyutu (P_{50}) ve patlatma öncesi ortalama blok boyutu (D_{50}) ile ilişkili olarak tanımlanmıştır (Eşitlik 4). Daha yüksek kaya boyutu küçültme oranı (F), arttırılmış parçalanma performansını işaret etmektedir.

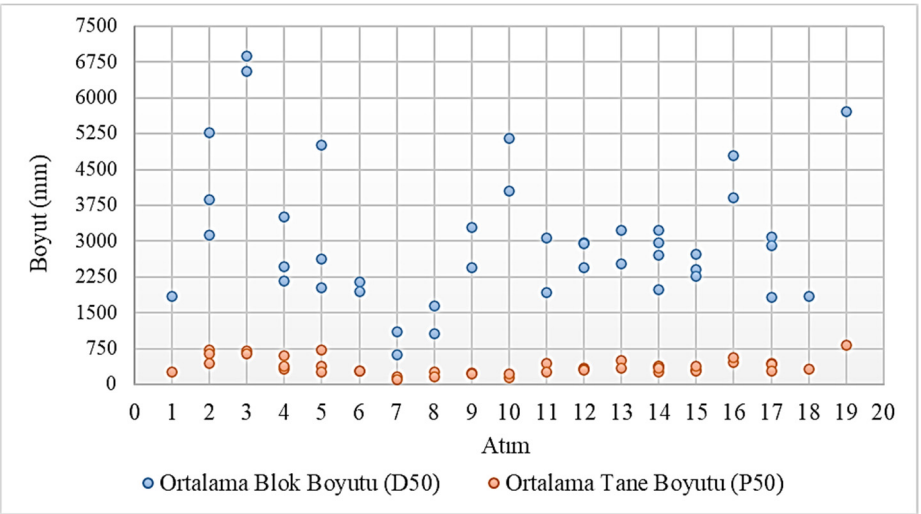
$$F\,(\%) = 100\,x\left(1 - \frac{P_{50}\,(mm)}{D_{50}\,(mm)}\right) \quad (4)$$

Çalışmada elde edilen tüm parçalanma verileri sunulamayacağından, Çizelge 4'te temsili bir veri seti oluşturulmuştur. Bu çizelge, her bir atım için ölçülen parametrelerin ortalama değerlerini içermektedir. Bununla birlikte, her atıma özgü ayrıntılı sonuçlar şekillerde sunulmuştur: Şekil 4, fotogrametri ve dijital

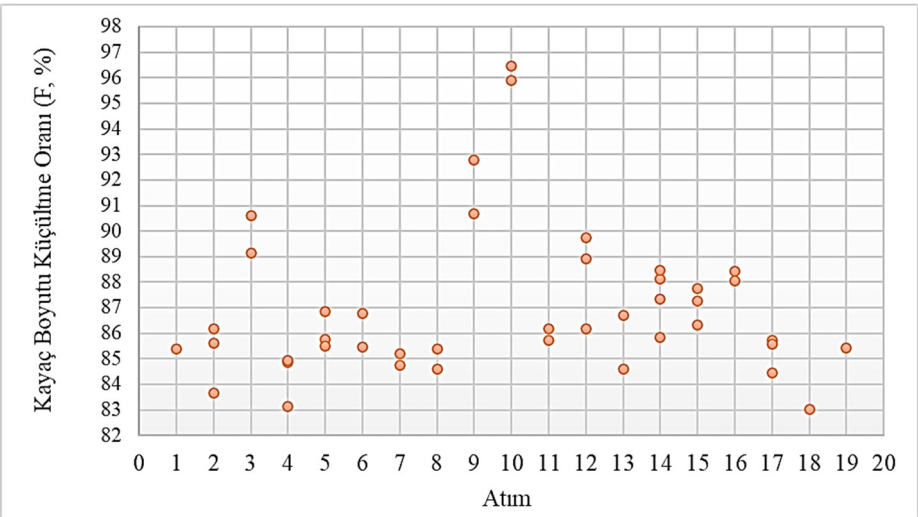
görüntü işleme ile belirlenen ortalama blok (D_{50}) ve tane (P_{50}) boyutlarını; Şekil 5 ise Eşitlik 4'den hesaplanan kaya boyutu küçülme oranlarını göstermektedir.

Çizelge 4. Fotogrametri ve dijital görüntü işleme yöntemi ile belirlenen ortalama blok ve tane boyutu verilerinin temsili bir bölümü [32]

Çalışma sahası	Atım	Bölge	D_{20} (mm)	D_{50} (mm)	D_{80} (mm)	D_{100} (mm)	P_{20} (mm)	P_{50} (mm)	P_{80} (mm)	P_{100} (mm)	F (%)
1	2	Sol	3170	5269	9012	11761	358	729	1204	1800	86.17
		Orta	2389	3875	5476	8445	341	634	955	1442	83.65
		Sağ	2014	3125	5344	6295	218	450	1157	1625	85.60
3	5	Sol	1814	2634	4383	5348	182	375	627	961	85.76
		Orta	1199	2032	3221	4379	161	267	389	633	86.84
		Sağ	3039	5017	7285	10475	453	728	1008	1457	85.49
6	10	Sol	2355	4043	5764	8511	90	143	209	330	96.47
		Sağ	3003	5143	7257	11054	118	212	367	644	95.88
8	12	Sol	1509	2452	3681	4952	205	339	545	892	86.19
		Orta	1921	2971	4902	6386	179	329	514	842	88.93
		Sağ	2105	2950	4376	6219	150	303	464	666	89.74
9	15	Sol	1840	2410	4066	5535	154	307	548	923	87.26
		Orta	1409	2256	3533	4639	154	276	421	717	87.75
		Sağ	1974	2732	4314	5804	184	373	577	814	86.33



Şekil 4. Farklı çalışma sahaları ve atımlar için patlatma öncesi ortalama blok boyutu (D_{50}) ve patlatma sonrası ortalama tane boyutu (P_{50}) dağılımı



Şekil 5. Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanan kaya boyutu küçültme oranları (F%)

Çalışma, tüm patlatmalarda %83.02 ile %96.47 arasında değişen ve ortalama %86.76 olan yüksek parçalanma değerlerine ulaşmıştır. Bu sonuçlar, tutarlı bir şekilde etkili bir boyut küçültme sağlandığını, hatta bazı patlatmalarda neredeyse tamamen parçalanmaya (%96.47) yaklaşıldığını göstermektedir.

4. BULGULAR

4.1. Gaz Kaçağı Kontrolü ve Sıkılama Direnci

Araştırmaya konu olan 19 atımda kullanılan sıkılama malzemesi, sıkılama oranı ve gaz kaçağı ilişkisi incelendiğinde, her ne kadar gaz kaçağının tamamen önlemenin mümkün olmadığı bilinse de, kullanılan malzeme türü ve sıkılama oranına bağlı olarak kaçak miktarının önemli ölçüde kontrol altına alınabildiği görülmüştür.



(a) (b) (c) (d)

Şekil 6. Patlatma sırasında **(a)** Atım 2'de, **(b)** Atım 6'da ve **(c)** Atım 12'de gözlemlenen delik ağzından gaz püskürmesi ile **(d)** Atım 4'te delik ağzından gaz kaçışının kontrol altına alınması



(a) (b) (c) (d)

Şekil 7. Patlatma sırasında **(a)** Atım 7'de ve **(b)** Atım 8'de gözlemlenen delik ağzından gaz püskürmesi, **(c)** Atım 12'de ve **(d)** Atım 14'te delik ağzından gaz kaçışının kontrol altına alınması

4.2. Parçalanma Performansı ve Enerji Verimliliği

Verilerin karşılaştırmalı analizi, taş tozu-mıcır karışımının üstünlüğünün sadece genel bir eğilim olmadığını, aynı zamanda spesifik atım karşılaştırmalarında belirgin ve çarpıcı farklar şeklinde ortaya çıktığını göstermiştir.

Taş tozu-mıcır karışımının temel avantajı, patlayıcı enerjisini delik içinde etkin şekilde hapsetmesidir. Bu sayede aynı parçalanma düzeyine daha düşük özgül şarjla ulaşılabilmektedir. Bu durum enerji verimliliği sağlamaktadır. Bu durum, Atım 1 ve Atım 2 karşılaştırmasında somut bir şekilde gözlemlenmektedir. Benzer kaya dayanımı (TEBD: 89.3 MPa) ve benzer delik çapına sahip olmalarına rağmen, taş tozu-mıcır karışımı kullanılan Atım 1'de özgül şarj 0.31 kg/m³ iken, yalnızca taş tozu kullanılan Atım 2'de bu değer %35 daha yüksek olarak 0.42 kg/m³ seviyesindedir. Buna karşın, küçültme oranları sırasıyla %85.38 ve %86.17 olarak ölçülmüş, kullanılan enerji miktarındaki bu belirgin farka rağmen parçalanma performansında yalnızca %0.79'luk marjinal bir fark oluşmuştur. Bu bulgu, taş tozu-mıcır karışımının patlayıcı enerjisini kaya kırma işleminde kullanma verimliliğinin önemli bir göstergesidir. Taş tozu ile sıkılamada ise benzer bir performans seviyesine ulaşmak için daha fazla özgül şarj kullanma gerekliliği doğmakta, bu durum ekonomik kayıpların yanı sıra artan iş yükü ve makine aşınması gibi problemleri de de beraberinde getirmektedir.

Söz konusu enerji verimliliği, farklı koşullar altında gerçekleştirilen Atım 5 ve Atım 11 karşılaştırmasında da teyit edilmektedir. Taş tozu ile sıkılanan Atım 5'te (TEBD=70.8 MPa, Özgül Şarj=0.39 kg/m³) küçültme oranı %86.84 olarak ölçülmüştür. Buna karşılık, taş tozu-mıcır karışımı uygulanan Atım 11, hem daha yüksek kaya dayanımına (TEBD=75.7 MPa) hem de %25 daha yüksek özgül şarja (0.49 kg/m³) rağmen,

benzer bir küçültme oranı (%86.16) elde etmiştir. Bu sonuç, taş tozu-mıcır karışımı, artan kaya mukavemeti gibi zorlu koşulları dengeleyebilme kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Taş tozu-mıcır karışımı, özellikle düşük kaya direnci ile yüksek enerjili patlayıcıların bir arada bulunduğu durumlarda, performansı sinerjik bir şekilde artıran bir katalizör işlevi görmektedir. Bu etki, Atım 9 ve Atım 10'da belirgin olarak görülmektedir. Düşük dayanımlı kaya (TEBD=47.6 MPa) ve yüksek özgül şarj (0.52 kg/m³) ile gerçekleştirilen ve taş tozu-mıcır karışımının kullanıldığı Atım 9'da, %92.80 gibi olağanüstü bir küçültme oranına ulaşılmıştır. Atım 10'da ise bu sinerji bir üst seviyeye taşınmış; daha düşük TEBD (42.5 MPa), daha yüksek enerjili bir patlayıcı (emülsiyon) ve çok yüksek özgül şarj (0.61 kg/m³), taş tozu-mıcır karışımı ile birleşerek veri setindeki en yüksek küçültme oranı olan %96.47'yi üretmiştir. Kritik nokta, taş tozu-mıcır karışımının, yüksek detonasyon basıncına sahip patlayıcıların ürettiği aşırı gaz yükünü karşılayabilecek mekanik dayanım ve sızdırmazlığı sağlayan tek mekanizma olmasıdır. Geleneksel taş tozu kullanılması durumunda, bu yüksek enerjinin önemli bir kısmı sıkılama malzemesinin delikten fırlamasıyla heba olacak ve benzer bir performans elde edilemeyecektir.

Taş tozu-mıcır karışımı, yalnızca ideal senaryolarda değil, geniş bir parametre yelpazesinde daha tutarlı ve güçlü bir performans sergilemektedir. Örneğin, taş tozu ile sıkılanan Atım 6'da, aynı TEBD (70.8 MPa) ve özgül şarj (0.36 kg/m³) değerlerine rağmen küçültme oranları %85.46 ile %86.79 arasında değişkenlik göstermiştir. Buna karşın, taş tozu-mıcır karışımı uygulanan Atım 13-17 serisinde, 130 MPa gibi çok yüksek ve sabit bir TEBD değeri ile farklı özgül şarj ve sıkılama oranlarına rağmen, küçültme oranları oldukça dar ve tutarlı bir aralıkta (%84.5-88.5) kümelenmiştir. Bu karşılaştırma, taş tozu-mıcır karışımının kaya koşulları ve tasarım parametrelerindeki değişkenlere karşı daha dayanıklı olduğunu ve sonuçların daha öngörülebilir olduğunu kanıtlamaktadır.

Saha verilerinin detaylı analizi, taş tozu-mıcır karışımının iki temel üstünlüğünü ortaya koymaktadır. İlki enerji verimliliği olup, aynı parçalanma performansının daha düşük özgül şarj ile elde edilmesini sağlayarak, doğrudan patlayıcı maliyetlerinde tasarruf ve çevresel etkilerin azaltılmasına olanak tanır. İkincisi ise performans sinerjisi ve gürbüzlüktür. Özellikle düşük kaya dayanımı ile yüksek enerjili patlayıcıların birlikte kullanıldığı durumlarda olağanüstü yüksek küçültme oranlarına ulaşılmasını mümkün kılar. Aynı zamanda, değişken saha koşullarında daha tutarlı ve güvenilir bir performans sunar.

Ayrıca, taş tozu-mıcır karışımının mekanik mukavemeti ve geçirimsizliği, daha kısa sıkılama boylarında dahi yeterli enerji hapsetmesi sağlayabilmektedir. Veriler, taş tozu-mıcır karışımı kullanılan birçok atımda (örneğin Atım 1 ve Atım 9'da sırasıyla %0.28 ve %0.25 gibi düşük sıkılama oranları) yüksek performans elde edildiğini göstermektedir. Mühendislik perspektifinden bu durum, daha az malzeme kullanımıyla maliyet avantajı ve daha kısa deliklerde dahi operasyonel esneklik anlamına gelmektedir.

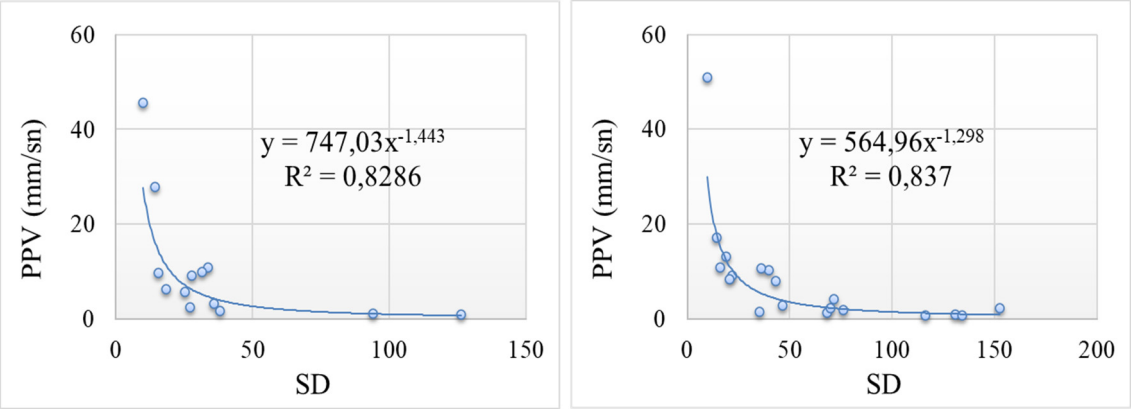
Sonuç olarak, önce mıcır ve ardından taş tozu ile boşluk doldurma prensibine dayalı taş tozu-mıcır karışımı, yalnızca taş tozu kullanımına kıyasla kaya küçültme oranı üzerinde belirgin bir üstünlüğe sahiptir. Bu üstünlüğün temel nedeni, taş tozu-mıcır karışımının ağladığı üstün enerji hapsetme verimliliğidir. Mıcır iskeleti mekanik direnç sağlarken, taş tozu dolgu ise geçirimsizliği artırarak gaz kaçağını minimize etmekte ve böylece patlayıcı enerjisinin kaya kırma işinde kullanılma oranını maksimize etmektedir. Bu yöntem, özellikle yüksek performanslı patlayıcıların kullanıldığı, zorlu kaya koşullarının bulunduğu veya özgül şarjın optimize edilmeye çalışıldığı durumlarda vazgeçilmez bir tasarım bileşeni olarak değerlendirilmelidir.

4.3. Titreşim Yayılımı Üzerine Etkiler

Sıkılama malzemesinin parçalanma performansı üzerindeki etkisi incelendikten sonra, bir diğer kritik performans göstergesi olan patlatma kaynaklı titreşim etkileri analiz edilmiştir.

Saha özgün titreşim yayılım trendini belirlemek ve parçacık hızını tahmin etmek amacıyla, gecikme başına düşen maksimum patlayıcı madde miktarı (W) ile ölçüm noktasına olan mesafenin (R) dikkate alındığı ölçekli mesafe ($SD=R/W^{0.5}$) parametresi kullanılmıştır. Kaydedilen maksimum parçacık hızları ile ölçekli mesafe değerleri arasındaki ilişki regresyon analizi ile incelenmiş ve her bir sıkılama malzemesi (taş tozu ve taş tozu-mıcır karışımı) için ayrı ayrı olmak üzere, parçacık hızı tahmininde kullanılmak üzere iki farklı formül ve saha sabiti türetilmiştir (Şekil 8).

Bölgede titreşim ölçer kullanılmadığı durumlarda; taş tozu ile sıkılama yapılan herhangi bir atımdaki gecikme başına kullanılan belirli miktardaki bir patlayıcı maddenin yaratacağı titreşimin hızının belirli bir uzaklıktaki değerinin ne olacağını tahmin etmek için $PPV=747.93 \times SD^{-1.441}$ ($R^2=0.823$), taş tozu-mıcır karışımı ile sıkılama yapılan herhangi bir atım için ise $PPV=564.96 \times SD^{-1.298}$ ($R^2=0.837$) formülleri kullanılabilecektir.



(a) (b)

Şekil 8. (a) Taş tozu ile **(b)** Taş tozu-mıcır karışımı ile sıkılama yapılan atımlarda kaydedilen maksimum parçacık boyutu (PPV, mm/sn) ile ölçekli mesafe (SD) ilişkisi

Elde edilen regresyon modelleri, sıkılama malzemesinin maksimum parçacık hızı-ölçekli mesafe ilişkisi üzerinde belirgin ve mesafeye bağlı bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Taş tozu için türetilen denklemdeki daha yüksek k sabiti (747.93), taş tozu-mıcır karışımınınkine (564.96) kıyasla, genel olarak aynı ölçekli mesafe değeri için daha yüksek titreşim seviyeleri üretildiğini işaret etmektedir. Ancak, bu ilişkinin dinamik doğası, mesafe aralığına göre değişkenlik göstermektedir (Çizelge 5).

Çizelge 5. Farklı sıkılama malzemelerinin titreşim değerlerine mesafe ile etkisi.

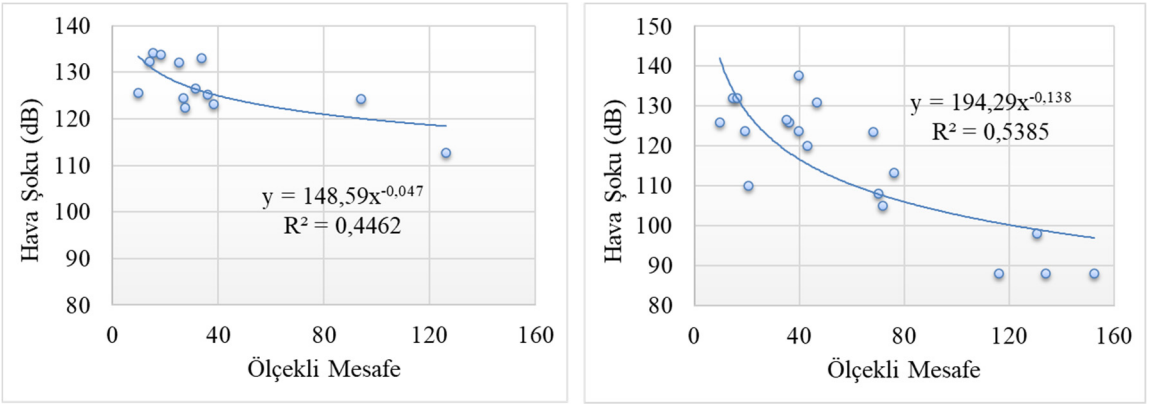
R (m)	W (kg)	Sıkılama malzemesi		W (kg)	Sıkılama malzemesi		W (kg)	Sıkılama malzemesi	
		Taş tozu	Karışım		Taş tozu	Karışım		Taş tozu	Karışım
10		350.25	285.84		453.05	360.29		747.03	564.96
20		128.82	116.25		166.63	146.53		274.76	229.76
30		71.76	68.68		92.82	86.57		153.06	135.74
40		47.38	47.28		61.29	59.59		101.06	93.44
50		34.34	35.39		44.42	44.61		73.24	69.94
60		26.39	27.93		34.14	35.21		56.29	55.20
70	35	21.13	22.87	50	27.33	28.82	100	45.07	45.19
80		17.43	19.23		22.54	24.23		37.17	38.00
90		14.70	16.50		19.02	20.80		31.36	32.61
100		12.63	14.39		16.34	18.14		26.94	28.45
200		4.65	5.85		6.01	7.38		9.91	11.57
300		2.59	3.46		2.59	3.46		5.52	6.83
400		1.71	2.38		1.71	2.38		3.64	4.70
500		1.24	1.78		1.24	1.78		2.64	3.52

Yapılan analizler, yaklaşık 60-70 metreye kadar olan nispeten yakın mesafelerde, aynı ölçekli mesafe için taş tozu ile sıkılamanın, taş tozu-mıcır karışımına göre daha yüksek maksimum parçacık hızı değerlerine neden olduğunu açıkça göstermiştir. Bu durum, taş tozunun sahip olduğu yüksek k sabitinin, yakın mesafelerdeki titreşim tepkisine baskın şekilde hâkim olmasıyla açıklanabilir. Bununla birlikte, daha yüksek mesafelerde (yaklaşık 70 metrenin üzeri ve dolayısıyla daha yüksek ölçekli mesafe değerleri) bu ilişki tersine dönmekte ve aynı ölçekli mesafe değeri için taş tozu-mıcır karışımı ile yapılan sıkılama, taş tozundan daha yüksek maksimum parçacık hızı tahminleri üretmektedir. Bu davranış, taş tozuna ait daha yüksek β üssünün (-1.441) bir sonucudur. Daha dik olan β eğimi, taş tozunun neden olduğu titreşim şiddetinin mesafe ile çok daha hızlı azalmasına yol açarken; taş tozu-mıcır karışımının daha sığ eğime sahip β üssü (-1.298), titreşimdeki azalma hızının daha düşük olmasına ve belirli bir ölçekli mesafe eşiğinden sonra taş tozu-mıcır karışımının mutlak maksimum parçacık hızı değerinin taş tozunu geçmesine neden olmaktadır.

Bu davranış farklılığı, sıkılamanın temel işlevi düşünüldüğünde anlaşılabilir: yüksek basınçlı patlayıcı gazları, kaya kırımı ve parçalanmayı sağlayacak süre boyunca delik içinde hapsetmek. Taş tozu-mıcır karışımı malzemesi, bu gazları taş tozuna kıyasla çok daha uzun süre ve etkin biçimde tutabilmektedir. Gazların daha uzun süre hapsedilmesi, patlatma enerjisinin delik ağzından atmosfere kaçarak hava şokuna dönüşen kısmını azaltırken, enerjinin çok daha büyük ve verimli bir bölümünün kaya içinde sismik enerjiye (titreşim) dönüşerek yayılmasına olanak tanır. Taş tozu-mıcır karışımının yüksek enerji verimliliği, titreşim enerjisinin uzak mesafelere daha etkin iletilmesini sağlar. Sonuç olarak, taş tozu-mıcır karışımı yakın mesafelerde titreşim kontrolünde daha etkili performans gösterirken, enerjinin kaya kırımına daha fazla kanalize edilmesi, titreşim enerjisinin daha verimli açığa çıkmasına ve dolayısıyla uzak mesafelerde ölçülen parçacık hızı değerlerinin taş tozuna kıyasla daha yüksek olmasıyla sonuçlanmaktadır.

4.4. Hava Şoku Davranışı

Hava şoku değerlerinin ölçekli mesafe ile ilişkisi incelendiğinde, her iki sıkılama malzemesi için de belirgin farklılıklar gözlemlenmektedir. Her iki malzeme için de mesafe arttıkça hava şoku seviyelerinde genel bir azalma eğilimi gözlenmekle birlikte, bu azalmanın eğilim sıkılama malzemesine göre farklılık göstermektedir. Taş tozu ile sıkılamada hava şokunun ölçekli mesafe ile daha hızlı azalma eğiliminde olduğu, buna karşılık taş tozu-mıcır karışımındaki azalma eğiminin daha yumuşak olduğu tespit edilmiştir (Şekil 9).



(a) (b)

Şekil 9. (a) Taş tozu ile **(b)** Taş tozu-mıcır karışımı ile sıkılama yapılan atımlarda kaydedilen hava şoku (AoP, dB) ile ölçekli mesafe (SD) ilişkisi

Regresyon analizleri önemli bir bulgu ortaya koymuştur: Taş tozu-mıcır karışımı ile yapılan sıkılamada, hava şoku ile ölçekli mesafe arasındaki ilişkinin determinasyon katsayısı ($R^2 = 0.539$), taş tozu için olan değerden ($R^2 = 0.446$) belirgin şekilde daha yüksektir. Bu, taş tozu-mıcır karışımı kullanıldığında hava şoku değerlerinin ölçekli mesafe ile çok daha tutarlı ve öngörülebilir bir ilişki sergilediğini kanıtlamaktadır.

Ancak hava şokunun yayılım dinamikleri, titreşimden farklı olarak çok daha karmaşık bir yapı sergilemektedir. Hava şokunun şiddeti ve yayılımı, yalnızca ölçekli mesafenin bileşenleri olan mesafe ve patlayıcı şarj miktarı ile sınırlı kalmamakta; atmosferik basınç, sıcaklık, nem, rüzgâr hızı ve yönü gibi meteorolojik koşulların yanı sıra, arazinin topoğrafik yapısı ve geometrisi gibi pek çok parametreden doğrudan etkilenmektedir. Bu çok değişkenli ve doğrusal olmayan ilişki ağı, hava şokunun titreşime kıyasla modellenmesi ve tahmin edilmesini oldukça güçleştirmektedir. Her iki malzeme için de hava şoku ile ölçekli mesafe arasında gözlemlenen nispeten düşük korelasyon katsayılarının temel nedeni de bu çok faktörlü ve dinamik doğada yatmaktadır. Buna rağmen, taş tozu-mıcır karışımının daha yüksek korelasyon değeri, bu malzemenin hava şoku üzerindeki kontrol edilebilirliğinin daha iyi olduğuna işaret etmektedir. Taş tozu ile sıkılamada düşük ölçekli mesafe değerlerinde (9.82-38.17 aralığı) hava şoku seviyeleri 122.4-134.1 dBL gibi nispeten yüksek değerlerde seyrederken, taş tozu-mıcır karışımı kullanılan atımlarda aynı ölçekli mesafe aralığında hava şoku seviyelerinin 123.6-137.8 dBL arasında değiştiği, ancak daha geniş bir dağılım gösterdiği tespit edilmiştir.

Yüksek ölçekli mesafe değerlerinde (70 ve üzeri) her iki malzeme için de hava şoku seviyelerinde belirgin düşüşler kaydedilmiştir. Taş tozu-mıcır karışımı kullanılan atımlarda bu düşüşün daha belirgin olduğu,

ölçekli mesafe > 100 değerlerinde hava şoku seviyelerinin 88.0-113.4 dBL aralığına kadar indiği görülmüştür. Buna karşılık, taş tozu ile sıkılamada yüksek ölçekli mesafe değerlerinde (93.90-126.28) hava şoku seviyelerinin 112.8-124.3 dBL aralığında kaldığı gözlemlenmiştir.

Bu davranış farklılığının temel nedeni, sıkılama malzemesinin gaz sızdırmazlık özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Taş tozu-mıcır karışımının daha yüksek yoğunluk ve kohezyona sahip olması, patlayıcı gazların delik içerisinde daha uzun süre hapsedilmesini sağlamakta, böylece enerjinin büyük bölümü kaya kırımında kullanılmakta ve atmosfere kaçarak hava şokuna dönüşen enerji miktarı azalmaktadır. Taş tozuun gözenekli yapısı ise gaz sızıntısına daha elverişli olup, enerjinin önemli bir bölümünün delik ağzından atmosfere kaçmasına ve dolayısıyla daha yüksek hava şoku seviyelerine yol açmaktadır.

Özellikle düşük ölçekli mesafe değerlerinde taş tozu-mıcır karışımının sağladığı hava şoku azaltım avantajının daha belirgin olduğu, yüksek ölçekli mesafe değerlerinde ise her iki malzeme için de hava şoku seviyelerinin düştüğü, ancak taş tozu-mıcır karışımının mutlak değerlerdeki avantajını koruduğu tespit edilmiştir.

5. SONUÇ

Bu çalışmanın bulguları, taş tozu-mıcır karışımının, taş tozuna kıyasla sıkılama malzemesi olarak belirgin bir üstünlüğe sahip olduğunu göstermiştir. Trakya bölgesindeki 10 farklı ocaktan elde edilen verilerin ikincil analizi, karışımın gaz sızdırmazlık ve enerji hapsetme verimliliğinin daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur.

Bu çalışmanın kapsamı ve ulaşılan bulguların geçerliliği, araştırılan parametrelerin belirli aralıkları ile sınırlandırılmıştır. İncelenen veri aralıkları, Langefors ve Kihlström [41], Olofsson [42] ve Jimeno ve arkadaşları [43] gibi alanında otorite kabul edilen kaynakların önerdiği patlatma kılavuzlarıyla uyum içerisindedir. Arazi çalışmaları, başlıca kireçtaşı, kumtaşı ve marn birimlerinden oluşan formasyonlarda yürütülmüş olup, bu kayaçların basınç dayanımı 37-186 MPa, yoğunlukları ise 2.44-2.60 t/m³ aralığında değişmektedir. Çalışmada 89, 102 ve 127 mm çaplarındaki delikler kullanılmış; dilim kalınlığı (1.5-4.6 m), delik aralığı (2.2-4.1 m), basamak yüksekliği (4-12 m) ve özgül şarj (0.23-0.76 kg/m³) parametreleri belirtilen aralıklarda değişkenlik göstermiştir. Sıkılama uygulaması ise %17-36 aralığında bir oranla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen bulgular, yukarıda belirtilen tüm parametre aralıkları için geçerli olarak değerlendirilmelidir.

Bulgular, taş tozu-mıcır karışımının gaz sızdırmazlık ve enerji hapsetme açısından taş tozundan belirgin şekilde üstün olduğunu göstermiştir. Bu sayede aynı parçalanma performansı daha düşük özgül şarjla elde edilebilmiştir. Titreşim analizleri, yakın mesafelerde taş tozu-mıcır karışımının daha düşük parçacık hızları ürettiğini, ancak enerjinin kaya içinde daha verimli kullanılması nedeniyle uzak mesafelerde titreşim değerlerinin daha yavaş azaldığını ortaya koymuştur. Hava şoku değerlerinin ise taş tozu-mıcır karışımı kullanıldığında ölçekli mesafe ile daha tutarlı ve öngörülebilir bir ilişki sergilediği belirlenmiştir.

Elde edilen bulgular ışığında, optimum patlatma verimliliği, düşük maliyet ve minimize edilmiş çevresel etki hedefleri doğrultusunda, sıkılama uygulamasında taş tozu-mıcır karışımının standart bir prosedür olarak benimsenmesi önerilmektedir.

Gelecek çalışmalar için, bu çalışmanın bulgularını daha da genellemek amacıyla, farklı kaya türlerinde, daha geniş bir veri yelpazesi üzerinde çalışılması önerilir. Ayrıca, optimal taş tozu-mıcır karışım oranlarının belirlenmesine yönelik detaylı araştırmalar yapılabilir. Hava şoku modellemesini iyileştirmek için meteorolojik ve topoğrafik faktörlerin daha detaylı dikkate alındığı, daha geniş bir veri seti üzerinden ileri istatistiksel modellemelerin yapılması faydalı olacaktır.

6. TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın saha çalışmaları, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından finansal olarak desteklenmiştir.

Yazar, bu araştırmanın gerçekleştirilmesinde sağladığı finansal destek için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) içten şükranlarını sunar. Çalışmanın saha aşamasındaki değerli katkılar

için ayrıca; Ento Maden İnşaat Sanayi & Ticaret Ltd. Şti.'nden Sayın Abdulkadir ARSLAN'a saha çalışmalarındaki desteği için, Tessan Maden İnşaat Sanayi Turizm Ve Ticaret Anonim Şirketi'nden Sayın Hilal Erem MUTLU ve Erdemir Maden Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den Sayın Taki Can ODABAŞI'na saha çalışmaları ve verilerin birincil değerlendirilmesindeki özverili katılımları için, NITRONET Patlayıcı Madde Ticaret Ltd. Şti. Trakya Bölge Sorumlusu Sayın Ünal GÜNDÜZ ve Nobel Patlayıcı Sanayi A.Ş. Marmara Bölge Sorumlu Yardımcısı Sayın Cevdet Burkay ZAİF'e ise çalışma sahalarına erişim ve gerekli izinlerin sağlanmasındaki destekleri için müteşekkir olduğunu belirtir.

7. KAYNAKLAR

1. Kalaycı Şahinoğlu, Ü. (2024). Patlatma sonucu meydana gelen hava şoku ve partikül madde yayılımı arasındaki ilişkinin araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39*(3), 831-837.
2. Kadem, B. ve Karadoğan, A. (2025). Basamak patlatma tasarımı ve analizi yapabilen bir mobil uygulama yazılımının geliştirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40*(3), 725-741.
3. Shi, X., Zhang, Z., Qiu, X. & Luo, Z. (2023). Experiment study of stemming length and stemming material impact on rock fragmentation and dynamic strain. *Sustainability, 15*, 13024.
4. Peng, J., Zhang, F., Du, C. & Yang, X. (2020). Effects of confining pressure on crater blasting in rock-like materials under electric explosion load. *International Journal of Impact Engineering, 139*, 103534.
5. Sanchidrián, J.A., Segarra, P. & López, L.M. (2007). Energy components in rock blasting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 44*, 130-147.
6. Ouchterlony, F., Nyberg, U., Olsson, M., Bergqvist, I., Granlund, L. & Grind, H. (2004). Where does the explosive energy in rock blasting rounds go? *Science and Technology of Energetic Materials, 65*, 53-64.
7. Cevizci, H. (2010). Açık ocak patlatmalarında sıkılama parametresinin patlatma verimliliğine etkisi. *Yüksek lisans tezi.* Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
8. Boshoff, D. & Webber-Youngman, R.C.W. (2011). Testing stemming performance, possible or not? *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 111*, 871-874.
9. Snelling, W. & Hall, C. (1912). The effects of stemming on the efficiency of explosives. *USBM-TP, 17*, 1-20.
10. Choudhary, B.S. & Agrawal, A. (2022). Minimization of blast-induced hazards and efficient utilization of blast energy by implementing a novel stemming plug system for eco-friendly blasting in open pit mines. *Natural Resources Research, 31*, 3393-3410.
11. Sari, M., Ghasemi, E. & Ataei, M. (2014). Stochastic modeling approach for the evaluation of backbreak due to blasting operations in open pit mines. *Rock Mechanics and Rock Engineering, 47*, 771-783.
12. Zhang, Z., Hou, D., Guo, Z. & He, Z. (2020). Laboratory experiment of stemming impact on rock fragmentation by a high explosive. *Tunnelling and Underground Space Technology, 97*, 103257.
13. Fourney, W.L., Barker, D.B. & Holloway, D.C. (1981). Model studies of explosive well stimulation techniques. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 18*, 113-127.
14. Choudhary, B.S. & Rai, P. (2013). Stemming plug and its effect on fragmentation and muckpile shape parameters. *International Journal of Mining and Mineral Engineering, 4*, 296-311.
15. Prasad, S., Choudhary, B.S. & Mishra, A.K. (2017). Effect of stemming to burden ratio and powder factor on blast induced rock fragmentation-A case study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 225*, 012191.
16. Shahrin, M.I., Abdullah, R.A., Jeon, S., Jeon, B., Sa'ari, R. & Alel, M.N.A. (2019). Numerical simulation on the effect of stemming to burden ratio on rock fragmentation by blasting. In *Proceedings of the International Symposium on Rock Engineering for Innovative Future*, Okinawa, Japan, 1-4.
17. Chen, M., Ye, Z., Wei, D., Lu, W. & Yan, P. (2021). The movement process and length optimization of deep-hole blasting stemming structure. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 146*, 104836.
18. Cevizci, H. & Özkahraman, H.T. (2012). The effect of blast hole stemming length to rockpile fragmentation at limestone quarries. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 53*, 32-35.
19. Mpofu, M., Ngobese, S., Maphalala, B., Roberts, D. & Khan, S. (2021). The influence of stemming practice on ground vibration and air blast. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 121*, 1-10.

20. Oates, T.E. & Spiteri, W. (2021). Stemming and best practice in the mining industry: A literature review. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 121*, 1-11.
21. Cevizci, H. (2012). A newly developed plaster stemming method for blasting. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 112*(8), 1071-1078.
22. Kojovic, T. (2005). Influence of aggregate stemming in blasting on the SAG mill performance. *Minerals Engineering, 18*, 1398-1404.
23. Cevizci, H. (2013). A new stemming application for blasting: A case study. *Rem: Revista Escola de Minas, 66*(4), 513-519.
24. Cevizci, H. (2014). Fragmentation, cost and environmental effects of plaster stemming method for blasting at a basalt quarry. *Archives of Mining Sciences, 59*, 835-846.
25. Cevizci, H. (2019). Comparison of the efficiency of plaster stemming and drill cuttings stemming by numerical simulation. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 119*, 465-470.
26. Cevizci, H. & Sürücüoğlu, H. (2021). Alçı sıkılama yöntemi için arazide uygulama kolaylığının araştırılması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 25*(1), 36-43.
27. Sharma, S.K. & Rai, P. (2015). Investigation of crushed aggregate as stemming material in bench blasting: A case study. *Geotechnical and Geological Engineering, 33*, 1449-1463.
28. Zhang, Z., Qiao, Y., Chi, L. & Hou, D. (2021). Experimental study of rock fragmentation under different stemming conditions in model blasting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 143*, 104797.
29. Zhang, Z. (2016). *Rock fracture and blasting: Theory and applications*. Butterworth-Heinemann/Elsevier, Oxford, UK.
30. Zhang, Z., Gong, F., Kozlovskaya, E. & Aladejare, A. (2023). Characteristic impedance and its applications to rock and mining engineering. *Rock Mechanics and Rock Engineering, 56*, 3139-3158.
31. Arslan, A., Mutlu, H.E., Odabaşı, T.C. ve Özyurt, M.C. (2024). *Trakya Bölgesinde gerçekleştirilen patlatmalı kazı çalışmalarının verimlilik açısından değerlendirilmesi.* TÜBİTAK 2209A Projesi.
32. Ozyurt, M.C., Karadogan, A., Kalayci Sahinoglu, U., Ozer, U., Mutlu, H.E. & Odabasi, T.C. (2025). Establishment of a novel fragmentation prediction model incorporating rock's response time to blasting. *Applied Sciences, 15*, 9447.
33. Yurtsever, A. (1996). *1/200.000 scale exploratory Thrace geological map promotion report.* MTA Genel Müdürlüğü, İstanbul.
34. Guler, O. & İskân, B. (2021). *Kırklareli province – Vize district – Evrencik village, TRAÇİM Çimento San. ve Tic. A.Ş. Vize Cement Factory geological and hydrogeological research of mining license areas (IR 64145, IR 20062296, IR 20062297, IR 20062298) and their surroundings* (Teknik Rapor).
35. Keskin, C. (1971). Geology of the Pınarhisar area. *Türkiye Jeoloji Bülteni, 14*(1), 31-83.
36. Uçankuş, T., Koyuncu, F.T., Göveli, A., Büyüktanir, S.A., Taştan, F. ve Dursun, K. (2014). *Limak Batı Çimento San. ve Tic. A.Ş. kalker ocağı, ruhsat no: 200901722, nihai ÇED raporu*. Ankatek Çevre Mad. Mühendislik Ltd. Şti., Ankara.
37. Atalık, E. (1987). *Thrace Basin Soğucak Formation sedimentary environments and microfacies analysis* (Yayımlanmamış teknik rapor No: 2305). TPAO Arama Grubu Arşivi.
38. Atalık, E. (1992). Depositional systems of the Osmancık Formation in the Thrace basin. *Doktora tezi.* Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
39. Celikkurt, K.C. (2020). *The sedimentology of coal and uranium bearing sequences in the Saray and Vize area. Yüksek lisans tezi.* İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
40. Uz, B. (2007). *Study and evaluation report of the geological/structural, mineralogical-petrographical and physico-mechanical properties of the crushed stone quarry of Akdağlar Madencilik A.Ş. located in Ayazağa Village Cendere Locality*. İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
41. Langefors, U. & Kihlström, B. (1962). *The modern technique of rock blasting* (2nd ed.). John Wiley & Sons, New York.
42. Olofsson, S.O. (1988). *Applied explosives technology for construction and mining* (2nd ed.). Applex, Arla, Sweden.
43. Jimeno, C.L., Jimeno, E.L. & Carcedo, F.J.A. (1995). *Drilling and blasting of rock*. A.A. Balkema, Rotterdam.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 1 MART/MARCH 2026

Accurate Frequency Control of Energy Storage Systems with a Symbolic Game Theory Approach

Mehmet KURUCAN [1,a]

[1]*Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Faculty of Computer and Informatics, Department of Computer Engineering, Adana, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0003-4359-3726*

Article Info
Received : 31.01.2026
Accepted : 19.02.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1878644

Corresponding Author
Mehmet KURUCAN
mkurucan@atu.edu.tr

Keywords
Proportional integral derivative (PID)
Energy storage system
Symbolic control
Model predictive control
Formal methods

***How to cite:** KURUCAN, M., (2026). Accurate Frequency Control of Energy Storage Systems with a Symbolic Game Theory Approach. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(1), 195-212.*

ABSTRACT

The increasing influence of renewable energy sources leads to reduced system inertia, making power grids highly vulnerable to frequency deviations and stochastic disturbances. Traditional control methods rely on linearized models and cannot mathematically guarantee safety constraints under extreme conditions, potentially leading to battery saturation and system interruptions. In this paper, a correct-by-construction control framework for Energy Storage Systems is proposed using Symbolic Discrete Controller Synthesis. A controller that strictly enforces hard constraints on both grid frequency and battery State of Charge (SoC) is synthesised by modeling the frequency regulation problem as a safety game on a finite state abstraction. Comparative benchmarks demonstrate that while standard dead-band and droop control cause battery overcharge and service unavailability during worst-case volatility events, the symbolic controller guarantees 100% safety and continuous operation by maintaining the system strictly within designated bounds (i.e., $0.2 \leq SoC \leq 0.9$) without requiring complex runtime optimization.

Sembolik Oyun Teorisi Yaklaşımı ile Enerji Depolama Sistemlerinin Doğru Frekans Kontrolü

Makale Bilgileri
Geliş : 31.01.2026
Kabul : 19.02.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1878644

Sorumlu Yazar
Mehmet KURUCAN
mkurucan@atu.edu.tr

Anahtar Kelimeler
Oransal integral türevsel
Enerji depolama sistemleri
Sembolik kontrol
Model tahminli kontrol
Biçimsel yöntemler

***Atıf şekli:** KURUCAN, M., (2026). Sembolik Oyun Teorisi Yaklaşımı ile Enerji Depolama Sistemlerinin Doğru Frekans Kontrolü. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(1), 195-212.*

ÖZ

Yenilenebilir enerji kaynaklarının artan etkisi, sistem ataletinin azalmasına yol açarak güç şebekelerini frekans sapmalarına ve stokastik bozulmalara karşı oldukça savunmasız hale getirmektedir. Geleneksel kontrol yöntemleri doğrusallaştırılmış modellere dayanmaktadır; bu yöntemler aşırı koşullar altında güvenlik kısıtlarını matematiksel olarak garanti edemez, bu da potansiyel olarak batarya doygunluğuna ve sistem kesintilerine yol açabilir. Bu makalede, Enerji Depolama Sistemleri için Sembolik Ayrık Kontrolör Sentezi kullanılarak yapılandırma itibarıyla doğru bir kontrol çerçevesi önerilmektedir. Frekans düzenleme problemini sonlu durum soyutlaması üzerinde bir güvenlik oyunu olarak modelleyerek, hem şebeke frekansı hem de batarya Şarj Durumu (SoC) üzerinde sert kısıtları kesin olarak uygulayan bir kontrolör sentezlenmiştir. Karşılaştırmalı kıyaslamalar; standart ölü bant ve droop kontrolünün en kötü durum volatalite olayları sırasında bataryanın aşırı şarj olmasına ve hizmet dışı kalmasına neden olduğunu, buna karşın sembolik kontrolörün sistemi kesin olarak belirlenmiş sınırlar içinde (yani $0.2 \leq SoC \leq 0.9$) tutarak karmaşık çalışma zamanı optimizasyonuna gerek duymadan %100 güvenlik ve kesintisiz çalışma sağladığını göstermektedir.

1. INTRODUCTION

A radical shift is taking place in the global energy infrastructure, moving from conventional fossil fuel-based production to Renewable Energy Sources (RES). The increasing penetration of wind and solar energy into the grid presents challenges in terms of power system operation and stability. The maintenance of the rotational mass inertia provided by traditional synchronous generators through power electronics-based converters reduces the total moment of inertia of the system to critical levels. The low-inertia structure of this new grid is extremely vulnerable to sudden load changes and power fluctuations arising from the stochastic nature of renewable resources. Including clean energy into the grid is presented as a positive development to reduce carbon emissions and combat climate change; however, the use of RES causes very rapid changes in grid frequency dynamics and threatens system stability.

In such volatile environments, Energy Storage Systems (ESS) stand out as a crucial solution for ensuring frequency stability due to their fast response times and bidirectional power flow capabilities. In the literature and industrial applications, classical methods such as Droop Control, PID, or Model Predictive Control (MPC) are generally preferred for ESS control. These methods typically focus on minimizing an error function (i.e., optimization-based) or following a specific reference. However, these approaches have a fundamental theoretical deficiency in safety-critical systems: the absence of a mathematical guarantee of safety.

Classical control methods used for ESS cannot guarantee that the system will never exceed its physical limits (e.g., battery SoC limits or critical frequency thresholds). Especially when there is high volatility or significant disturbances in the grid frequency to which the system is connected, these controllers can overshoot and lead to security breaches. For example, a standard Droop controller might attempt to continue charging the battery when the grid frequency is high, causing the battery to exceed its existing physical capacity limit (i.e., SoC=1.0) and resulting in system shutdown. Such problems not only threaten battery health but also risk grid reliability.

In this study, a new control architecture based on Symbolic Discrete Controller Synthesis (SDCS) is proposed to solve the safety and stability problem in ESS. This approach transforms the continuous-time dynamics of the system into a symbolic model with a finite number of states, proceeding the control problem as a safety game played between the controller and disturbances (i.e., the environment).

The proposed method is built on the correct-by-construction principle. This means that instead of trying to solve an optimization problem in real time, the synthesized controller works with a winning set calculated and mathematically proven during the design phase (i.e., off-line). This method theoretically makes it unfeasible for the system to violate the specified safety specifications.

The main contributions of this study to the literature are as follows:

- **Formal Modeling**: The ESS and grid frequency dynamics, uncertainties, and physical constraints have been addressed using a symbolic model suitable for formal methods.
- **Real-world Validation**: The performance of the controller was tested using real frequency data from Country-1 (High Energy Demand/Winter) and Country-2 (High Volatility/Summer), representing two different areas of the European Continental Grid (CESA).
- **Comparative Superiority Analysis**: The proposed method was compared with the industry standard Dead-band and Standard Droop Control. The analyses proved that the symbolic controller provides 100% safety and service continuity, even in worst-case scenarios where traditional methods push the battery to overcharge/discharge limits and disable it.
- **Robustness**: The robustness to stochastic noise resulting from high renewable energy penetration and low sampling rates has been demonstrated through comprehensive time series analysis.

1.1. Related Work

The problem of frequency regulation in power systems has been extensively studied in the literature. The scope of the studies scales from classical control techniques to advanced optimization-based strategies.

Traditionally used Load Frequency Control (LFC) relies on Dead Zone controllers and Standard Droop control mechanisms due to their simplicity and ease of implementation [1-4]. Furthermore, another characteristic of these methods is that they are designed based on linearized models around a specific operating point. This characteristic is significantly affected by high RES and stochastic load disturbances, as highlighted in [5]. To manage such limitations, adaptive and fuzzy logic-based controllers have been proposed to adjust the control parameters in the system online [6-7]. The positive aspect of these approaches is that they improve the dynamic response. However, they lack precise mathematical guarantees such as keeping the frequency within safety limits during extreme events.

Another model that addresses system constraints is MPC, which has been used in several studies [8-10]. By its nature, MPC considers the defined boundaries of the system and optimizes a cost function over a finite horizon to calculate control actions accordingly [11]. Although MPC provides a significant improvement in constraints, its high computational complexity makes it challenging for low-level embedded system applications used in real-world applications. In addition, MPC typically offers soft constraint satisfaction or probabilistic guarantees instead of the hard security guarantees required for critical infrastructure security [12].

In systems where safety is important, ensuring system safety with formal methods has recently started to be used as an alternative technique. For example, SDCS allows the synthesis of structurally correct controllers that include existing classical logic specifications [13,14]. Being based on formal methods, SDCS is also adaptable to different areas where symbolic controls are used, and has been successfully applied in vehicle path planning and thermal management with the proposed Symbolic Controller Synthesis Tool (SCOTS), as in [15]. However, the application of symbolic control to power system frequency regulation has been relatively under-researched. Early studies in this area [16,17] focused on simplified microgrid models or theoretical stability analysis without considering real-world, high-resolution stochastic data.

Recent studies have focused on intelligent and adaptive control strategies to handle the stochastic nature of renewable integration. For instance, [18] proposed a model predictive control (MPC) framework for primary frequency regulation, optimizing power allocation in hybrid storage systems to minimize degradation. Similarly, [19] developed a coordinated neuro-fuzzy control system to emulate virtual inertia in low-inertia grids, thereby enhancing the frequency support capabilities of hybrid storage units. Furthermore, deep reinforcement learning (DRL) methods have been investigated for their ability to handle uncertainties; [20] introduced a NoisyNet-based DRL agent to improve dynamic frequency response, demonstrating superior adaptability compared to traditional PID controllers. In [21], the Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA) is used to work on voltage profile improvement and power loss minimization within a single day, with a frequency range of 1 hour. [22] aimed to solve the problem of optimal positioning and sizing of power generation units with the approach they proposed, and to achieve optimal integration of the units into the power distribution networks. However, unlike these optimization and learning-based methods, our study focuses on formal synthesis to ensure mathematical correctness and safety guarantees.

As evident in existing studies, a gap exists between power system applications and formal symbolic synthesis based on mathematical proof of accuracy. The studies that incorporate this technique either remain theoretical, or other techniques are employed. Using high-resolution frequency data obtained from the Continental European grid, we prove the accuracy of a symbolic controller that guarantees strict safety constraints for both grid frequency and SoC, and outperforms conventional techniques in high-volatility scenarios.

The remainder of this paper is structured as follows: Section 2 outlines the mathematical preliminaries and the symbolic control framework utilized in this study. Section 3 describes the proposed system modeling, including state-space dynamics and algorithmic implementation. Section 4 details the symbolic controller synthesis process, focusing on discretization, safety specifications, and the game-theoretic solution. Section 5 presents the simulation results, worst-case scenario analyses, and comparative benchmarks against traditional control methods. Finally, Section 6 concludes the paper with key insights and directions for future research.

2. PRELIMINARIES

This section presents the mathematical base of the proposed controller synthesis approach. The modeling of continuous-time dynamical systems, feature definition using Linear Temporal Logic (LTL), and controller synthesis via SCOTS processes are summarized.

2.1. System Dynamics and Transition Systems

The behavior of physical systems (e.g., power grids and ESSs) is generally expressed by continuous-time differential equations. A general nonlinear control system is denoted by Σ and defined by the following tuple (Equation 1):

$$\Sigma = (X, U, W, f) \tag{1}$$

Where:

- $X \subseteq R^n$ represents the continuous state space of the system,
- $U \subseteq R^m$ represents the bounded control input space,
- $W \subseteq R^p$ represents the disturbance space acting on the system with known boundaries,
- $f: X \times U \times W \rightarrow R^n$ represents the function defining the vector space of the system.

The dynamic behavior of the system is governed by the following differential equation (Equation 2):

$$\dot{x}(t) = f\big(x(t), u(t), w(t)\big) \tag{2}$$

This infinitely continuous system is abstracted by symbolic control theory as a discrete transition system or symbolic model with a finite number of states. The symbolic model S is defined as (Equation 3):

$$S = \big(X_q, U_q, \delta\big) \tag{3}$$

Here, X_q represents the discrete set of states obtained by dividing the continuous space X into a finite number of cells; U_q represents the discretized input set. The transition relation $\delta: X_q \times U_q \rightarrow 2^{X_q}$ maps the transition probabilities of the system from one state to another non-deterministically.

2.2. Linear Temporal Logic (LTL)

The behavioral characteristics that the synthesized controller for the system must satisfy are mathematically formulated using LTL. These logic definitions are a powerful formal language used to define the paths of the system over time.

This study focuses on the safety of the system because this area is given greater importance. Accordingly, the LTL syntax to be created is represented by Φ, and the formula is formed using atomic propositions and logical operators. The formula is expressed as follows (Equation 4):

$$\Phi_{safety} = \square\big(S_{safe}\big) \tag{4}$$

With this formula, we are essentially trying to explain that the system must remain within the boundaries of the safe set (i.e. $S_{safe} \subset X$) defined from t=0 to infinity (i.e. $t \rightarrow \infty$). If the trajectory of the system x(t) deviates outside of S_{safe} at any point, the specification is considered violated.

2.3. Symbolic Controller Synthesis (SCOTS)

The SCOTS is used for building the symbolic model and synthesizing the controller. The process basically consists of two stages:

1. **Abstraction**: In this part, the continuous state space X is divided into hyper-rectangular cells to create a grid-based structure. In this structure, the transition of the system from one cell to another is calculated using the growth bound method. This method calculates the maximum region that all points in a cell can reach under a certain control input u and a worst-case disturbance w. This approach ensures that the model includes over-approximation. This means that the symbolic model covers all possible behaviors of the physical system.
2. **Synthesis**: A safety game is prepared for the designed symbolic model. For this, the synthesis algorithm runs a fixed-point iteration on the discrete state space. The algorithm aims to compute the following set (Equation 5):

$$WinningSet = \{x \in X_q \mid \exists u \in U_q, \forall w \in W : \delta(x,u,w) \subseteq WinningSet\} \quad (5)$$

This set contains the conditions under which the controller can guarantee the system remains in the safe zone despite any disturbances. The resulting controller is in the form of a static lookup table that provides safe control inputs (i.e., u) corresponding to the current state (i.e., x) of the system.

3. METHOD

A power grid integrated with modern power systems like ESS is addressed through mathematical modeling to increase system stability. This mathematical modeling involves transforming the system's physical reality into a format suitable for control design.

3.1. Modelling Approach

By ensuring frequency stability in power systems, we prevent frequency deviations that arise from supply-demand imbalances and threaten system reliability. To achieve this, in this study, a simplified model compatible with SCOTS was obtained by combining the power grid and battery system. The simplification of the model is critical in preventing the state explosion problem in controller synthesis by neglecting complex nonlinear effects.

3.2. State-Space Dynamics

To analyze the dynamic behavior of the system and design a suitable controller, the model is expressed in state-space form (i.e., $\dot{x} = Ax + Bu$). With this formulation, the change of the system over time is described through differential equations. This representation clearly shows how the future behavior of the system is shaped by its current state and the applied control input.

3.3. Basic State Variables

The proposed model is structured considering two main state variables that determine the system's characteristics:

- **Frequency Stability** (x_1): Expresses the deviation of the grid from the nominal frequency. Here, inertia and damping coefficients are considered. This variable indicates the health state of the grid.
- **Battery Charge State** (SoC - x_2): Expresses the current energy level of the battery as a percentage. SoC is included in the model as a critical constraint to prevent the controller from overcharging or discharging the battery.

3.4. Mathematical Model and Formulation

As stated in the previous section, the fundamental steps in determining the model are: constructing the state-space model and providing a basis for solving the model variables (e.g., frequency stability and energy management) using formal methods. In this subsection, the physical laws governing the interaction between the ESS and the power grid are expressed as a set of first-order differential equations.

The model consists of a combination of two main physical subsystems: (i) Battery electrochemical dynamics and (ii) Grid electromechanical dynamics.

3.4.1. Battery State of Charge (SoC) Dynamics

The change in the energy level in the battery is based on the law of conservation of energy [23]. The SoC is defined as the ratio of the energy stored in the battery to its total capacity, and its change over time is directly related to the power flow entering or leaving the battery [24]. In light of this information, battery dynamics are modeled by the following differential equation (Equation 6):

$$\frac{d(SoC)}{dt} = -\frac{1}{E_{cap}} \cdot P_{ess} \tag{6}$$

In the Equation 6, P_{ess} represents the control input. A negative value in the equation is due to the decrease in the internal energy (i.e. SoC) of the battery when power is supplied to the grid (discharge, positive P_{ess}) [8]. Conversely, when power is drawn from the grid (charge, negative P_{ess}), SoC increases. To mathematically express that with larger capacity batteries, the SoC changeover will be slower (i.e., the time of the system constant will increase) at the same power draw, the equation is divided by E_{cap}.

3.4.2. Grid Frequency Deviation

To model the frequency behavior of the power system, the classical Swing Equation, the equation of motion for synchronous machines, is used [2]. Structurally, this equation is an adaptation of Newton's second law of motion to rotational systems. It also explains how power imbalance in the system causes frequency variation. The dynamics of grid frequency deviation (Δf) are as follows (Equation 7):

$$\frac{d(\Delta f)}{dt} = \frac{1}{M} \cdot (P_{ess} - P_{load} - D \cdot \Delta f) \tag{7}$$

The stability of the grid frequency depends on the balance of three main components:

1. **Net Power Imbalance** ($P_{ess} - P_{load}$): This is the difference between the power supplied by the ESS and the disturbance load (P_{load}) on the grid.
2. **Damping Effect** ($-D \cdot \Delta f$): This is the natural response of the loads to frequency variation. It refers to the tendency of the system to spontaneously reach equilibrium due to increased consumption or vice versa as the frequency increase
3. **Inertia** (M): Represents the system's resistance to change.

3.4.3. System Variables and Parameters

The variables, control inputs, and system parameters used in the proposed dynamic model are detailed as follows:

A. State Variables (State Vectors - x): This is the vector that precisely describes the instantaneous behavior of the system (Equation 8):

$$x = [SoC, \Delta f\ ]^T \tag{8}$$

- x_1 (SoC): This is the current charge level of the battery. It is typically in the range of $0 \leq SoC \leq 1$. For symbolic controller design, this variable is a critical condition that determines how long the implemented system can supply power.
- x_2 (Δf): This is the instantaneous deviation of the mains frequency from the nominal value. A positive value indicates overproduction, and a negative value indicates overload (i.e., consumption).

B. Control Input (u):

- u_1 (P_{ess}): This is the amount of power demanded from the battery by the controller (per unit - p.u.).
    - $P_{ess} > 0$: Discharge mode (i.e., supporting the grid).
    - $P_{ess} < 0$: Charge mode (i.e., storing excess energy).

C. Disturbance (w):

- $w_1(P_{load})$: This is the net load error (p.u.) caused by changes in grid demand or sudden drops in the production of renewable energy sources (e.g., wind/solar). Since the variable is not deterministic, it is the main external factor that disrupts the stability of the system.

D. Parameters: These are constant coefficients that determine the dynamic response of the model:

- E_{cap} (Energy Capacity): This is the maximum amount of energy the battery can store (MWh).
- M (Inertia Constant): This is the kinetic energy storage capacity of units such as generators in the grid.The larger the M value, the slower the frequency change $(d(\Delta f)/dt)$ during sudden load changes. This provides time for the controller to intervene.
- D (Damping Constant): This is the natural resistance of the grid to frequency changes caused by existing motor loads. It helps the system reach a stable equilibrium point by damping its oscillations [1].

3.5. Computational Model and Algorithmic Implementation

The differential equations defining the model, shown in Figure 1, need to be converted into a computational structure so that they can be processed in SCOTS. For this purpose, continuous-time system dynamics are discretized using numerical analysis methods and transferred to the software environment.

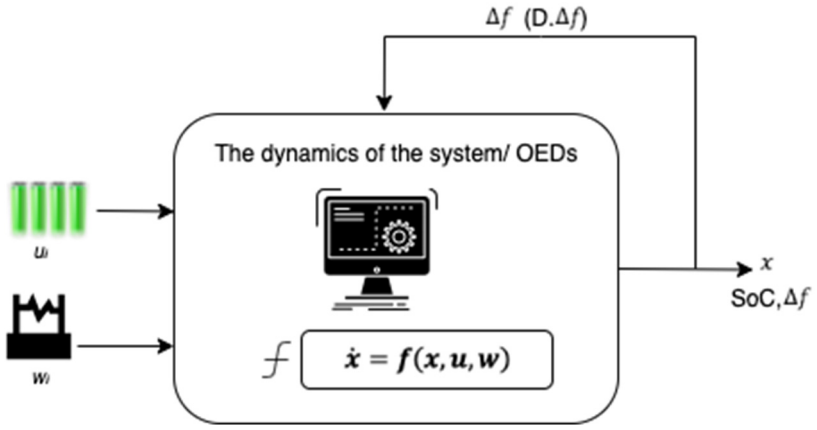


Figure 1. Processing the differential equations of the model in SCOTS

The nominal system parameters and the basic algorithm used to calculate the system dynamics in the simulation and controller synthesis process of the system were used as follows:

Table 1. Model parameters selected for simulation and synthesis

Parameter	Symbol	Value	Unit	Description
Battery capacity	E_{cap}	20.0	p.u.	Total energy storage limit of the ESS.
Moment of inertia	M	10.0	s	Resistance of the power system to frequency variation.
Damping coefficient	D	5.0	p.u.	Natural response of loads to frequency variation.

To create a realistic grid scenario in the study, the parameters and values shown in Table 1 were used. The values were determined by referencing energy storage applications similar to standard test systems [3].

In this study, we use the SCOTS tool to calculate where the system will go in the next step for each point in the state space. The procedure for calculating the state derivatives $(\dot{x})$ is summarized in Table 2. This algorithm takes the instantaneous state vector (x), control input (u), and disturbance effect (w) values and returns the rate of change of the system. These derivatives are then integrated by the ODE solver to find the next state (x_{k+1}).

Table 2. Energy storage and grid dynamics calculation algorithm

Step	Operation type	Mathematical equivalent / Description
1	Initialization	A vector dx is created to store the state derivatives. $(Dimension: 2)$
2	Input	The function receives the values x (Current State), u (Control), and w (Disruptive).
3	Calculation (SoC)	Battery dynamics are calculated: $\dot{x_1} = -\frac{u_1}{E_{cap}}$
4	Intermediate step	The net power imbalance on the grid (P_{net}) is found: $P_{net} = u_1 - w_1 - (D \cdot x_2)$
5	Calculation ($\$\Delta f\$$)	Frequency deviation acceleration is calculated: $\dot{x_2} = \frac{1}{M} \cdot P_{net}$
6	Assign	The calculated values are assigned to the derivative vector: $dx[0] \leftarrow \mathrm{d}x_1, dx[1] \leftarrow \mathrm{d}x_2$
7	Return	The result vector (dx) is sent to the ODE solver.

4. SYMBOLIC CONTROLLER SYNTHESIS

After completing the modeling of the dynamic behavior of the ESS and the power grid as a set of continuous-time differential equations, this chapter addresses the design of a controller that mathematically guarantees that the system remains within specified safety limits, based on the resulting physical model.

The controller design is based on a Formal Methods approach, meaning it proceeds with a mathematically correct method, unlike classical control methods, which depend on trial and error or parameter tuning. The strategy covers reducing the continuous dynamics of the system to a finite-state model and solving the control problem as a game theory problem.

4.1. Discretization and Abstraction

For symbolic control synthesis, it is necessary to transform system models containing an infinite number of states (i.e. Σ) into a system containing a finite number of states (i.e. Σsym). The way to achieve this is by discretizing the state space (X), input space (U), and disturbance space (W) of the system using a grid-based method. In this study, the SCOTS tool is used to create a symbolic abstraction of the continuous dynamics. The abstraction process begins with the creation of cells called "hyper-rectangles," which define the safe operating limits of the system.

4.1.1. Discretization and Abstraction

The computational complexity of the synthesis is directly dependent on the chosen state space boundaries and the discretization parameter (η). Therefore, the boundaries to be defined must encompass physical realities. At the same time, a narrow range should be chosen to minimize the computational load and maintain manageable computational complexity. The defined parameters and their justifications are detailed below:

- **State Space (X):**
  - SoC ($x1$): Defined in the range [0, 1]. The value 0 represents the state where the battery is completely empty, and the value 1 represents the state where it is completely full. These limits are the physical limits of the electrochemical capacity of the battery.
  - Frequency Deviation Δf ($x2$): Limited to the range [-0.5, 0.5] Hz. This deviation range, around the international grid frequency of 50 Hz or 60 Hz, represents the critical region for the stability analysis of the system. Any other frequency value outside this range is considered an unsafe area. The controller aims to never allow the system to enter this area.
- **Input Space (U):**
  - Battery Power ($Pess$): Defined in the range of [-1.0, 1.0] p.u. Here, negative values represent charging the battery (i.e., taking power from the grid), and positive values represent discharging it (i.e., feeding power back into the grid).

- **Disturbance Space (W):**
  - Load Change ($Pload$): Modeled in the range of [-0.1, 0.1] p.u. This variable represents sudden load changes. The controller must keep the system safe from any disturbances within this range.

The parameters and system limits are summarized in Table 3.

Table 3. System parameters and limits

Variable type	Symbol	Description	Range	Parsing step (η)	Number of cells
State (X)	SoC	State of charge	[0,1]	0.001	1000
	Δf	Frequency deviation	[-0.5,0.5] Hz	0.01	100
Input (U)	P_{ess}	Control power	[-1.0, 1.0] p.u.	0.1	21
Disturbance (W)	P_{load}	Load uncertainty	[-0.1, 0.1] p.u.	0.05	5

4.1.2. State Space Definitions and Boundary Values

For each discrete state cell in the system, the next possible states are calculated using the differential equation $\dot{x} = f(x, u, w)$. The system starts from a cell xk. When the system moves under a constant input u, and all possible disturbances w are applied during sampling time (i.e., τ), the area where the system can reach is calculated. This reachable area can cover multiple cells in the target space. This shows the non-deterministic nature of the symbolic model.

Mathematically, the symbolic transition relation R is defined as follows (Equation 9):

$$x_{next} \in R(x_{current}, u) \Leftrightarrow \text{Reach}(x_{current}, u, W, \tau) \cap x_{next} \neq \emptyset \quad (9)$$

All the actions that the continuous system can physically perform are present in the symbolic model. However, the symbolic model can exhibit more behavior than the physical system because it will have errors and uncertainties. This property is a mathematical guarantee that the synthesized controller is safe.

4.2. Safety Specification

The fundamental goal of symbolic control synthesis is to define restricted zones that the system must not engage in during its operation and to produce a controller that obey to these rules. In this study, the desired behavior of the system is mathematically formulated using Linear Temporal Logic (LTL).

The defined control problem is an invariance problem. The aim is to guarantee that the state of the system ($x(t)$) remains within the defined safe set (S_{safe}). In LTL syntax, this requirement is expressed as follows (Equation 10):

$$\Phi_{safety} = \square(S_{safe}) \quad (10)$$

This formula defines that the system must be an element of the set S_{safe} from the moment of beginning to infinity. The safe set S_{safe} is a subset of the state space X (i.e. $S_{safe} \subset X$) and is defined as the intersection of the following physical and operational constraints:

4.2.1. State-of-Charge Constraints

To protect the physical lifespan of the ESS and to provide reserve energy for emergencies, the SoC limits have been constricted. The limitation is set between 0.2 and 0.9, with a lower limit of 20% to prevent deep discharge, and an upper limit of 90% to minimize the risk of overcharging. This aspect also reduces chemical degradation in lithium-ion batteries and extends their cycle life. Furthermore, the ability to operate in both charging and discharging directions when instant frequency regulation is needed ensures that the battery is neither completely full nor completely empty.

4.2.2. Frequency Constraints

To ensure the stability of the power system and to prevent the activation of protection relays in the event of serious problems in the network, the frequency deviation must be kept within strict limits. This constraint is defined as $|\boldsymbol{\Delta f}| \leq \mathbf{0.2}$ Hz. The reason is that a deviation of $\pm\mathbf{0.2}$ Hz from the nominal frequency (i.e. 50 Hz) is considered the normal operating band. If this value is exceeded, it indicates that the production-consumption imbalance in the system has reached a critical level.

4.2.3. Mathematical Definition of the Safety Set

When all constraints defined for the system are integrated, the safe state space (S_{safe}) that the controller must keep the system in is mathematically expressed as follows:

$$S_{safe} = \{(x_1, x_2) \in X \mid 0.2 \leq x_1 \leq 0.9 \wedge -0.2 \leq x_2 \leq 0.2\} \tag{11}$$

Here, x_1 represents the SoC value; x_2 represents the frequency deviation (Δf). Any state violating the conditions in Equation 11 is marked as unsafe. It also calculates the control inputs that prevent paths to these states.

4.3. Synthesis Algorithm and Safety Game Solution

Controller synthesis can be defined as the process of solving a safety game described in the state space of the system. In this process, an iterative Fixed-Point Algorithm is run on the discretized state space. The main objective of the algorithm is to eliminate, from the initially defined safe set (S_{safe}), those states that cannot guarantee the system remains in the safe zone.

4.3.1. Fixed-Point Iteration

The algorithm relies on a backward elimination mechanism that starts from the target set. The mathematical representation of the process is expressed in the following steps:

1) **Initialization:** The starting set of the iteration (W_0) is determined as the entire set of safe elements defined in Section 4.2 (Equation 12):

$$W_0 = S_{safe} \tag{12}$$

2) **Controlled Operator:** At each step, conditions that guarantee remaining in the previous set (i.e., W_k) are calculated. The predecessor operator (i.e., $Pre(\cdot)$) is used for this calculation. For a state to be considered a winner, the following logical condition must be met (Equation 13):

$$\boldsymbol{Pre(W_k)} = \{\boldsymbol{x} \in \boldsymbol{X} \mid \exists \boldsymbol{u} \in \boldsymbol{U}, \forall \boldsymbol{w} \in \boldsymbol{W}: \boldsymbol{f(x,u,w)} \in \boldsymbol{W_k}\} \tag{13}$$

3) **Iteration and Elimination:** The algorithm reduces the current set at each step by intersecting it with the previous step (Equation 14):

$$W_{k+1} = W_k \cap Pre(W_k) \tag{14}$$

This process ensures that states that risk going outside the safe zone in any corruption scenario are removed from the set.

4) **Termination:** The iteration stops when the set no longer changes (i.e. fixed-point) (Equation 15):

$$W_{k+1} = W_k \tag{15}$$

The resulting final set is called the winning set (W^*).

Once the fixed-point algorithm is complete, a list of valid control inputs for each state within the $\boldsymbol{W}^*$ set is obtained. The synthesized static feedback controller (C) is defined as follows (Equation 16):

$$C(x) = \{u \in U \mid \forall w \in W, f(x,u,w) \in W^*\} \tag{16}$$

This controller naturally has the property of structural correctness. Clearly, as long as $x \in W^*$, any input $u \in C(x)$ chosen by the controller will mathematically keep the system in a safe area. This means that the proposed control model does not require post-verification or testing phases as in traditional control methods.

An important point is the cases where a controller does not exist. For example, if the initial state is x_0, $x_0 \notin W^*$, it is understood that a controller satisfying the safety specification does not exist for this state.

5. RESULTS AND ANALYSIS

After synthesizing a symbolic controller that guarantees the safe operation of the system using formal methods, the effectiveness and robustness of the resulting controller were verified using grid frequency measurements obtained from real-world data.

For the test scenarios, frequency data from the Continental Europe Synchronous Area (CESA) was used [25]. As one of the world's largest synchronized electricity grids, CESA presents a rich and complex dynamic structure in terms of frequency control. To generalize the performance of the controller under different operating conditions, two distinct datasets (i.e., "Scenario A" and "Scenario B") were selected, differing significantly in terms of grid characteristics and seasonal effects.

In the simulations, real frequency data was added to the system model as a disturbance effect (i.e. w). The battery power response (i.e. P_{ess}) produced by the symbolic controller and the SoC change in response to this effect were analyzed. The characteristics of the datasets used and the challenges they presented in terms of the control problem are detailed below.

5.1. Dataset A: Country-1 Network (Winter Load Profile)

This data set is taken from Country-1's transmission network and covers the period from January to March 2020. This selected country has a production structure where nuclear sources are mainly used for electricity generation. Due to the energy provided by this source, the system has a high physical inertia. However, the widespread consumption of electricity for heating purposes leads to large and long-term changes in demand during the winter months.

This scenario tests the ESS of the controller management, as long frequency deviations caused by heating loads require the battery to operate in the charge or discharge direction for extended periods. This leads to approaching the SoC limits (i.e. 0.2 and 0.9) and increasing the risk of limit violation.

5.2. Dataset B: Country-2 Grid (Summer/Autumn Load Profile)

This data set is taken from another European country and contains data covering the period July-September 2020. Country-2 is a region where RES such as wind and solar are most heavily integrated into the system in terms of energy policy. However, these power electronics-based sources reduce the overall inertia of the system.

Therefore, this scenario is designed to test the rapid response of the controller and volatility management against sudden and high-amplitude changes in frequency due to stochastic effects such as wind and solar efficiency (i.e., cloud transitions). The controller needs to respond to these rapid changes with aggressive power action without depleting the SoC.

The key differences between the two datasets are summarized in Table 4.

Table 4. Simulation scenarios and dataset characteristics

Feature	Dataset A	Dataset B
Season	Winter (January-March)	Summer/Autumn (July-September)
Dominant factor	Heating load & Nuclear base	Renewable energy (RES)
Inertia state	High inertia	Low inertia
Frequency behavior	Stable, low-frequency oscillations	Volatile, high-frequency noise
Tested criterion	SoC management / Depth	Velocity / instantaneous power response

5.3. Performance Metrics

The performance of the synthesized symbolic controller was validated through simulations conducted throughout the month for both scenarios. In the simulations, sampling times of 10 seconds (i.e., $T_s = 10s$) were used for the Country-1 dataset, and 1 second (i.e., $T_s = 1s$) for Country-2. The results are summarized in Table 5 based on Frequency RMS representing grid volatility, Total Energy showing the cumulative contribution of the battery to the grid, Saturation Time (i.e. the controller keeps the system in safe mode), and Min/Max SoC values showing compliance with safety limits.

Table 5. Comparative performance analysis of SCOTS-based ESS controller

Scenario	Time Step (T_s)	Peak RMS (Hz)	Total energy ($p.u.$)	Saturation time	Min SoC	Max SoC
Country-1						
January	10s	0.040438	318980.69	474870.0	0.1980639	0.9016917
February	10s	0.042756	317760.65	335210.0	0.1973250	0.9023555
March	10s	0.047083	369394.86	301250.0	0.1979972	0.9015194
Country-2						
July	1s	0.058024	242853.93	456873.0	0.1998138	0.9001638
August	1s	0.047643	329264.88	271536.0	0.1998444	0.9001749
September	1s	0.046393	346499.31	302952.0	0.1997722	0.9001361

Based on the current data in Table 5, the most notable finding is the sensitivity of the symbolic controller to SoC limits (i.e., 0.2 - 0.9) when examining its behavior under different network characteristics and sampling values. For example, even when the control period for the Country-1 scenario was longer than for Country-2, slight deviations in SoC values were observed (e.g., Min: 0.1973, Max: 0.9024 in February). Country-2, however, maintained the SoC within limits with excellent precision (e.g., 0.1998 - 0.9002) through rapid interventions. This can be interpreted as a result of the sampled data system. That is, during 10-second blind spots (i.e. inter-sample behavior), the controller cannot intervene while the physical system continues to flow. Nevertheless, the fact that the deviation remains at 0.2% proves that the synthesized controller provides practical stability even at low sampling rates.

Looking at volatility, specifically RMS analysis, the July data for Country-2 showed the highest peak RMS value at 0.0580 Hz. This value is approximately 23% higher than Country-1's most challenging month, March (i.e., 0.0471 Hz). This difference numerically confirms how Country-2's high solar penetration and low inertia structure, due to its heavy reliance on renewable energy, make the grid frequency aggressive and noisy. Even in this high-noise environment, the symbolic controller successfully filtered without exceeding the SoC limits (i.e. 0.1998).

When saturation time and energy management analysis were performed, it was observed that Country-1 had the highest saturation time in January, with 474,870 seconds. The increase in heating loads during the winter months keeps the frequency below the nominal value for a long time. In this case, the battery constantly tries to discharge and reaches the lower limit. At this point, the controller, according to the rules of the safety game, cuts off the discharge and protects the system. In Country-2, despite the high RMS value, the relatively low total energy transfer indicates that the frequency waves vary rapidly in both positive and negative directions. This shows that the battery is constantly charging and discharging (i.e., cycling). In this scenario, the plain energy flow is not as unidirectional and intense as in the Country-1 scenario.

In conclusion, the analyses demonstrate that the proposed symbolic controller generated an optimal response to long-term, persistent frequency deviations (i.e., energy capacity challenge) in the Country-1 scenario and to sudden, high-amplitude frequency changes (i.e., power capacity challenge) in the Country-2 scenario, without risking battery health.

5.4. Worst-Case Analysis

The statistical data presented in Table 5 were used to identify worst-case scenarios that challenge the system's stability. Time series graphs of these scenarios (e.g., frequency deviation, battery power, and SoC change) are presented in Figures 2 and 3 to visualize the dynamic behavior of the controller.

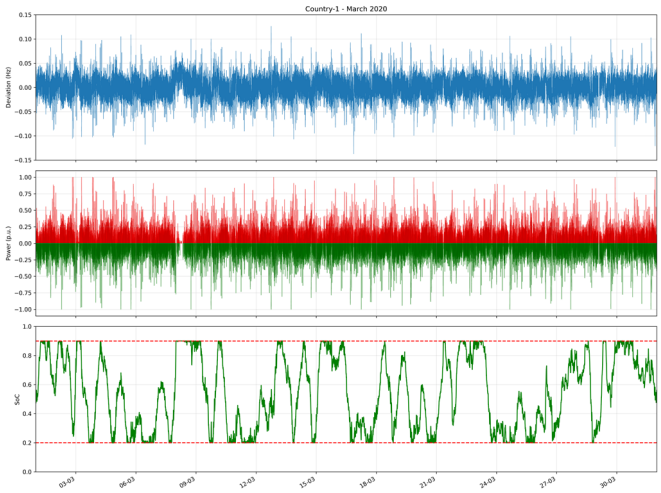


Figure 2. The grid of Country-1 (March 2020) - High energy transfer and 10s sampling effect

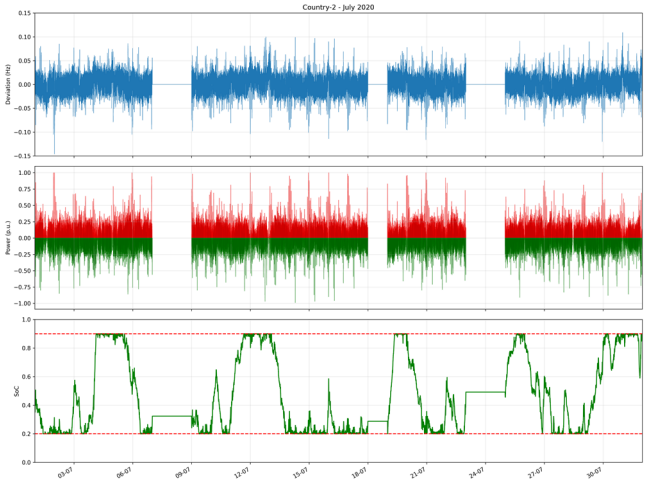


Figure 3. The grid of Country-2 (July 2020) - High volatility and battery saturation

The March 2020 data, representing the winter period and shown in Figure 2, has been identified as the most critical period for testing the controller's energy management capacity. This is because this month has the highest RMS value of the winter period at 0.0471 Hz. Examining the upper graph (i.e., blue) in Figure 2, it is evident that frequency deviations are continuous and strong throughout the month. Therefore, a massive total energy transfer of 369,394 p.u. occurred. When limit violations are observed, the lower graph (i.e., green) in Figure 2 shows that the battery charge status frequently touches the lower limit (i.e., 0.2) and the upper limit (i.e., 0.9). It is important to note here that the low sampling rate of 10 seconds (i.e., $T_s = 10s$) of the Country-1 dataset caused blind spots in the response time of the controller. Therefore, the SoC value dropped below the theoretical limit of 0.20, reaching 0.1973. Graphically, these tiny poles at the lower limit are numerical integration errors resulting from the wide sampling interval, and this deviation of 1.35% is within acceptable limits.

The July 2020 data, representing the summer period and shown in Figure 3, represents the most challenging scenario in terms of grid volatility and controller saturation. During this scenario, the highest noise level among all datasets was observed, with an RMS value of 0.0580 Hz. This indicates the sudden and sharp power changes caused by the high renewable energy in the Country-2 grid during the summer months. The saturation period in this scenario lasted a total of 456.873 seconds (i.e., approximately 5.3 days), and it is clearly seen that the SOC line flattened for extended periods. Despite the intense saturation, the controller, employing a safety game strategy, entered wait mode with mathematical certainty at the edge of the safe zone.

In addition to statistical data, a time series analysis was also conducted to observe the response of the controller to instant grid events and to test whether it maintained safety limits. For this analysis, a 24-hour worst-case scenario was created for the worst-case scenarios that most severely challenged system

stability. According to the results, during Country-1's worst 24 hours, the grid frequency still demanded power when the battery was fully charged (i.e., $SoC \geq 0.9$), but the symbolic controller stopped the charging process and protected the system according to the safety game rules. This is shown in Figure 4, where the SoC value, shown in green in the left column, progresses as a straight line.

On the right side of Figure 4 is Country-2's worst-case 24-hour scenario. In this worst-case scenario, the frequency deviation is noisier and rapidly changing compared to Country-1. This high-frequency variation is due to the large-scale use of renewable energy sources in Country-2 and the stochastic effects created by these energy sources, as mentioned above. The controller responded directly to these sharp fluctuations. The oscillations in the SoC graph for this worst-case scenario demonstrate that the controller made continuous and precise micro-corrections to avoid exceeding its limits. The SoC value was kept within the safe band despite the intense stress.

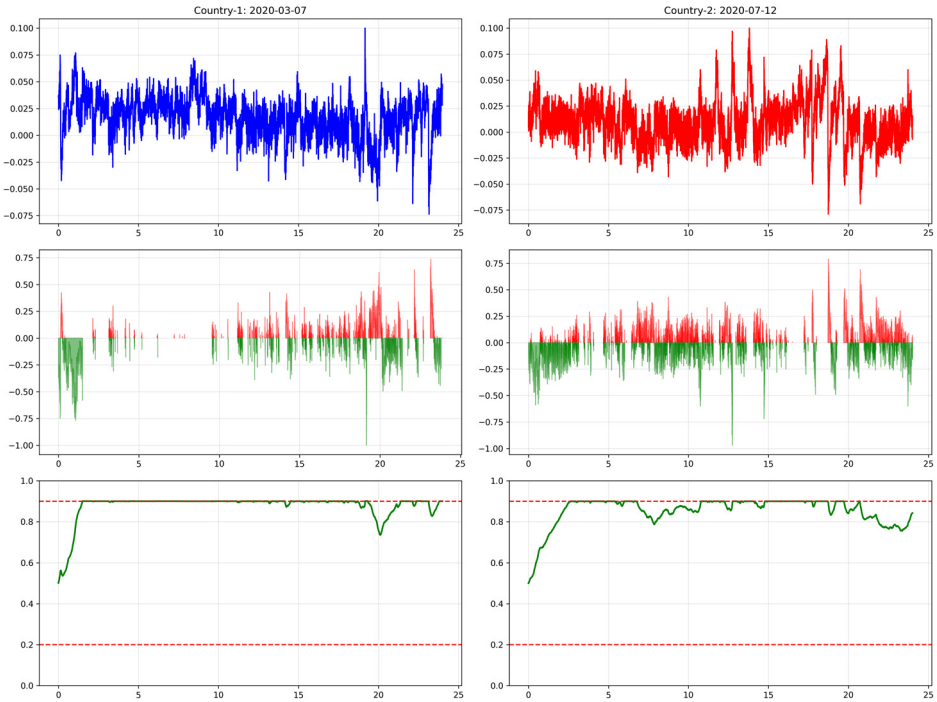


Figure 4. Controller performance comparison. Left panel: Country-1 grid (energy intensive scenario - 07.03.2020), right panel: Country-2 grid (volatility intensive scenario - 12.07.2020).

5.5. Benchmark Test

To validate the superiority of the proposed symbolic controller, a comparative analysis was conducted with two traditional methods commonly used in the industry. The comparison focused on worst-case scenarios, which are among the most challenging for the system. The comparison was performed between the three methods given below:

1. **Standard Droop Control**: Generates power proportional to frequency deviation ($P \propto \Delta f$), ignoring battery state (SoC).
2. **Deadband Control**: Ignores small frequency deviations (± 10 mHz), but behaves like Droop for large deviations.
3. **Proposed Method**: SCOTS-based symbolic controller guaranteeing SoC constraints.

Simulation results, in terms of Frequency, Power, and SoC variations, are presented in Figures 5 and 6.

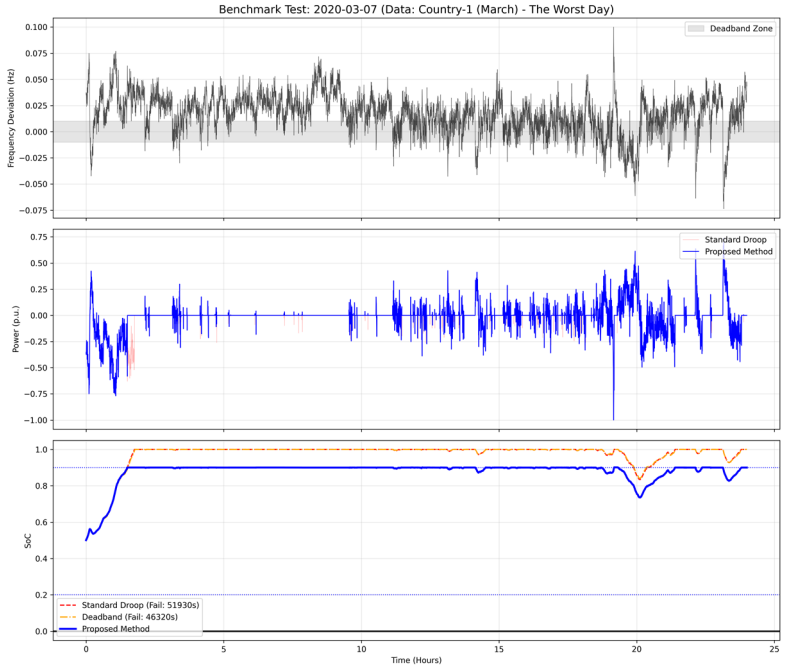


Figure 5. Comparative analysis (i.e. benchmark test) for Country-1. Top panel: Mains frequency deviation, middle panel: Battery power response (red: standard, blue: recommended), bottom panel: SoC.

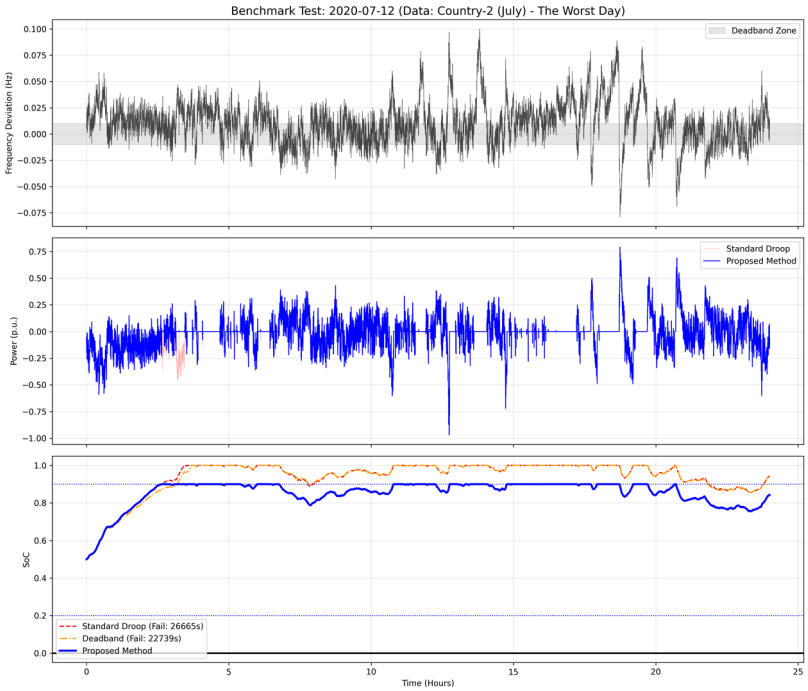


Figure 6. Country-2 grid benchmark analysis (July 12, 2020). Top panel: High volatility frequency and deadband region, middle panel: Power response, bottom panel: SoC

Figure 5 clearly shows the fundamental difference in strategy between the standard droop (Red) and the proposed method (Blue) in the middle panel. For example, looking at the swings of the red line, as long as the frequency is positive (i.e., when there is excess energy in the grid), it forces the system to continue drawing negative power (i.e., charging) even when the battery is full. The blue line, on the other hand, suddenly drops to zero at certain moments, becoming a flat line. This means that the controller gave the command to cut off the power flow when the battery was full. In other words, even if the grid still demands charging, the controller prioritized battery safety and stopped the power flow.

The SoC graph in the lower panel of Figure 5 shows the safety weakness achieved by traditional methods and how the proposed method keeps the SoC value of the system within safe limits. Standard droop (Red) and deadband (Orange) methods failed to manage the battery charge level during long positive frequency deviation in the Country-1 grid. Both lines exceeded the safe limit of 0.9 SoC and reached the physical limit of 1.0 SoC (i.e., Fully Charged). Since a battery with SoC=1.0 cannot draw more energy from the grid, it ends to provide frequency regulation service from that point on. The proposed model (Blue), although it increased along with the other methods, stopped its increase precisely when it reached the 0.9 level. The safety-constrained symbolic controller stopped the charging process when the battery SoC level reached the upper safety limit. This prevented the battery from overcharging and always maintained a 10% reserve capacity.

A comparative analysis of the worst day scenario for a Country-2 grid with high renewable energy penetration is presented in Figure 6. This scenario is critical for testing the performance of controllers under high volatility and noisy frequencies compared to standard tests.

The black frequency line in the upper panel of Figure 6 exhibits much more aggressive fluctuations compared to the Country-1 scenario. The frequency signal frequently violates the deadband (± 10 mHz) region, shown in grey. This prevents the deadband controller (Orange) from resting and causes it to operate almost as intensely as the standard droop (Red). The deadband controller implementation, insufficient in reducing stress on the battery, represents a passive protection method in high-volatility grids.

The SoC changes in the lower panel of Figure 6 also clearly demonstrate the failure of standard methods and the success of the proposed method. Within just 3 and 4 hours, both the standard droop and deadband controllers overcharged the battery due to positive frequency deviations, pushing the SoC=1.0 physical limit. Because both applications kept the battery in a failed state for an extended period, the grid was unable to provide the necessary negative power (i.e., charging). Thus, this results in the system failure. The blue line increased in parallel with other methods but halted its climb upon reaching the 0.9 safety limit. A critical observation occurred between hours 7 and 10, when the frequency reversed and demanded discharge. The blue line responded immediately by dropping below 0.9, while other methods, stuck at 1.0, exhibited delayed or erroneous dynamics due to a loss of operational flexibility.

Consequently, while standard methods are sufficient under normal operating conditions, they can exceed safety limits under extreme load and volatility conditions observed in Country-1 and Country-2 networks. In contrast, the proposed model, because of its correct-by-construction structure, mathematically satisfies frequency and battery constraints under all grid conditions.

6. CONCLUSIONS

This study proposes a novel control architecture based on Symbolic Discrete Controller Synthesis (SDCS) to ensure frequency stability in modern power systems with high renewable energy integration and to guarantee the secure operation of Energy Storage Systems (ESS). Unlike traditional optimization methods, the proposed approach addresses the physical constraints of the system, such as SoC limits and frequency bands, with mathematical precision according to the correct-by-construction principle.

Numerical results validate the robustness of the proposed method. Specifically, in the high-volatility Country-2 scenario, the symbolic controller keeps system safety for a saturation duration of 456,873 seconds without violating the critical SoC limits (i.e. 0.2–0.9). However, traditional Deadband and Droop controls caused battery overcharge (i.e. SoC=1.0) and service suspension during worst-case events; the proposed approach ensured 100% operational availability and kept frequency deviations within the safe band.

The performance of the proposed controller is validated using real frequency data from the Continental Europe Synchronous Area, representing different seasonal periods and grid characteristics. Based on comparative benchmark tests and experimental results, the following critical findings were reached:

- **Safety & Availability**: Traditional methods, such as Standard Droop and Deadband, failed to manage battery charge levels, particularly during long positive frequency deviations in the Country-1 scenario. This result caused the SoC to reach its physical limit of 1.0. This followed in battery service halting and interruption of frequency regulation. In contrast, the SCOTS-based symbolic controller managed to maintain the battery within the ± 0.2 Hz frequency band and the [0.2, 0.9] SoC range. When limit values were reached, it intelligently applied saturation, preserving battery health with a 10% reserve capacity.
- **Failure of Traditional Methods**: The Deadband Control method, widely used in the literature, has been observed to be insufficient under the high volatility and noisy network dynamics observed in the Country-2 dataset. Analysis has shown that even the Deadband method cannot protect the battery from overcharging, causing the system to be offline for an extended period in the "Worst Day" scenario. On the other hand, the proposed method proved its superiority by remaining 100% operational under the same conditions.
- **Robustness to Volatility**: Under the high stochastic volatility observed in the July dataset (i.e. one of the Country-2 datasets), the proposed controller operated at saturation levels for over 457,000 seconds, yet the SoC did not fall below the critical lower limit of 0.20. This confirms the robustness of the mothod against high-resolution and noisy datasets of 1 second.
- **Applicability and Computational Efficiency**: The synthesized controller completes complex mathematical calculations during the design phase (i.e. off-line). Although the computational cost is higher compared to standard techniques, it only reads data from a pre-calculated look-up table at runtime. This feature allows for real-time implementation.

It was observed that the 10-second sampling rate in the Country-1 scenario caused a minor SoC deviation (1.35%) due to inter-sample blind spots. Although this deviation is within acceptable limits, future studies can overcome this limitation by adopting multi-rate control strategies or event-triggered mechanisms. These approaches would allow the controller to mix more frequently during rapid transient events while keeping computational efficiency during steady states

Future studies are planned to use this method in multiple and interconnected microgrids. Furthermore, the synthesis of a common robust controller for a hybrid system, which could include aerodynamic energy sources such as wind turbines, could be considered for these grids.

7. REFERENCES

1. Kundur, P. (1994). *Power system stability and control.* McGraw-Hill, New York.
2. Bevrani, H. (2014). *Robust power system frequency control.* Springer, 391.
3. Machowski, J., Bialek, J. & Bumby, J. (2012). *Power system dynamics: stability and control.* Wiley, 660.
4. Elgerd, O. I. & Fosha, C. E. (1970). Optimum megawatt-frequency control of multiarea electric energy systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 89*, 556-563.
5. Vandoorn, T., Kooning, J., Meersman, B. & Vandevelde, L. (2013). Voltage-based droop control of renewables to avoid on-off oscillations caused by overvoltages. *IEEE Transactions On Power Delivery, 28*(2), 845-854.
6. Parisio, A., Rikos, E. & Glielmo, L. (2014). A model predictive control approach to microgrid operation optimization. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, *22*(5), 1813-1827.
7. Alskaif, T., Luna Hernandez, A., Guerrero-Zapata, M., Guerrero, J. & Bellalta, B. (2017). Reputation-based joint scheduling of households appliances and storage in a microgrid with a shared battery. *Journal of Energy and Buildings*, *138*, 228-239.
8. Aboukhris, A.B.O., Karimzadeh Kolamroudi, M. & Kavalcıoğlu, C. (2025). Optimizing energy management strategies in grid-connected hybrid pv-battery-supercapacitor systems: a comprehensive review. *Gazi University Journal of Science, 38*(4)*,* 1892-1920.

9. Lin, Y., Yang, Q., Zhou, J., Chen, X. & Wen, J. (2023). Model predictive control based frequency regulation for power systems containing massive energy storage clusters. *The Proceedings of the 5th International Conference on Energy Storage and Intelligent Vehicles (ICEIV 2022),*1183-1190.

10. Kouro, S., Cortes, P., Vargas, R., Ammann, U. & Rodriguez, J. (2009). Model predictive control-a simple and powerful method to control power converters. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 56*, 1826-1838.

11. Tabuada, P. (2009). *Verification and control of hybrid systems: a symbolic approach.* Springer, 202.

12. Zamani, M., Pola, G., Mazo Jr, M. & Tabuada, P. (2011). Symbolic models for nonlinear control systems without stability assumptions. *IEEE Transactions on Automatic Control, 57(7),* 1804-1809.

13. Rungger, M. & Zamani, M. (2016). SCOTS: A tool for the synthesis of symbolic controllers. In *Proc. 19th Int. Conf. Hybrid Syst. Comput. Control (HSCC)*, 99-104.

14. Reissig, G., Weber, A. & Rungger, M. (2017). Feedback refinement relations for the synthesis of symbolic controllers. *IEEE Transactions on Automatic Control, 62,* 1781-1796.

15. Pola, G., Girard, A. & Tabuada, P. (2010). Approximately bisimilar symbolic models for nonlinear control systems. *Automatica, 44*(10), 2508-2516.

16. Zamani, M., Esfahani, P., Majumdar, R., Abate, A. & Lygeros, J. (2013). Symbolic control of stochastic systems via approximately bisimilar finite abstractions. *Automatic Control, IEEE Transactions on.* 59.

17. Dörfler, F., Simpson-Porco, J. & Bullo, F. (2015). Plug-and-play control and optimization in microgrids. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control,* 211-216.

18. Li, J., Hu, J. & Xin, D. (2025). Model predictive control-based optimal control of primary frequency regulation power for hydrogen fuel cell-energy storage battery system. *Renewable Energy, Elsevier, 248*.

19. Inga Espinoza, C. H., & Palma, M. T. (2025). A Coordinated Neuro-Fuzzy Control System for Hybrid Energy Storage Integration: Virtual Inertia and Frequency Support in Low-Inertia Power Systems. *Energies, 18*(17), 4728.

20. Zhang, B., Iu, H., Zhang, X. & Chau, T.K. (2024). A NoisyNet deep reinforcement learning method for frequency regulation in power systems. *IET Gener. Transm. Distrib., 18,* 3042-3051.

21. Nacar Çıkan, N. (2025). Distribution network reconfiguration for voltage profile enhancement and power loss reduction under hourly energy consumption using quantum approximate optimization algorithm. *Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering*, *40*(1), 79-87.

22. Çıkan, M. (2025). IEEE 13-baralı dengesiz üç fazlı güç dağıtım sistemlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının optimum konumlandırılması ve boyutlandırılması. *Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40*(1), 89-98.

23. Kurucan, M., Michailidis, P., Michailidis, I. & Minelli, F. (2025). A modular hybrid soc-estimation framework with a supervisor for battery management systems supporting renewable energy integration in smart buildings. *Energies, 18*(17)*,* 4537.

24. Kurucan, M., Özbaltan, M., Yetgin, Z. & Alkaya, A. (2024). Applications of artificial neural network based battery management systems: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 192,* 114262.

25. Rydin Gorjão, L., Jumar, R., Maass, H., Hagenmeyer, V., Yalcin, G. C., Kruse, J., Timme, M., Beck, C., Witthaut, D. & Schafer, B. (2020). Open database analysis of scaling and spatio-temporal properties of power grid frequencies. *Nat Commun., 11*, 6362.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 1 MART/MARCH 2026

A Computational and Applied Approach to Determining the Pollution Load in Urban Wastewater Management in Van Province

Ayşegül DEMİR YETİŞ [1,a], **Ayşe ÖZGÜVEN** [2,b], **Ahmet DURAK** [3,c]

[1]*Bitlis Eren University, Vocational School of Health Services, Department of Medical Services and Techniques, Bitlis, Türkiye*
[2]*Van Yuzuncu Yil University, Faculty of Engineering, Department of Environmental Engineering, Van, Türkiye*
[3]*General Directorate of Van Water and Sewerage Administration (VASKİ), Department of Treatment Plants, Wastewater Treatment Branch, Van, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0003-4745-2445; [b]**ORCID**: 0000-0003-1071-2813; [c]**ORCID**: 0000-0003-1497-8387*

Article Info
Received : 16.01.2026
Accepted : 10.03.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1864746

Corresponding Author
Ayşegül DEMİR YETİŞ
ademir@beu.edu.tr

Keywords
Advanced biological (WWTP)
Point pollution load
Pressure and impact
Van

***How to cite:** DEMİR YETİŞ, A., ÖZGÜVEN, A., DURAK, A. (2026). A Computational and Applied Approach to Determining the Pollution Load in Urban Wastewater Management in Van Province. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(1), 213-225.*

ABSTRACT

This study evaluates pollution loads from point sources in the İpekyolu, Tuşba, and Edremit districts of Van Province by comparing both calculated and measured data. In this context, chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and suspended solids (SS) loads were calculated using pollution design coefficients. The urban wastewater from these districts is also treated at the Van Central Advanced Biological Wastewater Treatment Plant (WWTP), and the pollution loads received and discharged from the plant were measured and compared with regulatory values. As a result, the total pollution load discharged into Lake Van was determined to be 4037 tons/year for COD, 576 tons/year for TN, 96 tons/year for TP, and 1121 tons/year for SS. The measured pollution load at the plant outlet was determined to be 2737 tons/year for COD, 391 tons/year for TN, 43 tons/year for TP, and 608 tons/year for suspended solids (SS). The calculated values for TN and TP loads exceed the specified limit values.

Van İli Kentsel Atıksu Yönetiminde Kirlilik Yükü Tespitine Yönelik Hesaplamalı ve Uygulamalı Yaklaşım

Makale Bilgileri
Geliş : 16.01.2026
Kabul : 10.03.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1864746

Sorumlu Yazar
Ayşegül DEMİR YETİŞ
ademir@beu.edu.tr

Anahtar Kelimeler
İleri biyolojik AAT
Noktasal kirlilik yükü
Baskı ve etki
Van

***Atıf şekli:** DEMİR YETİŞ, A., ÖZGÜVEN, A., DURAK, A. (2026). Van İli Kentsel Atıksu Yönetiminde Kirlilik Yükü Tespitine Yönelik Hesaplamalı ve Uygulamalı Yaklaşım. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(1), 213-225.*

ÖZ

Bu çalışmada; Van ilinin merkeze bağlı İpekyolu, Tuşba ve Edremit ilçelerinin noktasal kirlilik kaynaklarından kentsel atıksuların kirlilik yükleri hesaplamaya ve gerçek ölçüm verilerine dayalı karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda kirlilik yüklerini temsilen kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), toplam azot (TN), toplam fosfor (TP) ve askıda katı madde (AKM) yükleri kirlilik tasarım katsayıları kullanılarak hesaplanmıştır. Bu ilçelerin kentsel atıksuları aynı zamanda Van Merkez İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi (AAT)'nde arıtılmakta olup, tesise gelen ve deşarj edilen kirlilik yükleri de ölçülmüş ve mevzuat değerleri ile mukayese edilmiştir. Sonuç olarak Van Gölü'ne deşarj edilen; KOİ için hesaplanan toplam kirlilik yükü miktarı 4037 ton/yıl, TN için 576 ton/yıl, TP için 96 ton/yıl ve AKM için 1121 ton/yıl olarak belirlenmiştir. Tesis çıkışında KOİ için ölçülen kirlilik yükü miktarı 2737 ton/yıl, TN için 391 ton/yıl, TP için 43 ton/yıl ve AKM için 608 ton/yıl olarak tespit edilmiştir. TN ve TP yükleri için hesaplanan değerler belirlenen sınır değerlerin üzerindedir.

1. INTRODUCTION

Today, rapid population growth, industrialization, and urbanization have led to significant decreases in both the quantity and quality of available water [1]. In our country, groundwater and surface water are exposed to pressure from natural and human-induced (anthropogenic) pollution sources. The Mediterranean Basin, including Türkiye, is facing serious effects of climate change. In the worst-case scenario, Türkiye is projected to face water scarcity as early as 2040 [2]. Considering these critical assessments of water resources, watershed-scale water resource management is becoming increasingly important. The concept of a watershed encompasses the entire drainage area from a river's source to its point of discharge. Effective watershed management is vital for the conservation and sustainable use of water resources, both in terms of quantity and quality [3,4]. The first step in improving and protecting water quality is to identify and control point and diffuse sources of pollution. To determine pollution from these sources, various methods are used, ranging from simple calculations based on unit pollution loads to complex models with varying sensitivities [5,6]. Point source discharges generally originate from municipal and industrial wastewater. Since municipal wastewater is transported through sewer systems, these types of discharges are classified as point sources. In contrast, wastewater from settlements without sewerage and infrastructure systems is considered a diffuse source. Assessing the amount of pollutants transported from point sources to receiving environments is crucial for the protection and sustainable management of water resources and ecosystem health. In systems in which urban or industrial wastewater is discharged directly after treatment, annual pollution loads should be calculated by considering both pollutant concentrations and discharge flow rates. There must be sufficient facilities to treat wastewater classified as point sources of pollution, and these facilities must demonstrate effective treatment performance to ensure that treated water is safely discharged into surface and groundwater. Such load calculations are necessary for assessing the carrying capacity of water bodies, understanding ecosystem pressures, and formulating effective water quality management plans [7].

Nitrogen and phosphorus pollution in aquatic environments can originate from point sources such as wastewater treatment plants and diffuse sources such as agricultural runoff. Nutrients enter receiving water bodies through atmospheric deposition, point sources, and land use activities. Among these, agriculture and livestock farming contribute most significantly to the pollution of receiving environments. Additionally, wastewater from settlements without sewage connections and water leaking from waste disposal areas contribute to the accumulation of nutrients in receiving water bodies [8]. Therefore, it is necessary to calculate the quantitative loads of diffuse and point source pollution that exert pressure on surface and groundwater bodies. However, a review of the literature reveals that most studies focus either on assessing water quality [9,10] or identifying pollution originating from specific sources [11]. This situation negatively impacts biological diversity and water quality, reducing the recreational and water supply value of water bodies. Due to increasing risks to water resources, one of the fundamental elements of life, the European Parliament and Council published the Water Framework Directive (WFD) 2000/60/EC on October 23, 2000, which “establishes a framework for Community action in the field of water policy management.” The primary objective of this directive is to establish a legal framework for the protection of surface and groundwater, as well as coastal and transitional waters; to protect water ecosystems and prevent their pollution; to ensure sustainable water use; to improve the quality of water ecosystems; and to develop a comprehensive approach to mitigate the potential impacts of disasters such as floods and droughts [12]. Türkiye, which is a candidate for European Union (EU) membership, must bring its water legislation into line with the EU Water Framework Directive (WFD) [13].

Existing studies evaluating urban water and wastewater infrastructure in the region address criteria such as infrastructure services, treatment rates, and per capita wastewater volume. However, these studies primarily focus on infrastructure or service levels; they do not sufficiently evaluate post-treatment discharge loads and the ecological pressures on the lake. This situation reveals a mismatch between water quality and ecosystem health on the one hand, and the performance of wastewater infrastructure on the other [14]. There are a limited number of studies examining the relationship between pollution sources and water quality. In the international literature, nutrient loads (nitrogen and phosphorus) from point sources in closed and river basin systems are generally determined using mass balance methods and various modeling approaches. These models incorporate components such as soil-water transport, flow dynamics, and characteristics of the receiving environment to accurately quantify the contribution of wastewater discharged from wastewater treatment plants to the total nutrient load [15]. Furthermore, determining the

nutrient composition (organic, inorganic, and bioavailable fractions) in treated wastewater is crucial for assessing the risk of eutrophication in the receiving water body [16].

Lake Van is designated as one of five sensitive basins in the Urban Wastewater Treatment Regulation. Due to its closed-basin structure, high alkalinity (sodium carbonate composition), and limited water circulation, the Lake Van Basin is highly sensitive to changes in water quality and pollutant accumulation. Due to its closed nature and lack of any natural outlets, its pollution potential is significantly increased. The chemical properties and flow rate or volume of water resources in the basin are crucial for assessing the potential impacts of pollutant loads entering the lake. For example, when the water chemistry of saline resources in the basin is examined, the large differences in parameters such as pH, electrical conductivity, and dissolved oxygen highlight the sensitivity of the water body [17]. Many factors contribute to the pollution of water resources in the Lake Van basin. Among these, the inadequate treatment and subsequent discharge of wastewater from settlements around the lake is prominent [18].

This study investigated, through calculations and measurements, whether point source urban wastewater from the districts of Tuşba, İpekyolu, and Edremit in Van province has a significant impact on the organic load of Lake Van, located within the Lake Van Basin. In this context, pollution loads resulting from organic pollutant parameters such as chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and suspended solids (SS) were both calculated and evaluated by comparing measurement-based data. Furthermore, discharge data obtained from the calculation and measurement of pollution load parameters were compared with the limit values specified in the Water Pollution Control Regulation (WPCR) and the Municipal Wastewater Treatment Regulation (MWWTR). This study aims to determine the carrying capacity of the receiving environment, specifically in the Van Lake Basin, and to identify potential harmful effects on the lake ecosystem. It is expected that these results will inform water quality management in the region, improve treatment processes, support lake protection strategies, and guide regulatory decision-making.

2. METHOD

2.1. Study Area

Van Province is located between 42° 40' and 44° 30' east longitude and 37° 43' and 39° 26' north latitude. Located in southeastern Eastern Anatolia, the basin encompasses the catchment areas of rivers that flow into Lake Van. In Türkiye, it is located in the Upper Murat-Van section of the Eastern Anatolia Region, within the closed basin of Lake Van. Lake Van is a volcanic lake formed by the accumulation of water in a crater created by the volcanic eruption of Mount Nemrut, located on the border between the provinces of Bitlis and Van [19]. Lake Van, known as the world's largest soda lake, also has saline water properties and is located at an elevation of approximately 1,725 meters above sea level [20]. The Van Lake Basin covers an area of 17,964 km² and has an average annual rainfall of 474 mm and an average annual flow rate of 95.32 m^3/s. The annual precipitation in the basin is 6.25 $L/s/km^2$, with a precipitation ratio of 0.42% and a contribution to runoff of 1.64%. The Van Lake Basin covers the provinces of Van, Bitlis, and Ağrı [18]. The sewer network in Van Province, approximately 1,960 kilometers long, collects wastewater from various sources, directs it to collector lines, and transports it to treatment plants. Construction work on the sewer networks and collector lines is still ongoing. Van Metropolitan Municipality VASKİ General Directorate is conducting operational activities at existing wastewater treatment plants in various districts to prevent pollution caused by wastewater. Extended aeration activated sludge treatment plants are in operation in Van (Center), Edremit, Başkale, Erciş, Gevaş, and Çelebibağı. The system, which operates using the activated sludge process, consists of mechanical and biological units, and the treated wastewater from the treatment plant is discharged into the lake. During treatment, a portion of the sludge generated is transported to conventional storage areas, while another portion is stored in drying beds. Efforts to dispose of the mud are ongoing. The wastewater treatment plant project for Çatak District has been completed, and construction is ongoing. Similarly, wastewater treatment plant projects for Bahçesaray, Çaldıran, Gürpınar, Muradiye, and Saray Districts have also been completed. All wastewater from the central districts of Van Province, namely İpekyolu and Tuşba, and part of the wastewater from Edremit District is treated at the Van Central Advanced Biological Wastewater Treatment Plant in Tuşba District and then discharged into the lake (Figure 1) [21].

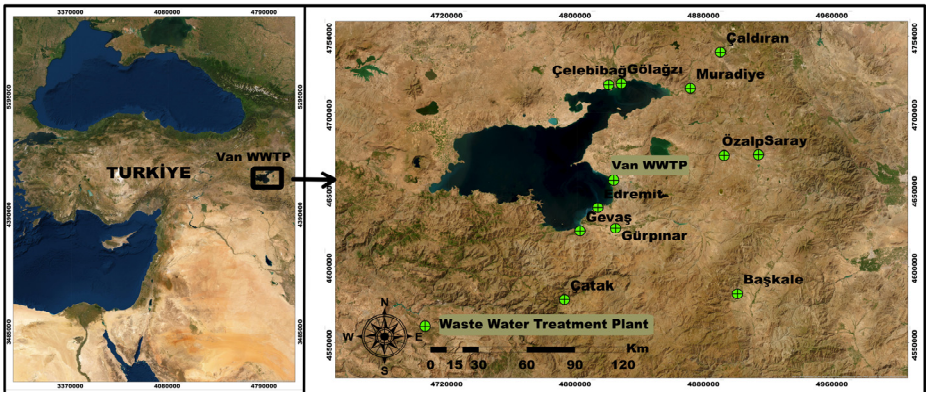


Figure 1. Location of wastewater treatment plants in van province and districts

2.2. Van Central Advanced Biological Wastewater Treatment Plant

The Van Central Advanced Biological Wastewater Treatment Plant was commissioned in 2021 and is located in the İskele neighborhood of Tuşba district. It was designed to serve a population equivalent of approximately 1,050,000 people and was constructed with a design capacity of 114,000 m³/day. In line with future flow projections, the plant is designed to reach a maximum capacity of 193,000 m³/day by 2026. The wastewater treatment plant is designed in two phases, 2026 and 2046, to meet long-term needs. The flow diagram of the Van Central Advanced Biological Wastewater Treatment Plant is shown in Figure 2, and images of the plant are shown in Figure 3. The facility has a pretreatment unit comprising a stone trap, a coarse screen, and perforated screens, as well as an inlet pumping station. This is followed by an aerated sand-and-oil trap, a flow-meter structure, anaerobic tanks, aeration tanks, and final settling tanks. Another component of the treatment process is the return-and-excess-sludge pumping station, which includes a chlorine contact tank. The sludge line also features sludge dewatering units. The facility also includes a transformer-generators building, workshop building, blower building, administration building, and a continuous wastewater monitoring system (CWMS) cabin. The 93.44 m³ stone trap, positioned before the coarse and perforated screens at the plant entrance, forms the first stage of the pre-treatment process by retaining large materials such as sand, gravel, and similar substances. Six mechanical cleaning grates, one of which is spare, are designed with ropes. The grate bars are made of 10x50 mm stainless steel plates and are designed at a 75 ° angle to the horizontal, with 40 mm spacing between bars. Fine grates are located after the inlet pumping station. The spacing of the fine perforated screens selected as the perforated type has been set to 8.0 mm to ensure efficient operation of biological treatment units and the sludge process. The screen structure is equipped with a waste conveyor and a screen press. The perforated screens are designed to allow five units to operate simultaneously at the Q_{max} flow rate in the second stage and two units at the Q_{min} flow rate. In the first stage, four screens are designed to operate continuously, while one screen is designed to be used alternately for maintenance and malfunction situations. The intake pumping station is designed with six pumping units, each with a capacity of 109 kW, to handle the total hydraulic load.

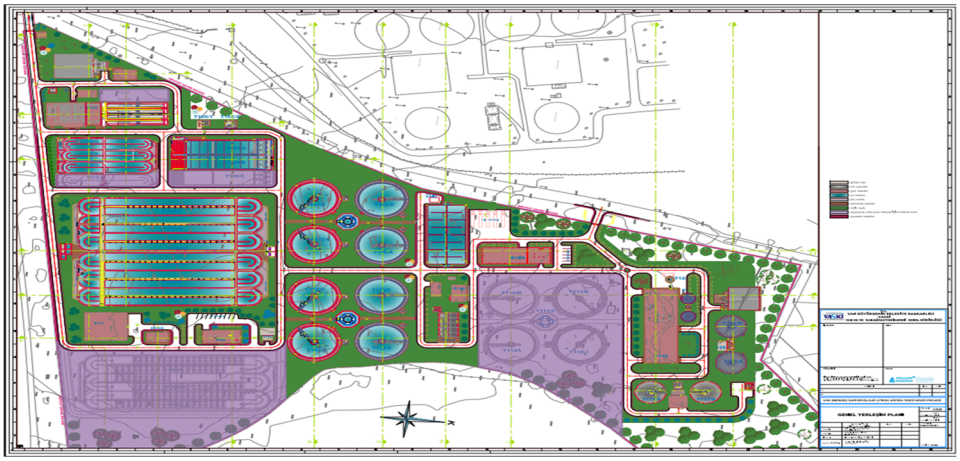


Figure 2. Van Central Advanced Biological WWTP flow diagram

Aerated sand and oil separators are designed to separate sand, gravel, and similar materials from wastewater entering the treatment plant, and to remove oils present in the wastewater, preventing their passage to downstream units. Four sand separators have been sized for the first stage, and six sand separators have been sized for the second stage. The volume of the aerated sand and oil separators has been designed as 315.12 m³. To minimize filamentous bacterial growth in wastewater entering the treatment system and to homogenize the wastewater, selector tanks with a total volume of 3062.12 m³ have been used. Anaerobic phosphorus tanks have been designed with a volume of 3062.12 m^3, with 2 for Stage I and 3 for Stage II. Aeration tanks have been designed with 6 for the first stage and 9 for the second stage, each with a volume of 11333 m^3 and capable of operating independently.

The process tanks are designed for the pre-denitrification A^2O system and are planned to operate as simultaneous denitrification (stepwise feeding) systems when required. Settling tanks are planned for 8 units in the first-stage year (2026) and 12 units in the second-stage year (2046), with each settling tank designed to have a volume of 3,889.66 m^3. The recirculation unit is designed to be equipped with 6 lift pumps, each with a capacity of 109 kW. The chlorine contact tank is sized to a volume of 2,817 m³, based on a 20-minute retention time, to ensure completion of chemical reactions. A mechanical thickener was used to thicken the sludge taken from the final settling tank. The mechanical thickener was designed to bring the excess sludge taken from the settling tank, which had a dry matter content of 1% 1000 mg/L; SVI (sludge volume index) = 110 mL/g) to 5%. Mechanical sludge thickener: A total of 3 units will be commissioned in Stage I (2 main + 1 spare), and a total of 4 units will be commissioned in Stage II (3 main + 1 spare). The RWMS (Remote Wastewater Monitoring Station) cabin continuously measures pH, temperature, conductivity, COD, BOD, and dissolved oxygen in wastewater and transmits the data to the Ministry's system. Two peristaltic suction pumps operating in shifts convey wastewater to the sample-filling cell, which allows vertical flow via PPR-T lines. The flow rate on the line is measured using a flow meter, transmitted to the SCADA screen, and simultaneously sent to the Ministry system.



Figure 3. Van Central Advanced Biological WWTP visuals

2.3. Methodology

Van Province comprises 13 districts, 3 of which are central districts. The 2025 population data for the districts of Edremit, İpekyolu, and Tuşba, which are affiliated with the central district, were obtained from the district-based demographic data of the Turkish Statistical Institute [21] and are shown in Table 1.

Table 1. TSI population data for the central districts of Van province [22]

District	Number of people	Percentage (%)
Tuşba	165 885	15
İpekyolu	356 977	32
Edremit	130 768	12
Van province total	1.118.087	100

The pollution loads for the central districts of Van Province were calculated using four parameters: COD, TN, TP, and SS. For these, the removal efficiencies reported in Table 2 and the design coefficients, such as pollution load, reported in Table 3, from the literature were used [23-26].

Pollution loads for the central districts of Van Province were calculated using four parameters: COD, TN, TP, and SS. The calculations were based on the values specified in the "Technical Procedures Circular for Wastewater Treatment Plants" dated March 20, 2010. According to Table 2.1 of this Circular, titled "Variation of Wastewater Generation and Pollution Loads Depending on Population," removal efficiencies representing wastewater and per capita pollution loads based on population values are provided (Table 2) [23]. For these, design coefficients, such as removal efficiencies (Table 2) and pollution load (Table 3), were obtained from the literature [23-27]. For the pollution removal efficiencies in the wastewater treatment plants (WTPs) in Table 3, the calculations were performed using the assumptions for the Van Central Advanced Biological Wastewater Treatment Plant, which has an advanced biological treatment type: 80% for COD, 70% for TN, 70% for TP, and 90% for SS. [24-26]. The formulas used in the calculations are given below.

Table 2. Removal efficiencies found in the literature for pollution load calculations [23-26]

Population	Unit flow rate L/person/day	Unit COD load gr/person/day	Unit TN load gr/person/day	Unit TP load gr/person/day	Unit SS load gr/person/day
50000-100000	150	90	7	1,1	50
>100000	150	90	7	1,1	50

Table 3. Pollutant load coefficients found in the literature for pollutant load calculations [24-26]

Treatment type	COD removal efficiency (%)	TN removal efficiency (%)	TP removal efficiency (%)	SS removal efficiency (%)
Biological	80	25	10	90
Advanced biological (Removing N and P)	80	70	70	90

The following formula is used to calculate the pollution load per person per day for each parameter, i.e., the calculated pollution load entering the facility [26,27].

$$L_{ann} = \frac{N \times k}{10^6} \times 365 \quad (1)$$

Here, L_{ann} denotes the annual pollution load (tons/year), N denotes the population, and k denotes the per-capita pollution generation coefficient (g/person-day) [26,27].

For an urban wastewater treatment plant, the pollution load is calculated as L_{eff} (tons/year) of discharged wastewater (the load delivered to the receiving environment), L_{inf} (tons/year) of inlet wastewater (the load arriving at the plant), and n (%) of removal efficiency [26,27].

$$L_{inf} = \begin{cases} L_{inf}\left(1 - \frac{n}{100}\right), If\ treatment\ exists \\ L_{inf}, Otherwise \end{cases} \quad (2)$$

The calculated and measured values to be discharged were compared with the limit values in Table 4 of the "Water Pollution Control Regulation", "Table 21: 4. Discharge Standards of Domestic Wastewater into Receiving Environments" and the "Urban Wastewater Treatment Regulation", "Table 2: Discharge Limits for Advanced Treatment from Municipal Wastewater Treatment Plants" [28,29].

Table 4. National legislation limits values for the discharge of urban wastewater into receiving environments

Pollution load parameter	Limit value	Legislation
COD (mg/L)	120	WPCR, Table 21:4
TN (mg/L)	10	MWTR, Table 2
TP (mg/L)	1	MWTR, Table 2
SS (mg/L)	35	WPCR, Table 21:4

Wastewater pollution parameters were analyzed in accordance with standard methods at the Environmental Chemistry Laboratory of the Central Advanced Biological Wastewater Treatment Plant [30]. Samples were collected using an Endress Hauser sampling device in accordance with the TS ISO 5667-10 standard. Samples were taken from the inlet and outlet points of the plant as 24-hour time-weighted composite samples, and sample containers and volumes specified in the TS EN ISO 5667-3 standard were used for the analyses. pH measurements were performed using a WTW 110 pH meter. Suspended solids (SS) analyses were conducted according to the TS EN872 standard using the SM 2540 D gravimetric method. COD analysis was performed spectrophotometrically (Hach Lange Dr5000) using ready-made kits according to the SM 5220 D closed reflux method. TN analyses were performed in accordance with TS EN 12260, based on persulfate oxidation, using ready-made kits on a Hach Lange Dr5000 spectrophotometer. Total phosphorus analysis was performed according to Standard Methods 4500-P B, based on the conversion of phosphorus to orthophosphate in an acidic environment and colorimetric measurement, using ready-made kits on a Hach Lange Dr5000 spectrophotometer [30].

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1. Comparative Evaluation of Calculated and Measured Pollution Load Parameters

The domestic wastewater from the central districts of Van province, Tuşba, İpekyolu, and Edremit, is treated at the Van Central Advanced Biological Wastewater Treatment Plant. This study evaluates organic pollution load parameters in wastewater entering the plant and in wastewater discharged into the receiving environment, accounting for point-source pollutants from the three central districts. Calculations were made assuming that all wastewater from the Tuşba and İpekyolu districts, and approximately 70% of wastewater from the Edremit district, arrive at the plant. First, the pollution load parameters specified in the legislation were calculated using coefficients from the literature. In addition, actual measurement data were obtained from influent and effluent wastewater at the Central Advanced Biological Wastewater Treatment Plant. Daily data from March, April, and May 2025 were used for this purpose. Descriptive statistical evaluations of these data on a monthly basis are also presented. In the comparative evaluation of the calculated data, the "average values of the measured parameters" were used. The calculated and measured data were compared, and the discharged data were compared with the values specified in the legislation.

Figure 4 shows the variation in urban-sourced pollution loads, specifically a) COD (chemical oxygen demand), b) TN (total nitrogen), c) TP (total phosphorus), and d) SS (suspended solids), calculated on a central district basis for the influent and effluent wastewater from the plant. The highest pollution load parameter values are observed in influent wastewater, with changes noted in the districts of İpekyolu, Tuşba, and Edremit. Under normal conditions, design coefficients used to obtain actual data for pollution load calculations are expected to be higher for influent wastewater than for measurement data [31]. Following wastewater treatment, the pollution load of the treated effluent is lower than that of the influent wastewater. In the district-based assessment, the highest values for all calculated pollution load parameters were found in the districts of İpekyolu, Tuşba, and Edremit, respectively, based on population density. Similar studies have shown that pollution loads increase with population density [5,31]. In the parameter-based evaluation, the difference between the input wastewater data and the discharge data is most significant for the calculated SS parameter values. The subsequent ranking continues with the parameters COD, TN, and TP. According to Uysal and Cebe [32], the parameter ranking is COD, SS, TN, and TP.

In Figure 5 (a,b), changes in the pollution loads of raw wastewater entering wastewater treatment plants and discharged wastewater are shown. Accordingly, the measured pollution load values (COD, TN, TP, and SS) are higher than the calculated values. In Figure 5a), it was observed that only the calculated influent WW pollution loads, TN and TP (excluding the COD and SS parameters), had lower ratios than the measured values.

Determining existing pollution loads from domestic wastewater within the scope of the river basin management plan and identifying the ultimate effects of the pressures it will exert on surface water bodies are crucial for basin management. In this regard, comprehensive studies are underway, and legislation is being updated regarding both discharge criteria and the protection of the receiving environment. Therefore, it is essential to disseminate these studies, taking into account their contributions to the literature. Within the scope of this study, calculations were performed using population data and design coefficients from the literature to assess the extent to which the results matched the actual data. Finally, averages were calculated

from measurements taken in March, April, and May for comparison. The influent wastewater and effluent wastewater pollution load data for this study were compared with the calculated data. Accordingly, the calculated values were higher than the measured pollution load. The reasons for this can be listed as follows: i) the theoretical pollution coefficients being set too high for design purposes, ii) the discrepancy between the actual population data and the design population, iii) the increase in per capita water consumption and the dilution effect, iv) infiltration into the sewer system and the entry of rainwater, v) lower-than-expected industrial load values or the application of pretreatment processes, vi) differences arising from sampling and analysis methods, vii) reasons such as pre-sedimentation and biochemical decomposition in the sewage system [33,34]. Additionally, population-based pollution load estimates are derived from assumptions and standard coefficients to ensure design safety. In contrast, measured input values are affected by actual hydraulic and operational conditions, network status, and analytical processes. The fact that calculated loads are higher than measured concentrations in short, that calculated pollution loads, especially in terms of COD, suspended solids, TN, and TP parameters, are higher than measured discharge loads is a normal outcome from an engineering and design perspective. This is related to the conservative approach widely adopted in the design of wastewater treatment plants. The per capita pollution load coefficients used in design generally aim to plan for maximum-load conditions (i.e., upper-limit values), minimize risk, and include a safety margin. While this approach reflects a cautious planning approach to protecting the receiving environment, it can lead to discrepancies between the design values and the measured loads under actual operating conditions [34-36].

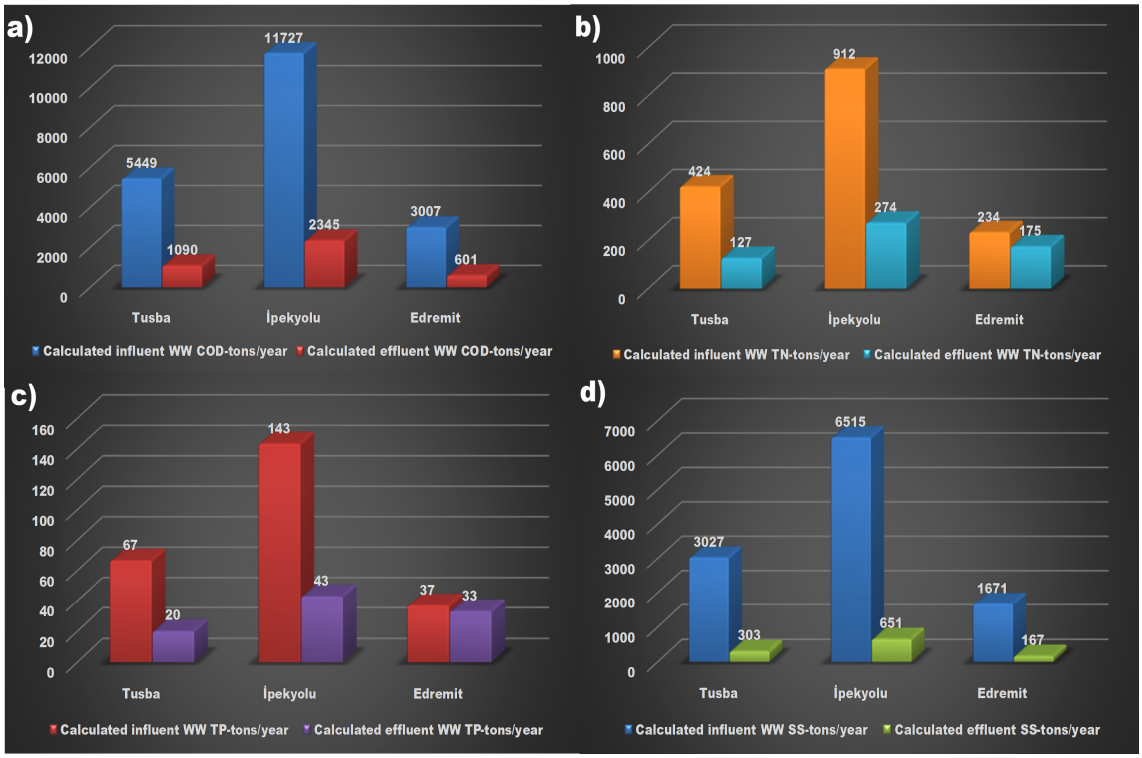


Figure 4. Distribution of pollution loads calculated in urban wastewater for the central districts of Van province (İpekyolu, Tuşba, and Edremit) according to some parameters: a) COD (tons/year), b) TN (tons/year), c) TP (tons/year), and d) SS (tons/year)

The characterization of urban wastewater varies with multiple parameters, including water consumption habits, industrial contribution rates, infiltration and exfiltration effects, seasonal variations, and socio-economic factors [34]. Therefore, while calculations based on theoretical coefficients are important for planning and capacity forecasting, they may not fully reflect local conditions if not calibrated with actual measurement data. The fact that the calculated TN and TP loads in this study exceed the regulatory limits, whereas the measured values are within the limits, indicates that the design coefficients are protective; however, operational performance should be evaluated more realistically using monitoring data. On the other hand, the difference between design and actual loads has significant consequences not only in terms of mass load balance but also for energy consumption [37].

In wastewater treatment plants, 45–75% of total energy consumption occurs in biological treatment processes, particularly aeration systems [38]. In advanced biological wastewater treatment plants, nitrification-denitrification and biological phosphorus removal processes are used for the removal of nitrogen and phosphorus, leading to significant energy consumption due to their high dissolved oxygen demand [39]. High TN and COD loads selected during the design phase can lead to parameters such as blower capacity, aeration time, and reactor volume being set at their upper limits. If the actual organic and nitrogen loads remain below the design values, and dissolved oxygen control is not optimized based on load, blower systems may operate at unnecessarily high capacities. This situation can lead to an increase in energy consumption per unit of pollutant removal (kWh/kg COD or kWh/kg TN) and a decrease in the plant's specific energy performance. It can also cause biological treatment units to operate at relatively low organic loading rates (F/M) [40]. Low F/M rates can lead to increased sludge age and the dominance of endogenous respiration processes in activated sludge systems, causing biomass metabolism to shift to a less energy-efficient range [34,41]. Similarly, while lowering the nitrogen load than the design assumptions reduces the theoretical oxygen demand required for nitrification, it can also prevent the full realization of energy saving potential due to fixed aeration strategies. The nitrification process is one of the energy-intensive processes in biological treatment systems, and changes in oxygen transfer efficiency and organic and nitrogen loadings directly affect energy consumption [30].

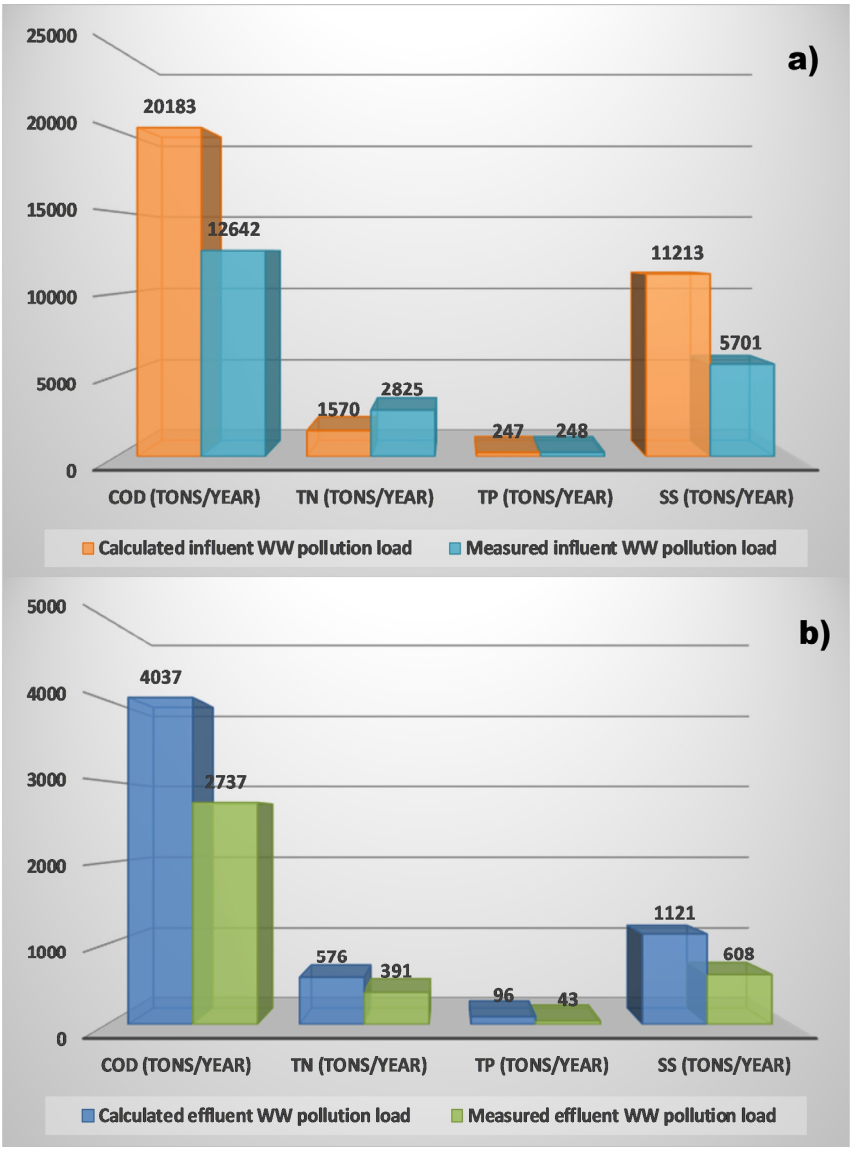


Figure 5. Comparison of a) influent wastewater and b) effluent wastewater pollution loads of Van central advanced biological wastewater treatment plant based on calculated and measured values of COD, TN, TP, and SS (tons/year) parameters

Therefore, analyzing actual load conditions relative to design assumptions is important not only for regulatory compliance but also for energy optimization and the development of sustainable operating strategies. Increasing energy efficiency is considered one of the fundamental components of sustainable wastewater management [42]. Applications such as dynamic process control based on the actual load profile, in-cycle dissolved oxygen sensors, pumping, sludge line and minimization, ammonium-based aeration control, variable speed blower use, and biogas production offer significant potential for energy savings [43-47]. In this context, revealing the difference between estimated and measured pollution loads is important not only for planning accuracy but also for energy optimization, greenhouse gas emission reduction, and lower operating costs [48].

Given the closed and sensitive basin nature of Lake Van, while protecting the receiving environment is a primary objective, the energy-efficient operation of wastewater treatment plants is also a critical element for sustainability. The European Union Water Framework Directive (2000/60/EC) aims to improve the condition of water bodies while adopting holistic basin management [12]. In this context, monitoring plant performance and evaluating it within the energy-efficiency framework are as important as accurately estimating point-source pollution loads [37].

3.2. Evaluation of Influent and Effluent Wastewater Parameters Measurement Data

Table 5 presents descriptive statistics (minimum, maximum, mean, and standard deviation) for pollution load parameters in the plant influent and effluent wastewater for March, April, and May. For the base parameters in the table, the minimum and maximum influent wastewater values were 182 mg/L (March) and 537 mg/L (May), respectively, while the plant effluent wastewater values were 45 mg/L (May) and 80 mg/L (May). All daily measurement values at the COD plant effluent wastewater (over a 3-month period) did not exceed the limit values set for discharge. The minimum and maximum influent wastewater TN values were 27 mg/L (March) and 84 mg/L (May), respectively, whereas the effluent TN values were 6 mg/L (March) and 10 mg/L (May). The daily TN measurement values at the plant influent wastewater (over a 3-month period) did not exceed the specified discharge limit, remaining at the limit threshold for 1 day each in March and April, and 3 days in May. The minimum and maximum TP values in the influent wastewater were 3 mg/L (March) and 7 mg/L (April and May), respectively, while the minimum and maximum TP values in the effluent wastewater were 1 mg/L across all months. All daily TP measurements in the plant effluent wastewater (over 3 months) remained within the set discharge limits. For SS, the minimum and maximum influent wastewater concentrations were 56 mg/L (March and April) and 190 mg/L (May), respectively, while the plant effluent concentrations were 2 mg/L (March and April) and 25 mg/L (March). All daily SS measurement values in the plant effluent wastewater (over a 3-month period) did not exceed the specified discharge limit. Table 5 presents the calculated results for discharged wastewater and compares them with the limit values specified in the legislation for each measurement obtained at the facility. According to this, only the calculated TN and TP values for the discharged wastewater exceed the specified limits in the legislation, while the measured (mean) values do not exceed these limits and remain within them.

Table 5. Descriptive statistics of organic pollution parameters measured in the wastewater treatment plant

Values	Period	WWTP influent				WWTP effluent			
		COD (mg/L)	**TN (mg/L)**	**TP (mg/L)**	**SS (mg/L)**	**COD (mg/L)**	**TN (mg/L)**	**TP (mg/L)**	**SS (mg/L)**
Min	March	**182**	**27**	**3**	***56***	53	6	***1***	***2***
	April	197	54	5	***56***	48	8	***1***	***2***
	May	193	39	4	108	**45**	8	***1***	9
Mean	March	208	57	5	76	65	8	1	16
	April	279	62	6	119	60	9	1	11
	May	289	54	5	153	62	9	1	14
Max	March	258	75	6	100	79	10	***1***	***25***
	April	426	**84**	*7*	179	72	10	***1***	16
	May	**537**	65	*7*	***190***	**80**	10	***1***	17
SD	March	23	13	1	13	8	1	0	6
	April	71	11	1	49	9	1	0	5
	May	104	10	1	27	11	1	0	2
General mean		255	57	5	115	63	9	1	14
Limit value		120	10	1	35	120	10	1	35

4. CONCLUSIONS

Lake Van, a closed basin, is one of the five sensitive basins specified in the Urban Wastewater Treatment Regulation - Sensitive and Less Sensitive Water Areas Circular. The fact that this basin is closed, with no outflow, increases its potential for pollution. The primary sources of pollution in the basin are wastewater from settlements surrounding the lake. Therefore, wastewater should not be discharged into the receiving environment without adequate treatment and removal efficiency. The final discharge of wastewater from the Van Central Advanced Biological Wastewater Treatment Plant is also made to the shore of Lake Van. VASKİ carries out the operation, maintenance, and repairs of WWTPs located on the coast to protect the health of the receiving environment. To support sustainable water use through the long-term protection of the coastal waters of Lake Van, a closed basin, the watershed protection action plan and drought and flood management plan studies have been completed, and implementation program monitoring meetings are ongoing.

As a result, among the central districts of Van Province, the highest pollution load was calculated in the district of İpekyolu, which has the most densely populated area, while the lowest pollution load values were calculated in the district of Edremit. In general, when calculating the pollution load, the calculated values were higher than the measured values because the theoretical pollution coefficients were selected high for design purposes, in line with the assumptions. COD is the pollutant parameter with the highest pollution load, while TP is the parameter with the lowest load. Compared with the legislative limit values, the measured values were within acceptable limits, whereas the calculated values for TN and TP exceeded the limits. It is important to develop management and planning strategies within the scope of action plans and river basin management plans to reduce pollution loads.

Furthermore, the difference between the calculated and measured pollution loads represented in the study demonstrates the need to calibrate design assumptions against local data. Optimization studies based on actual measurement data will make significant contributions to both maintaining regulatory compliance and increasing energy efficiency. The main reason for limiting the study's scope to three central districts is that these districts are connected to an advanced biological wastewater treatment plant that discharges directly into Lake Van and that houses a large share of the urban population in the basin. Therefore, rather than representing all pollution sources at the basin scale, the study focuses on quantitatively identifying point sources that exert a high degree of pressure. Considering the current state of Lake Van and its basin, the impacts of point and diffuse pollution sources should be investigated on a basin-wide basis, and detailed periodic monitoring studies should be conducted. The pollution load values calculated in this study constitute an important basis for the proposed applications and future studies. In this respect, the study offers a holistic approach to the literature by presenting not only the environmental but also the technical and energy-based consequences of pollution load calculations.

5. REFERENCES

1. du Plessis, A. (2019) Current and future water scarcity and stress. In *Water as an Inescapable Risk. Springer Water,* Springer, Cham, 13-25.
2. Luo, T., Young, R. & Reig, P. (2015). Aqueduct projected water stress country rankings. *Technical Note, 16*, 1-16.
3. Yetiş, R., Atasoy, A.D., Demir Yetiş, A. ve Yeşilnacar, M.İ. (2018). Balıklıgöl havzası su kaynaklarının nitrat ve nitrit seviyelerinin belirlenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33*(1), 47-54.
4. Demir Yetiş, A. (2019). Bitlis Ahlat sazlıkları yüzey sularında bazı ağır metal düzeylerinin araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 34*(1), 1-12.
5. Haksevenler, B.H.G. ve Ayaz, S. (2021). Noktasal ve yayılı kirletici kaynaklarının yüzeysel su kalitesi üzerinde etkisi, Alaşehir Çayı alt havzası örneği. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 11*(4), 1258-1268.
6. McMahon, G., Tervelt, L. & Donehoo, W. (2007). *Methods for estimating annual wastewater nutrient loads in the southeastern United States* (No. 2007-1040). Geological Survey (US).
7. Uluçay, G.G.Ç. (2023). Çevresel tahribat ve kentsel büyüme ilişkisi: Van Gölü Havzası örneği. *Doktora tezi*. Mimar Sinan Fine Arts University, Turkey.
8. Yıldırım, Ü. (2020). Kaynağından Akdeniz'e Deliçay'ın (Mersin) debisi ve su kalitesinin değerlendirilmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10*(4), 1121-1135.

9. Zeydan, Ö., Özdoğan, N., Taştepe, P.Ş. ve Demirtaş, D. (2019). Kozlu Deresinde (Zonguldak) su kalitesinin incelenmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 5*(2), 187-197.

10. Hacısalihoğlu, S. ve Karaer, F. (2020). Uluabat Gölü noktasal kirletici kaynaklar ve kirlilik yükleri. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 6*(2), 258-267.

11. EU Water Framework Directive, (2019). Introduction to the EU water framework directive. *In: European Commission, Environment.* Web 8 Aug 2019.

12. European Communities, (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities L327*(43), 1-72

13. Meriç, B. (2004). Su kaynakları yönetimi ve Türkiye. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 28*(1), 27-38.

14. Sevinçli, B.G., Bedirhanoğlu, Ş. B. ve Karamaşa, Ç. (2025). Van Gölü Havzası kentlerinin su ve atıksu altyapı performanslarının LOPCOW-CRADIS bütünleşik ÇKKV yöntemi ile değerlendirilmesi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, *(Van Gölü Havzası Özel Sayısı)*, 186-207.

15. Bojanowski, D., Orlinska-Wozniak, P., Wilk, P. & Szalinska, E. (2022). Estimation of nutrient loads with the use of mass-balance and modelling approaches on the Wełna River catchment example (central Poland). *Sci. Rep. 12*, 13052.

16. Preisner, M., Neverova-Dziopak, E. & Kowalewski, Z. (2021). Mitigation of eutrophication caused by wastewater discharge: a simulation-based approach. *Ambio, 50*(2), 413-424.

17. Atıcı, A.A., Sepil, A. ve Şen, F. (2021). Van Gölü Havzası tuzlu sularının su kalitesi özellikleri ve ağır metal kirlilik indeksinin belirlenmesi. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 58*(2), 285-294.

18. Özgüven, A., Durak, A. ve Demir Yetiş, A. (2021). Van ili atıksu arıtma tesisleri işletme sorunları ve çözüm önerileri. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 10*(4), 1448-1463.

19. Özalp, S., Aydemir, B.S., Olgun, Ş., Şimşek, B., Elmacı, H., Evren, M., Emre, Ö., Aydın, M.B., Kurtuluş, O., Öcal, F., Can, A.Z., Yanmaz, M.N., Apa, R. ve Duman, T.Y. (2016). Van Gölü (Edremit Körfezi) kuvaterner çökellerinde tektonik deformasyonlar. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi, 153*, 45-61.

20. Yiğit, A., Turhan Irak, Z., Öztürk, D., Öztürk, E., Alpaslan, D., Şahan, T. & Aktaş, N. (2017). Determination of water quality by ion characterization of Van Lake water. *Igdir University Journal of the Institute of Science and Technology, 7*(4), 169-179.

21. TÜİK, (2025). *Van ilçelere göre demografik veriler.* Erişim tarihi: 02.06.2025.

22. VİÇDR (Van ili Çevre Durum Raporu), (2024). https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/van-2024-yili-cdr-2-20250807144409.pdf. Erişim tarihi: 11.12.2025.

23. ÇOB (Çevre ve Orman Bakanlığı), (2010). *Atıksu arıtma tesisleri teknik usuller tebliği.* 20 Mart 2010, RG No: 27527.

24. Tsuzuki, Y. (2006). An index directly indicates land-based pollutant load contributions of domestic wastewater to the water pollution and its application. *Science of the Total Environment, 370*(2-3), 425-440.

25. Erdoğan, N. (2017). Doğu Karadeniz Havzası'nda kirlilik yüklerinin değerlendirilmesi. *Yüksek lisans tezi.* Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye

26. (SYGM) Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, (2021). *Kuzey Ege nehir havza yönetim planı nihai rapor.*

27. OSIB, (2016*). Kuzey Ege Havzası çevre ve su kalitesi master plan nihai raporu.* Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Etüd, Planlama ve Tahsisler Dairesi Başkanlığı Ankara

28. SKKY, (2004). *Su kirliliği kontrolü yönetmeliği.* (Resmi Gazete Tarih:31 Aralık 2004 ve Sayı: 25687).

29. KAAY, (2006). *Kentsel atıksu arıtımı yönetmeliği.* (Resmî Gazete Tarihi: 08.01.2006 Sayısı: 26047)

30. APHA (American Public Health Association), (1999). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (20th ed.). Washington D.C.

31. Henze, M., van Loosdrecht, M.C.M., Ekama, G.A. & Brdjanovic, D. (2008). *Biological wastewater treatment: Principles, modelling and design.* IWA Publishing, London.

32. Uysal, O. G. ve Cebe, K. (2024). Kesikköprü baraj gölü havzasındaki noktasal kirlilik kaynaklarının etkilerinin belirlenmesi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10*(1), 84-101.

33. Spellman, F.R. (2013). *Handbook of water and wastewater treatment plant operations* (3rd ed.). CRC Press, Boca Raton.

34. Metcalf & Eddy, Inc. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education, New York.

35. WEF (Water Environment Federation), (2010). *Design of municipal wastewater treatment plants* (WEF Manual of Practice No. 8). McGraw-Hill.

36. Belia, E., Neumann, M. B., Benedetti, L., Johnson, B., Murthy, S. & Vanrolleghem, P. (Eds.). (2021). *Uncertainty in wastewater treatment design and operation.* IWA Publishing.

37. Mielcarek, A., Lubińska, R., Rodziewicz, J. & Janczukowicz, W. (2025). Energy efficiency assessment of wastewater treatment plants: Analyzing energy consumption and biogas recovery potential. *Energies, 18*(19), 5277.
38. Rosso, D., Larson, L.E. & Stenstrom, M.K. (2008). Aeration of large-scale municipal wastewater treatment plants: State of the art. *Water Science and Technology, 57*(7), 973-978.
39. WEF (Water Environment Federation) (2009) *Energy conservation in water and wastewater treatment facilities.* WEF Manual of Practice No. 32; McGraw-Hill: New York.
40. Longo, S., d'Antoni, B.M., Bongards, M., Chaparro, A., Cronrath, A., Fatone, F., ... & Hospido, A. (2016). Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement. *Applied Energy, 179*, 1251-1268.
41. Öztürk, İ., Dereli, R.K. ve Ersahin, M.E. (2015). *Atıksu arıtma tesislerinde enerji verimliliği ve iyi işletim pratikleri.* İSTAÇ Teknik Kitaplar Serisi-5, İstanbul, ISBN 978-605-63269-2-9
42. Canton, H. (2021). International energy agency-IEA. *In The Europa Directory of International Organizations 2021*, 684-686. Routledge.
43. Erşahin, M.E., Dereli, R.K., Özgün, H. & Öztürk, İ. (2017). Atıksu arıtma tesislerinde enerji verimliliğinin incelenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21*(2), 380-387.
44. Karagözoğlu, B.M. ve Yılmaz, Z. (2018) Atık su arıtma tesislerinde enerji tüketimiyle ilgili araştırma bulguları. *Uluslararası Kentsel Su ve Atıksu Yönetimi Sempozyumu*, Denizli, Türkiye, 25-27.
45. Longo, S., Mauricio-Iglesias, M., Soares, A., Campo, P., Fatone, F., Eusebi, A.L., ... & Hospido, A. (2019). ENERWATER-A standard method for assessing and improving the energy efficiency of wastewater treatment plants. *Applied Energy, 242*, 897-910.
46. Molinos-Senante, M. & Maziotis, A. (2022). Evaluation of energy efficiency of wastewater treatment plants: The influence of the technology and aging factors. *Applied Energy, 310*, 118535.
47. Li, Z., Lu, J. & Lu, J. (2024). Energy efficiency evaluation and optimization for wastewater treatment plant. *Desalination and Water Treatment, 319*, 100487.
48. Türkmenler, H. (2017). Atık su arıtma tesislerinde enerji verimliliği. *Politeknik Dergisi, 20*(2), 495-502.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 1 MART/MARCH 2026

Spectral Analysis of Electric Vehicle Dynamics for Battery Eccentricity Using a Full-Car Model under Random Road Excitation

Hikmet BAL [1,a]

[1]*OSTIM Technical University, Faculty of Engineering, Department of Aerospace Engineering, Ankara, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0001-9062-6469*

Article Info
Received : 27.02.2026
Accepted : 23.03.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1898814

Corresponding Author
Hikmet BAL
hikmet.bal@ostimteknik.edu.tr

Keywords
Vehicle dynamics
Electrical vehicle
Random vibrations
Spectral analysis
Battery eccentricity

***How to cite:** BAL, H., (2026). Spectral Analysis of Electric Vehicle Dynamics for Battery Eccentricity Using a Full-Car Model under Random Road Excitation. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(1), 227-240.*

ABSTRACT

Electrical-vehicle (EV) dynamics are significantly influenced by battery mass and the location. Therefore, the combined investigation of a 7-DoF model, random road excitation, and eccentric battery effects is necessary for more accurate characterization of vehicle dynamics. In this study, a 7-DoF EV full-vehicle model considering battery eccentricity is derived to examine the coupled heave–roll–pitch vibrations under random road excitation. A spectral method is employed for the solution. EV response spectra are obtained using the power-spectral-density (PSD) of road roughness and the EV frequency-response-functions (FRFs). RMS values of response are investigated for different battery eccentricities and vehicle speeds [1-160km/h]. The results show that the normalized RMS varies up to ~30% total with EV speed and battery eccentricity. The highest RMS occur at vehicle speeds where the natural frequency is excited, while the lowest vibration RMS is obtained at low battery eccentricity on the x-axis. The developed EV model and solution method have been presented as a successful tool for investigating random vibrations and vehicle dynamics.

Elektrikli Araç Dinamiğinin Rastgele Yol Uyarısı Altında Tam Araç Modeli Kullanılarak Batarya Eksantrikliği için Spektral Analizi

Makale Bilgileri
Geliş : 27.02.2026
Kabul : 23.03.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1898814

Sorumlu Yazar
Hikmet BAL
hikmet.bal@ostimteknik.edu.tr

Anahtar Kelimeler
Taşıt dinamiği
Elektrikli araç
Düzensiz titreşimler
Spectral analiz
Batarya eksantrikliği

***Atıf şekli:** BAL, H., (2026). Elektrikli Araç Dinamiğinin Rastgele Yol Uyarısı Altında Tam Araç Modeli Kullanılarak Batarya Eksantrikliği için Spektral Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(1), 227-240.*

ÖZ

Elektrikli araç (EV) dinamiği, batarya kütlesi, ağırlık merkezinin konumundan önemli ölçüde etkilenmektedir. Dolayısıyla, 7-DoF modellemesi, rastgele yol uyarımı ve eksantrik batarya yerleşimi etkilerinin birlikte incelenmesi, araç dinamiğinin daha net belirlenebilmesi için gerekliliktir. Bu çalışmada, farklı araç hızları ve rastgele yol uyarımı altında birleşik yükselme-eğilme-yuvarlanma titreşim tepkilerini incelemek için 7-DoF tam araç modeli, batarya eksantrikliği de dikkate alınarak türetilmiştir. Çözüm için spectral metot kullanılmıştır. EV tepki spektrumları, yol pürüzlülüğünün güç spectral yoğunluğu (PSD) ve EV frekans-cevabı-fonksiyonundan (FRF) elde edilmiştir. Farklı batarya eksantriklikleri ve araç hızları [1-160km/s] için araç titreşiminin RMS'i hesaplanarak, titreşim davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, titreşim normalize RMS'sinin araç hızı ve batarya eksantrikliği ile toplamda ~%30'a kadar değişimini göstermektedir. En yüksek RMS genlikleri doğal frekansın uyarıldığı araç hızlarında iken, en düşük titreşim RMS'i, batarya eksantrikliğinin az olduğu, x-ekseni üzerindeki, konularda elde edilmiştir. Geliştirilen EV modeli ve çözüm metodu düzensiz titreşimlerin ve araç dinamiğinin incelenmesinde başarılı bir araç olarak sunulmuştur.

1. INTRODUCTION

Vehicle ride quality, safety, and passenger comfort are fundamentally governed by vehicle dynamics, particularly the interaction between suspension systems and road surface irregularities. In electric vehicles, battery center-of-gravity location significantly influences dynamic behavior. Consequently, modern vehicle design requires comprehensive understanding of vibrational responses to random road excitation, especially as the automotive industry transitions toward electric vehicles with heavy battery packs and altered mass distributions. Accurate prediction of vehicle dynamics under stochastic road inputs demands sophisticated mathematical models and appropriate spectral analysis techniques for handling non-stationary random processes.

The literature reveals extensive application of vehicle dynamic modeling approaches, random vibration analysis methodologies, and spectral techniques. The quarter-car model, representing the fundamental building block of vehicle suspension analysis, captures essential vertical motion characteristics with minimal computational complexity. While widely used in vehicle dynamics studies, this formulation cannot capture pitch, roll, or coupling effects between multiple wheels, restricting its applicability to preliminary vertical dynamics investigations.

Karaçay et al. [1] employed a 2-DOF quarter-car model to investigate ride characteristics of vehicles traversing rough surfaces at varying speeds. Recognizing that vehicle dynamics under changing speeds presents a non-stationary random vibration problem—as statistical characteristics of temporal excitation vary with velocity—Karaçay et al. [1] addressed this challenge through the "rubber band model". This approach enabled time/frequency domain analysis of vehicle response at changing velocities. Their results demonstrated that acceleration PSD increases dramatically with vehicle speed, natural frequencies appear as velocity-independent peaks in response spectra, and RMS acceleration levels—which determine ride comfort—can be directly computed from integrated PSD.

Half-vehicle models extend vertical dynamics analysis by incorporating rotational degrees of freedom, enabling investigation of pitch (longitudinal plane) or roll (lateral plane) coupling with vertical motions. Karaçay and Aktürk [2] developed a 2-DOF half-vehicle trailer model incorporating heave and roll motion about the longitudinal axis. They fitted road PSD with analytical functions to characterize both low spatial frequencies (long wavelengths) and high spatial frequencies (short wavelengths). For resonant response near natural frequencies, narrow-band analysis s applied assuming an underdamped system. Their study specifically addressed cargo safety under stochastic road-induced vibrations, establishing quantitative relationships between trailer mass, vehicle speed, and the probability of exceeding critical acceleration thresholds (1g) that could cause cargo damage or weightlessness. Results indicated that light trailers (50 kg) exhibited ~55% probability of exceeding 1g at 80 km/h on standard roads, medium trailers (150 kg) showed ~7% probability, while heavy trailers (250 kg) demonstrated only ~1% probability at the same speed.

Eroğlu [3] extended the model complexity by adding 5-DOF lateral motion of car body and wheels to a 7-DOF longitudinal-vertical model, incorporating 2-DOF driver vertical and lateral motions, yielding a comprehensive 14-DOF full-vehicle formulation. However, this study employed simple sinusoidal road inputs rather than stochastic excitation, preventing investigation of realistic road roughness effects on coupled vehicle dynamics.

Wang [4] investigated battery mass distribution effects on electric vehicle safety using a 4-DOF half-car model focused on vertical dynamics. The study demonstrated that battery mounting location directly affects pitch natural frequency and mode shapes, with centrally-mounted battery packs providing optimal dynamic characteristics by minimizing pitch-heave coupling.

Recognizing limitations of linear models for large-displacement scenarios and accurate representation of suspension component characteristics, Özdemir and Erdoğan [5] developed a 7-DOF nonlinear half-vehicle suspension model focusing on optimal battery location for electric vehicles. Results demonstrated that front-mounted batteries increased pitch response and degraded ride quality, rear-mounted batteries exhibited similar pitch amplification, while centrally-mounted batteries minimized pitch-heave coupling with optimal performance achieved within ±200mm of geometric center. Additionally, cubic damping

improved high-velocity impact absorption, with nonlinear effects becoming critical for heavy EV battery packs exceeding 500 kg.

Eroğlu et al. [6] presented an 8-DOF full-vehicle model incorporating 1-DOF driver vertical displacement, specifically designed for comparative active suspension control analysis. The model enabled evaluation of control strategies characterized by simple implementation, three tunable parameters, and effectiveness for steady-state disturbance rejection, though with limited performance for complex multi-modal dynamics. This study also employed deterministic road inputs.

The stochastic nature of road surface roughness necessitates probabilistic analysis frameworks based on random process theory. Bendat and Piersol [7] established fundamental relationships for analyzing random data, including power spectral density (PSD), cross-spectral density for correlated left and right wheel track inputs, and input-output relations for linear systems with transfer functions. Newland [8] extended spectral analysis to multi-degree-of-freedom mechanical systems, developing transfer function matrices for MDOF systems, multi-input spectral analysis for systems with multiple correlated inputs, modal analysis of random vibration expressing response in terms of system modes, and time-varying system analysis for non-stationary random processes. These theoretical frameworks provide the foundation for converting spatial road profile measurements into temporal frequency-domain representations and computing vehicle response statistics.

The emergence of electric vehicles introduces concerns regarding vibration-induced degradation of sensitive components, particularly lithium-ion battery systems constituting significant vehicle mass and cost. Hua and Thomas [9] provided a comprehensive review examining dynamic loads and vibration effects on lithium-ion batteries across multiple applications, primarily identifying battery degradation concerns. Brand et al. [10] conducted standardized vibration tests (UN 38.3 T3 sine sweep, UN 38.3 T4 shock) on cylindrical 18650 cells, revealing that internal components such as electrodes can detach from proper mounting, causing intermittent electrical contact and progressive wear-accelerated degradation. Somerville et al. [11] demonstrated that solid-electrolyte interphase (SEI) layer disruption by vibration increases internal resistance and capacity fade. Consequently, vibration influence on discharge performance has been expressed by Hooper et al. [12,13] and Zhang et al. [14,15].

Vehicle dynamics under random road excitation has gained momentum in recent research, with studies addressing both structural vibration behavior and energy system performance. The vibration characteristics of structural components such as composite wings and UAV frames have been extensively analyzed through finite element methods to determine natural frequencies and mode shapes under various boundary conditions [16,17]. Simultaneously, the integration of electric vehicle battery systems into vehicle platforms requires consideration many parameter [18]. Lu [19] demonstrated that vibration amplitude is highly sensitive to small geometric variations, with optimal cell spacing significantly reducing pack-level resonance.

Hooper and Marco [20,21] measured actual vibration exposure in battery electric vehicles, identifying frequency-dependent contributions: low frequency (<10 Hz) dominated by vehicle body modes (heave, pitch, roll) providing dominant battery pack loading; medium frequency (10-50 Hz) associated with wheel hop and axle tramp modes; and high frequency (>200 Hz) attributable to power electronics switching noise, electric motor electromagnetic excitation, and cooling pump/fan rotation. Lang and Kjell [22] concluded that standard battery vibration tests remain inadequate for realistic EV conditions.

Despite extensive research on vehicle dynamics, such as adopt simplified quarter/half-car models or treat the battery pack as a symmetric and centric installed, a critical gap remains in the literature regarding studies that simultaneously integrate 7-DOF modeling, random road excitation, spectral analysis methods, and eccentric battery placement effects simultenously.

Hence, in this study, a novel comprehensive 7-DOF electrical vehicle dynamics model is presented with considering eccentric battery placement for analysing coupled pitch-roll-heave vibrations under random road excitation. To characterize how battery CG eccentricity influences vibration response, stochastic theory is used rather than deterministic approach, with including inter-DOF coupling across a wide speed range (~1–160 km/h). Thus, in realistic driving conditions, how battery CG eccentricity is affects PSD, FRF, displacement RMS, involving inter-DOF coupling, have been quantified. Real road profiles from the

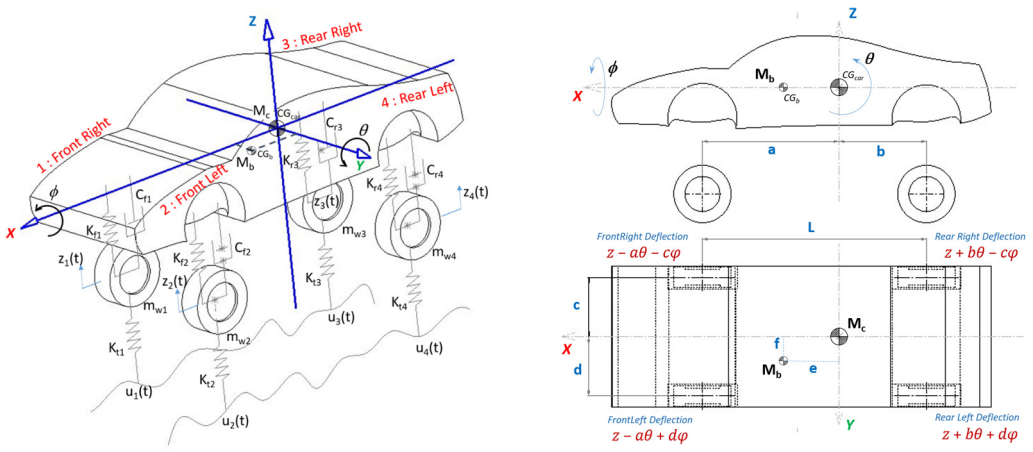
UMTRI database are employed to characterize stochastic inputs. Spatial road roughness is transformed to vibration PSD's via FRF multiplication, providing a spectral prediction method. Therefore, the main contributions of this are establishing a combined 7-DOF formulation, the velocity-dependent resonance characteristics and cross-coupling amplification mechanisms that arise specifically from battery eccentricity and random road input in EVs. The proposed modeling approach, solution algorithm and results have direct practical significance for EV chassis design, battery/payload mounting optimization, and ride comfort assessment under realistic operating conditions.

2. MODELLING

2.1. Electrical Car Model with Battery Eccentricity

To obtain the vibration behavior of the electric vehicle, the vehicle dynamics modeling approach is adopted [23,24]. However, since battery eccentricity affects vehicle dynamics, this effect is taken into account in the developed model. Thus, a novel model is created within the scope of this study that it is enabling the investigation of the effects of battery eccentricity on vibration behavior and allowing the analysis of different payload positioning problems also. The geometric parameters and degrees of freedom for the developed model are shown in Figure 1(a,b).

Seven degrees of freedom are used in the modeling of the electric vehicle, with the vehicle body movement having 3 DoF (heave – z, roll – ϕ, pitch – θ) and each wheel vertical displacement movement (z_1, z_2, z_3, z_4) having one DoF. It is assumed that the battery is rigidly mounted within the x–y plane, with its eccentricity located at distances e and f from the CG along the x and y axes, respectively. In Figure 1(a), $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$, $u_4(t)$ represent the road input.



(a) (b)

Figure 1. Electrical Vehicle model (a) 7DoF with Eccentric Battery (b) geometry and corner displacements

The equations of motion are obtained from Newton's 2nd law as shown in Equations 1-7 by considering the electrical vehicle's deflections and rotation around static equilibrium position with small oscillations assumption.

$$\begin{aligned}&(M_c+M_b)\ddot{z}+(c_{f1}+c_{f2}+c_{r3}+c_{r4})\dot{z}+(k_{f1}+k_{f2}+k_{r3}+k_{r4})z\\&-[a(c_{f1}+c_{f2})-b(c_{r3}+c_{r4})]\dot{\theta}-[a(k_{f1}+k_{f2})-b(k_{r3}+k_{r4})]\theta\\&-[c(c_{f1}+c_{r3})-d(c_{f2}+c_{r4})]\dot{\phi}-[c(k_{f1}+k_{r3})-d(k_{f2}+k_{r4})]\phi\\&-c_{f1}\dot{z}_1-c_{f2}\dot{z}_2-c_{r3}\dot{z}_3-c_{r4}\dot{z}_4-k_{f1}z_1-k_{f2}z_2-k_{r3}z_3-k_{r4}z_4=0\end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}&(I_{xx}+M_bf^2)\ddot{\phi}-M_bef\ddot{\theta}\\&+[c^2(c_{f1}+c_{r3})+d^2(c_{f2}+c_{r4})]\dot{\phi}+[c^2(k_{f1}+k_{r3})+d^2(k_{f2}+k_{r4})]\phi\\&-[-c(ac_{f1}-bc_{r3})+d(ac_{f2}-bc_{r4})]\dot{\theta}-[-c(ak_{f1}-bk_{r3})+d(ak_{f2}-bk_{r4})]\theta\\&-[c(c_{f1}+c_{r3})-d(c_{f2}+c_{r4})]\dot{z}-[c(k_{f1}+k_{r3})-d(k_{f2}+k_{r4})]z\\&+cc_{f1}\dot{z}_1-dc_{f2}\dot{z}_2+cc_{r3}\dot{z}_3-dc_{r4}\dot{z}_4+ck_{f1}z_1-dk_{f2}z_2+ck_{r3}z_3-dk_{r4}z_4=0\end{aligned} \quad (2)$$

$$
\begin{aligned}
&(I_{yy}+M_b e^2)\ddot{\theta} - M_b ef\ddot{\phi} \\
&+\left[a^2(c_{f1}+c_{f2})+b^2(c_{r3}+c_{r4})\right]\dot{\theta} + \left[a^2(k_{f1}+k_{f2})+b^2(k_{r3}+k_{r4})\right]\theta \\
&-\left[-a(cc_{f1}-dc_{f2})+b(cc_{r3}-dc_{r4})\right]\dot{\phi} - \left[-a(ck_{f1}-dk_{f2})+b(ck_{r3}-dk_{r4})\right]\phi \\
&-\left[a(c_{f1}+c_{f2})-b(c_{r3}+c_{r4})\right]\dot{z} - \left[a(k_{f1}+k_{f2})-b(k_{r3}+k_{r4})\right]z \\
&+ac_{f1}\dot{z}_1 + ac_{f2}\dot{z}_2 - bc_{r3}\dot{z}_3 - bc_{r4}\dot{z}_4 + ak_{f1}z_1 + ak_{f2}z_2 - bk_{r3}z_3 - bk_{r4}z_4 = 0
\end{aligned} \tag{3}
$$

$$m_{w1}\ddot{z}_1 + c_{f1}\dot{z}_1 + (k_{f1}+k_{t1})z_1 - c_{f1}(\dot{z} - c\dot{\phi} - a\dot{\theta}) - k_{f1}(z - c\phi - a\theta) = k_{t1}u_1 \tag{4}$$

$$m_{w2}\ddot{z}_2 + c_{f2}\dot{z}_2 + (k_{f2}+k_{t2})z_2 - c_{f2}(\dot{z} + d\dot{\phi} - a\dot{\theta}) - k_{f2}(z + d\phi - a\theta) = k_{t2}u_2 \tag{5}$$

$$m_{w3}\ddot{z}_3 + c_{r3}\dot{z}_3 + (k_{r3}+k_{t3})z_3 - c_{r3}(\dot{z} - c\dot{\phi} + b\dot{\theta}) - k_{r3}(z - c\phi + b\theta) = k_{t3}u_3 \tag{6}$$

$$m_{w4}\ddot{z}_4 + c_{r4}\dot{z}_4 + (k_{r4}+k_{t4})z_4 - c_{r4}(\dot{z} + d\dot{\phi} + b\dot{\theta}) - k_{r4}(z + d\phi + b\theta) = k_{t4}u_4 \tag{7}$$

In modeling, mass, spring, and damping coefficients are denoted by the letters M or m, c, k, respectively. Subscripts are used to distinguish between parameters and variables. The relevant subscripts c, b, f, r, t are used to denote car, battery, front, rear, tire, respectively. The geometric parameters a, b, c, d, e, f, L are presented in Figure 1(b). If the equations of motion are written in matrix form as in Equation 8, the M, C, and K matrices will be as follows by using generalized coordinates as $\{q\}^T = \{z \quad \phi \quad \theta \quad z_1 \quad z_2 \quad z_3 \quad z_4\}$.

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = [F]\{u\} \tag{8}$$

where;

$$[M] = \begin{bmatrix} M_c+M_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_{xx}+M_b f^2 & -M_b ef & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -M_b ef & I_{yy}+M_b e^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{w1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{w2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{w3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{w4} \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & -c_{f1} & -c_{f2} & -c_{r3} & -c_{r4} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & cc_{f1} & -dc_{f2} & cc_{r3} & -dc_{r4} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & ac_{f1} & ac_{f2} & -bc_{r3} & -bc_{r4} \\ -c_{f1} & cc_{f1} & ac_{f1} & c_{f1} & 0 & 0 & 0 \\ -c_{f2} & -dc_{f2} & ac_{f2} & 0 & c_{f2} & 0 & 0 \\ -c_{r3} & cc_{r3} & -bc_{r3} & 0 & 0 & c_{r3} & 0 \\ -c_{r4} & -dc_{r4} & -bc_{r4} & 0 & 0 & 0 & c_{r4} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
C_{11} &= c_{f1}+c_{f2}+c_{r3}+c_{r4} \\
C_{12} = C_{21} &= -\left[c(c_{f1}+c_{r3}) - d(c_{f2}+c_{r4})\right] \\
C_{13} = C_{31} &= -\left[a(c_{f1}+c_{f2}) - b(c_{r3}+c_{r4})\right] \\
C_{22} &= c^2(c_{f1}+c_{r3}) + d^2(c_{f2}+c_{r4}) \\
C_{23} = C_{32} &= -\left[-c(ac_{f1}-bc_{r3}) + d(ac_{f2}-bc_{r4})\right] \\
C_{33} &= a^2(c_{f1}+c_{f2}) + b^2(c_{r3}+c_{r4})
\end{aligned}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & -k_{f1} & -k_{f2} & -k_{r3} & -k_{r4} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & ck_{f1} & -dk_{f2} & ck_{r3} & -dk_{r4} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & ak_{f1} & ak_{f2} & -bk_{r3} & -bk_{r4} \\ -k_{f1} & ck_{f1} & ak_{f1} & k_{f1}+k_{t1} & 0 & 0 & 0 \\ -k_{f2} & -dk_{f2} & ak_{f2} & 0 & k_{f2}+k_{t2} & 0 & 0 \\ -k_{r3} & ck_{r3} & -bk_{r3} & 0 & 0 & k_{r3}+k_{t3} & 0 \\ -k_{r4} & -dk_{r4} & -bk_{r4} & 0 & 0 & 0 & k_{r4}+k_{t4} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
K_{11} &= k_{f1}+k_{f2}+k_{r3}+k_{r4} \\
K_{12} = K_{21} &= -\left[c(k_{f1}+k_{r3}) - d(k_{f2}+k_{r4})\right] \\
K_{13} = K_{31} &= -\left[a(k_{f1}+k_{f2}) - b(k_{r3}+k_{r4})\right] \\
K_{22} &= c^2(k_{f1}+k_{r3}) + d^2(k_{f2}+k_{r4}) \\
K_{23} = K_{32} &= -\left[-c(ak_{f1}-bk_{r3}) + d(ak_{f2}-bk_{r4})\right] \\
K_{33} &= a^2(k_{f1}+k_{f2}) + b^2(k_{r3}+k_{r4})
\end{aligned}$$

$$[F] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{t1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{t2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{t3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{t4} \end{bmatrix}$$

The static equilibrium position is calculated using the gravitational force matrix {W} and the [K] matrix, as in Equation 9, where $\{W\} = [-(M_c + M_b)g \quad -M_b gf \quad -M_b ge \quad -m_w g \quad -m_w g \quad -m_w g \quad -m_w g]^T$.

$$\{\delta_{st}\} = [K]^{-1}\{W\} \tag{9}$$

In MIMO systems, the system response can be obtained using approaches such as the transfer function, Laplace transform, convolution, or numerical solution methods, depending on the input. The relationship between the system input and the generalized coordinates, obtained by taking the Laplace transform of Equation 8, is shown in Equation 10. Here, [Q(s)] is the Laplace transform of the generalized coordinates, and [D(s)] is the dynamic stiffness matrix. Thus, the system response can be calculated using the transfer function G(s) with Equation 11 [25-27]. Since this study main objective heave, roll, and pitch motion relative to the road input, a [S] selection matrix is defined as [eye(3,3), zeros(3,4)].

$$\{Q(s)\} = \underbrace{(s^2[M] + s[C] + [K])^{-1}}_{D(s)}[F]\{U(s)\} \tag{10}$$

$$Y(s) = [S]\underbrace{[D(s)^{-1}][F]}_{G(s)}U(s) \tag{11}$$

Although Equation11 is commonly used for deterministic inputs, spectral methods are primarily used in random vibration analysis. In this study, the response of an electric vehicle with battery eccentricity to random road input is investigated using Equation 12 [7,8].

$$[S_{\gamma\gamma}(\omega)] = [H(\omega)][S_{uu}(\omega)][H(\omega)]^* \tag{12}$$

where, $[S_{\gamma\gamma}(\omega)]$, $[H(\omega)]$, $[S_{uu}(\omega)]$, $[H(\omega)]*$ are output PSD matrix, FRF matrix, input PSD matrix and complex conjugate transpose of FRF matrix respectively. Frequency Response Function (FRF) can be obtained substituting jω in Equation 13 [27].

$$[H(j\omega)] = \left[-\omega^2[M] + j\omega[C] + [K]\right]^{-1}[F] \tag{13}$$

Therefore, characteristic polynomial obtained as Equation 14.

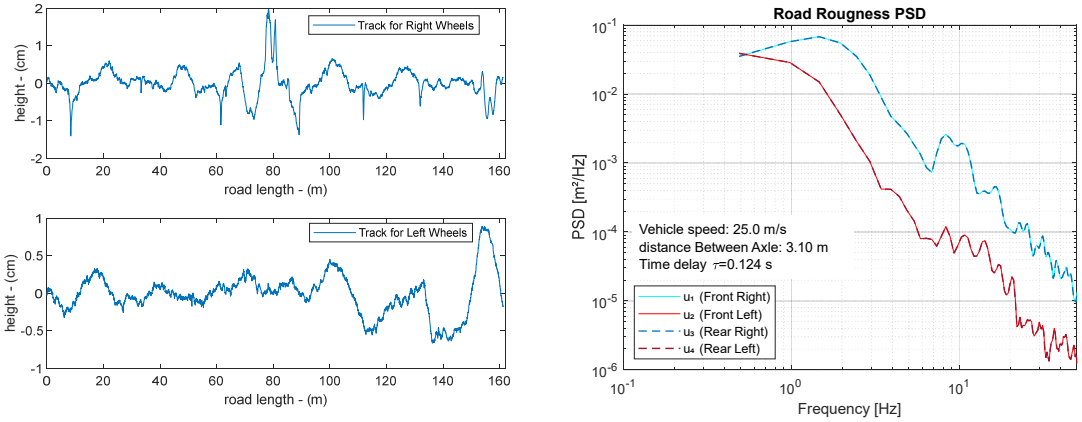
$$\begin{aligned} &s^{14} + 169.9\,s^{13} + 2.924\times10^4\,s^{12} + 2.728\times10^6\,s^{11} + 2.408\times10^8\,s^{10} + 1.379\times10^{10}\,s^9 \\ &+7.357\times10^{11}\,s^8 + 2.472\times10^{13}\,s^7 + 7.692\times10^{14}\,s^6 + 1.142\times10^{16}\,s^5 + 1.665\times10^{17}\,s^4 \\ &+1.294\times10^{18}\,s^3 + 1.061\times10^{19}\,s^2 + 3.818\times10^{19}\,s + 1.765\times10^{20} = 0 \end{aligned} \tag{14}$$

2.2. Excitation Caused by Random Roughness Profile of Road

During real road driving, the right and left wheels will be subjected to separate road profile tracks. Therefore, UMTRI road data is used separately for the right and left wheels as the road model. However, between the front and rear wheels, there is also a phase delay depending on the vehicle's speed, and they are subjected to the same road profile. In other word, the right front wheel is exposed to the input representing the road roughness in Figure 2(a), and the same road input acting for the right rear wheel with a phase delay of σ time. Similarly, the left front wheel is exposed to the input representing the road roughness in Figure 2(a), and the same road input occurs at the left rear wheel with a phase delay of σ time.

Thus, the road profile spectral density S_{uu} is obtained using matrix in Equation15 and presented in Figure 2(b). Where, the auto-PSD S_{LL}, S_{RR}, and cross-PSD S_{LR}, S_{RL} of each road input can be calculated using Eqautions16-19 [8,25,26].

$$[S_{uu}(\omega)] = \begin{bmatrix} S_{LL}(\omega) & S_{LR}(\omega) & S_{LL}(\omega)e^{-j\omega\sigma} & S_{LR}(\omega)e^{-j\omega\sigma} \\ S_{LR}(\omega) & S_{RR}(\omega) & S_{LR}(\omega)e^{-j\omega\sigma} & S_{RR}(\omega)e^{-j\omega\sigma} \\ S_{LL}(\omega)e^{j\omega\sigma} & S_{LR}(\omega)e^{j\omega\sigma} & S_{LL}(\omega) & S_{LR}(\omega) \\ S_{LR}(\omega)e^{j\omega\sigma} & S_{RR}(\omega)e^{j\omega\sigma} & S_{LR}(\omega) & S_{RR}(\omega) \end{bmatrix} \tag{15}$$



(a) (b)

Figure 2. Random Road Profile [28] (a) right wheels, (b) left wheels (c) PSD (S_{LL}, S_{RR})

$$S_{LL}(\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\left[\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T u_1(\sigma)u_1(\sigma+\tau)d\sigma\right]e^{-j\omega\tau}d\tau \quad (16)$$

$$S_{RR}(\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\left[\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T u_2(\sigma)u_2(\sigma+\tau)d\sigma\right]e^{-j\omega\tau}d\tau \quad (17)$$

$$S_{LR}(\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\left[\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T u_1(\sigma)u_2(\sigma+\tau)d\sigma\right]e^{-j\omega\tau}d\tau \quad (18)$$

$$S_{RL}(\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\left[\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T u_2(\sigma)u_1(\sigma+\tau)d\sigma\right]e^{-j\omega\tau}d\tau \quad (19)$$

where $\sigma = \frac{L}{V} = \frac{a+b}{V}$

3. NUMERICAL SIMULATION

The spectral method is used to obtain the response of the full vehicle model with battery eccentricity to the random road input. Hereby, the solution of Equation12 is obtained from the FRF and the road PSD. The vehicle displacement RMS values for the random road profile input is calculated from integration of the vehicle spectral response obtained from Equation12 wrt to the frequency vector. The system responses are obtained in the MATLAB by developed code for 9 separate battery eccentricity cases ans different vehicle speeds in increments of 1 m/s, in the speed range from 1 m/s to 45 m/s [~0 – 160 km/h]. Two separate road profiles are used for the right and left wheels.

The driving and battery eccentricity cases used in the simulation are presented in Table 1. Battery eccentricity is also shown in Figure 3. The parameters and values used for the numerical analysis are given in Table 2. The solution algorithm is given in Figure 4.

Table 1. Simulation cases

Case studies	Battery eccentricity	Eccentricity values		Speed (m/s)	Road profile
		e (m)	f (m)		
1	at car CG (concentric)	0.0	0.0	[1:1:46]	Profil-1 Profil-2
2	at Front Right	0.3	-0.2		
3	at Front Left	0.3	0.2		
4	at Rear Right	-0.3	-0.2		
5	at Rear Left	-0.3	0.2		
6	at Front Center (away from car CG)	0.6	0		
7	at Front Center (close to car CG)	0.3	0		
8	at Rear Center (close to car CG)	-0.3	0		
9	at Rear Center (away from car CG)	-0.6	0		

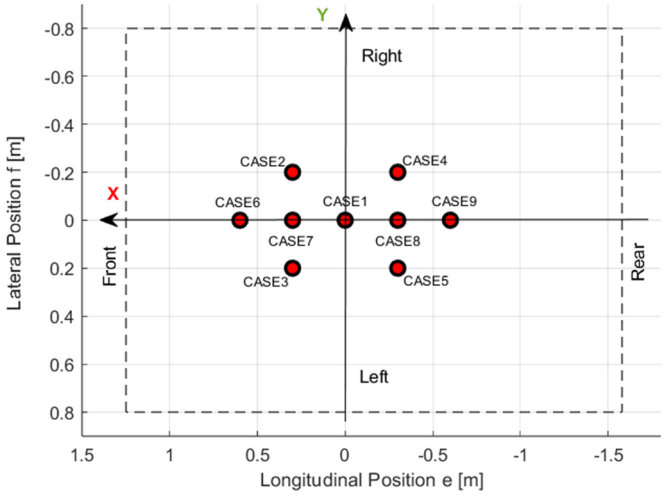


Figure 3. Battery eccentricity locations for each case

Table 2. Simulation data

Inertia			Geometry			Suspension damping			Suspension stiffness			Tire stiffness		
M_c	1500	kg	a	1.4	m	c_{f1}	1800	N·s/m	k_{f1}	25000	N/m	k_{t1}	180000	N/m
M_b	300	kg	b	1.7	m	c_{f2}	1800	N·s/m	k_{f2}	25000	N/m	k_{t2}	180000	N/m
I_{xx}	733.5	kg·m^2	c	0.8	m	c_{r3}	1600	N·s/m	k_{r3}	24000	N/m	k_{t3}	180000	N/m
I_{yy}	1806	kg·m^2	d	0.8	m	c_{r4}	1600	N·s/m	k_{r4}	24000	N/m	k_{t4}	180000	N/m
m_w	45	kg	h	1.5	m									

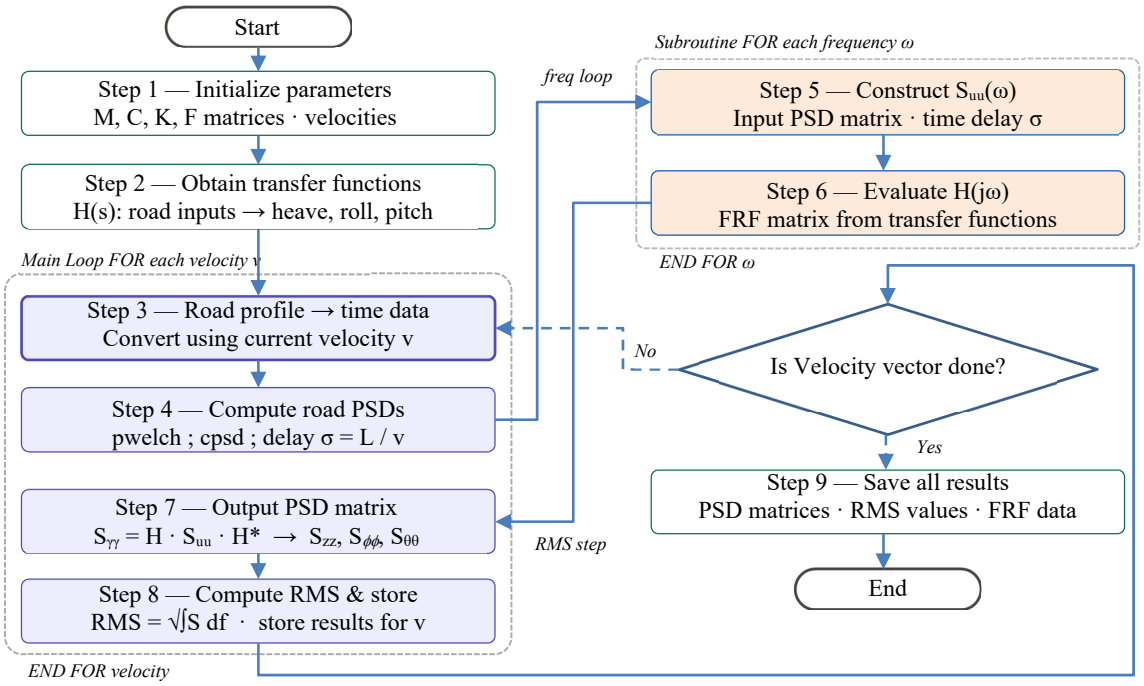


Figure 4. Flowchart of solution algorithm

4. RESULTS AND DISCUSSION

PSD graphs are presented in Figure 5. Here, there are speed-dependent frequencies and speed-independent fixed resonance frequencies. Speed-dependent frequencies are road-related, while speed-independent frequencies are vehicle-related frequencies, such as natural frequencies.

As seen in Figure 5, the vehicle displacement response PSD is high at low frequencies, and the displacement response PSD decreases with increased speed. A shoulder formed at the same frequency for all speed values in the PSD graphs contains harmonics that excite the vehicle's natural frequency. This peak located around 6 rad/s – 11 rad/s is indicates the natural frequency of the vehicle in heave-roll-pitch direction, while the peak occurring around 65 rad/s – 68 rad/s indicates the natural frequencies in the wheel z_1-z_4 direction. These peaks are more clearly visible in the Bode plot in Figure 6.

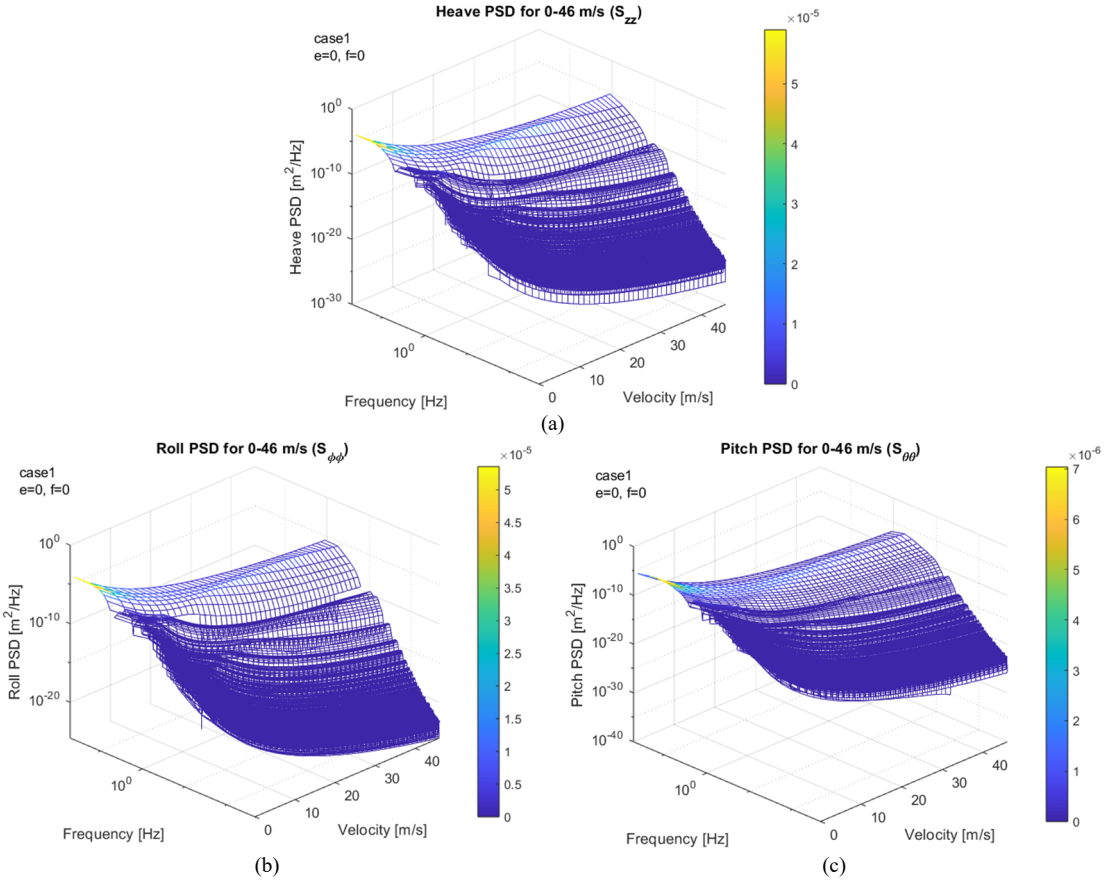


Figure 5. Response Power Spectral Density – PSD (*case1*) of (a) Heave motion, (b)Roll motion, (c) Pitch motion

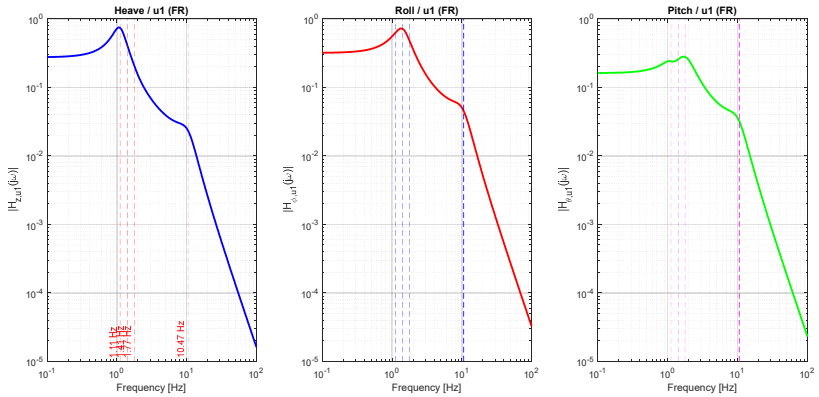


Figure 6. Frequency Response Function (FRF) magnitutes for road input u_1 (*case1*)

Since the displacement PSD of the road profile shows intensity in the low frequency range, the displacement response of the vehicle is seen to decrease with increasing frequency. The change in the displacement response PSD is given in Figure 7 for the specified speeds. Here, the decrease in PSD amplitude is seen to become more apparent as the natural frequency region is passed.

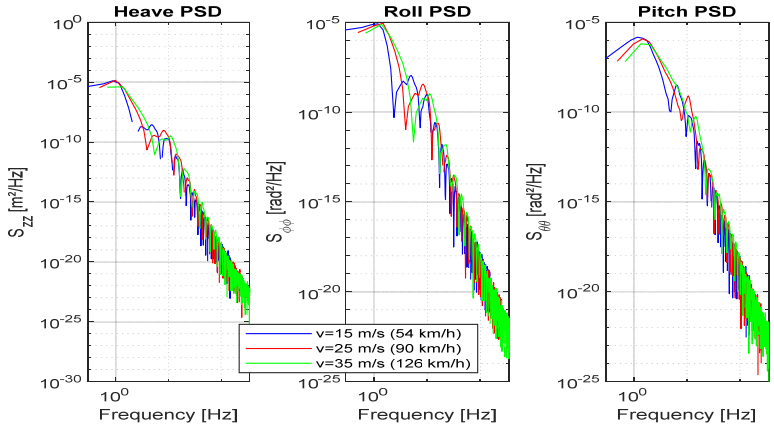
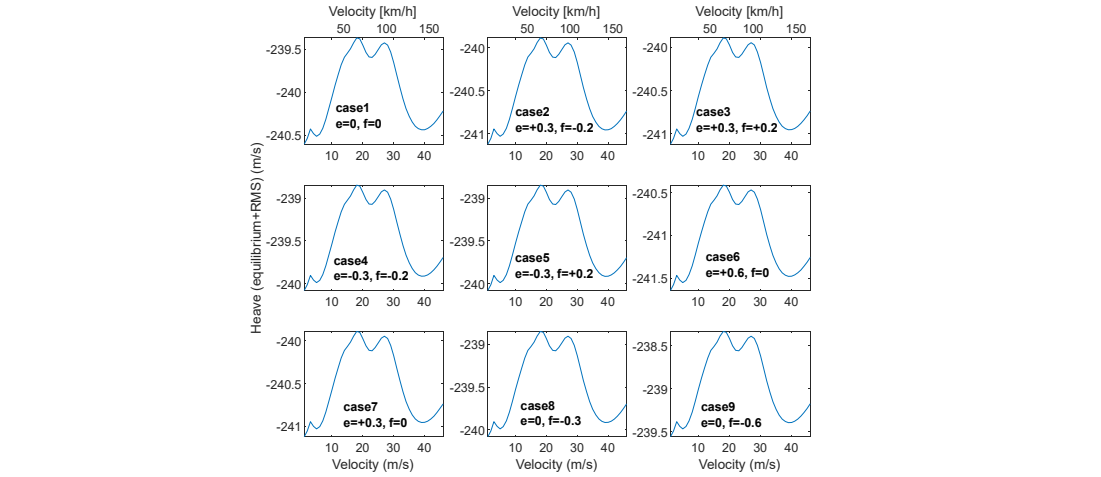


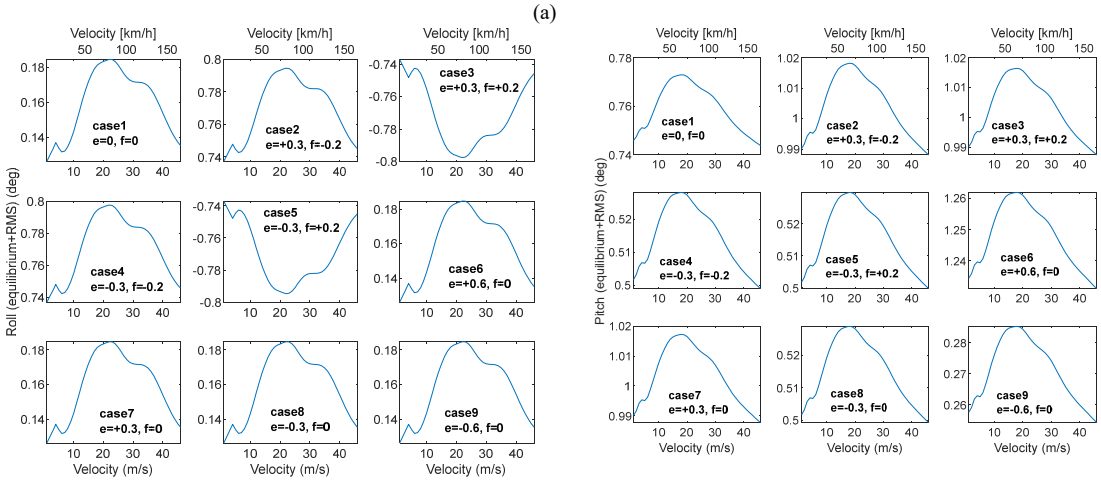
Figure 7. PSD magnitutes for different velocities (*case1*)

The RMS value of vehicle displacement can be calculated according to frequency using Equation 20 and it is represent the area under the PSD graphs. The use of RMS values instead of PSD is common in the literature. In this perspective, after obtaining response PSD's for all cases, the RMS values are calculated from the PSD's for each case study are presented in Figure 8.

$$x_{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} S_{xx}(f)\, df} \tag{20}$$



(a)



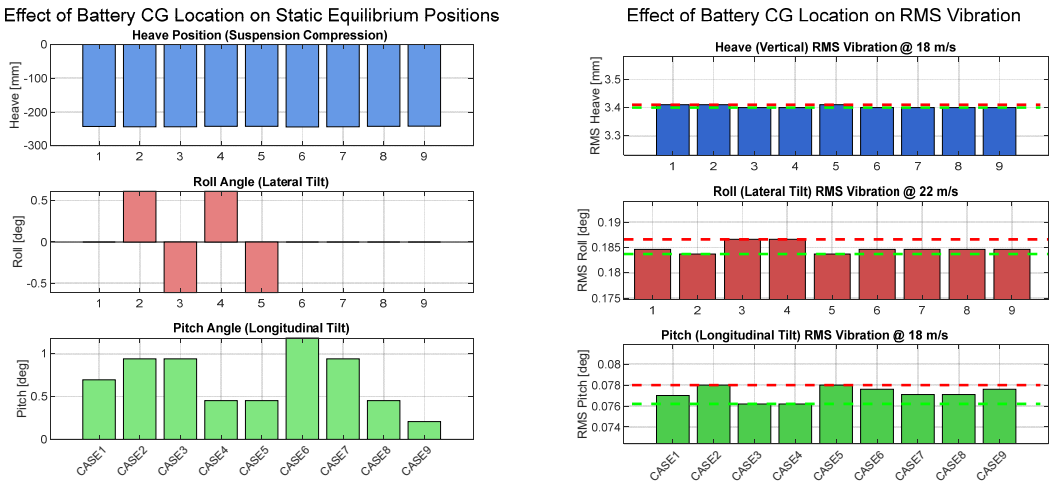
(b) (c)

Figure 8. Vibrations Root Mean Square – RMS values for all cases (a) Heave, (a) Roll, (c) Pitch

From the RMS graphs in Figure 8(a), it can be seen that maximum amplitudes occur at speeds of 18 m/s and 27 m/s for heave motion. Additionally, a local maximum is noticeable at 3 m/s. It is noted that amplitude increases occur at these speeds, particularly due to the excitation of natural frequencies between 1-3 Hz. This situation can also be seen in the PSD graph in Figure 5. However, it is observed in Figure 8(a) that the vehicle has different equilibrium points depending on the eccentricity of the battery and that the vehicle has heave roll and pitch oscillations around this equilibrium point. Results indicate that the smallest static equilibrium position is at -242.5 mm, where the battery eccentricity is at the -0.3 m in cases 4, 5, and 8. This is because the spring stiffness of the front and rear suspensions is different in the simulation and vehicle has positive pitch. The RMS amplitude of the dynamic oscillations is around 3.5 mm. These values will vary for different vehicle and battery masses and suspensions.

It is observed from Figure 8(b) that the Roll Motion RMS value differs particularly in case 3-5, which contains eccentricity (f=±0.2m) in the y direction. This is an expected result because the vehicle is symmetrical about the x-axis, and the eccentricity in the y direction changes the ± static equilibrium position. Local maximum amplitudes in the Roll motion RMS values are observed at speeds of 4 m/s, 22 m/s, and 34 m/s. It is evident in Figure 8(b) that the smallest Roll motion occurs when the battery CG is on the x-axis. The RMS amplitude of the dynamic oscillations is around 0.2 degrees.

Pitch RMS values for different battery eccentricities are presented in Figure 8(c). Local maximum values of 3 m/s and 18 m/s are observed in the pitch RMS value. This indicates that the pitch mode located 1 and 3 Hz interval, is excited by the road input at a vehicle speed of 18 m/s. Furthermore, it is observed that the variation of eccentricity on the x-axis mainly affects pitch oscillations, while the variation on the y-axis influences roll motion. Since, the vehicle CG is adjusted closer to the front of the vehicle configuration in the simulation, however, the stiffness and damping of the front and rear suspensions are selected differently. This creates a positive static equilibrium position for the pitch angle. Therefore, it is observed that the static equilibrium position decreased from 1.1844 degrees to 0.2076 degrees when the battery eccentricity shifts to the rear side. In addition, the RMS amplitude of the dynamic oscillations is determined to be around 0.1 degrees. These values are consistent with findings in the literature [1,29-31]. To compare the performance of the obtained results, the static equilibrium and dynamic RMS values are presented together in Figure 9(a,b).



(a) (b)

Figure 9. Effect of the battery eccentricity on vibration (a) Static equilibrium position, (b) RMS amplitutes

The effect of battery eccentricity on vibration RMS amplitudes is more clearly illustrated in Figure 9. The variation of the battery CG location along the x- and y-axes shifts the vehicle's static equilibrium position toward the direction of eccentricity, as shown in Figure 9(a). Examining the RMS values in Figure 9(b), it is observed that the effect of road excitation on heave motion is approximately 3.5 mm. For roll motion RMS amplitutes are obtained approximately 0.185 degrees about the static equilibrium position. The pitch RMS demonstrate that Case 3 and Case 4 exhibit minimum oscillation, while higher amplitudes are obtained in Case 2 and Case 5. This behavior can be explained by the coupling between heave, roll, and pitch motions, besides the left and right wheels be subjected to different road excitations.

To clarify the results in terms of vibration performance, the RMS values are normalized using the expression ((x − min) / (max − min)). Based on these normalized RMS values, an integrated vibration index is calculated by summing the normalized motions. The lowest vibration index is observed in Case 1, Case 7, and Case 8. These cases indicate the conditions that battery eccentricity only along the x-axis and closest to the vehicle CG. The graph corresponding to the combined vibration index obtained through RMS normalization is presented in Figure 10. Results show that a 0.3 m eccentricity on the x-axis produces an increase of ~8% in the normalized RMS value, while eccentricity on both the 0.3 m x-axis and 0.2 m y-axis produces an increase of ~30% in the normalized total RMS value, from Figure 10.

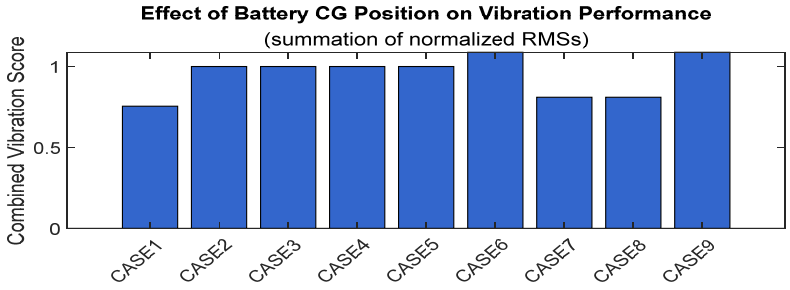


Figure 10. Compound vibration index

5. CONCLUSIONS

In this study, the effect of battery eccentricity variation on the vibration behavior of electric vehicles is investigated. For this purpose, an electirical vehicle with battery eccentricity is modelled with 7DoF. The heave, roll, and pitch vibrations of the derived electric vehicle model are calculated under random road excitation for different battery eccentricities and vehicle speeds using a spectral method. In the solution procedure, for each battery eccentricity, the vehicle displacement power spectral density is calculated for all vehicle speeds and corresponding frequencies by employing the road spectrum and FRF. Hereby, a method capable of determining the system response under nonstationary random inputs is presented, and the effect of battery CG position on vibration behavior is identified through the evaluation of vibration RMS values.

Results show that a 0.3 m eccentricity on the x-axis produces an increase of ~8% in the normalized RMS value, while eccentricity on both the 0.3 m x-axis and 0.2 m y-axis produces an increase of ~30% in the normalized RMS value. It is indicate that battery eccentricity or mounting imperfections has important contribution to vibtation response of EV. Therefore, it should be considered in vehicle dynamics response and riding comfort analysis.

The analyses related with vibration characteristics, yielded the following conclusions according to vehicle speed and different battery eccentricity:

- With vehicle speed increase, the displacement PSD decreases. High values occur within the natural frequency ranges of 6–11 rad/s and 65–68 rad/s. In the PSD diagram, it is observed as shoulder at these frequencies for all speeds.
- The highest PSD values are found at vehicle speeds of 3 m/s, 18 m/s, 22 m/s, and 27 m/s, corresponding to excitation near the vehicle's natural frequencies.
- The RMS values of random road excitation for heave, roll, and pitch motions are observed to be approximately 3.5 mm, 0.2 degrees, and 0.1 degrees, respectively. These values represent the RMS of vibrations about the static equilibrium position, which shifts significantly depending on battery eccentricity, as clearly shown in the graphs.
- The minimum roll motion occurs when the battery position lies along the x-axis.
- The RMS value of pitch oscillations increases as the battery position moves away from the vehicle CG. In addition, it is concluded that an increase in roll motion also influences pitch motion.
- Considering the vibration performance obtained from normalized RMS values, the optimal battery placement is achieved when the battery is located along the x-axis and close to the vehicle CG. Hence, Case 1, Case 7, and Case 8 correspond to the configurations with the lowest total vibration levels while Case 6 and Case 9 yields highest total vibration.

Finally, this paper contains following research potential as a future work; vibration reduction under the random road exitaion, bandwith improvement and resonance peak optimization, vibration control with different control action by employing active suspension, driving comfort for different payload position, vibration effect on state of charge and the life of the battery.

6. REFERENCES

1. Karaçay, T., Eroğlu, M. ve Aktürk, N. (2003). Gerçek yol girdisine maruz iki serbestlik dereceli çeyrek taşıt modelinin sürüş karakteristiğinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 18*(4), 1-13.
2. Karaçay, T. & Aktürk, N. (2002). Bir römorkunun tasarımında gelişigüzel titreşimlerin etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 17*(1), 11-30.
3. Eroğlu, M. (2022). Investigation of lateral and vertical direction dynamic responses of a full car model exposed to sine road input. *Sakarya University Journal of Science, 26*(4), 829-841.
4. Wang, P. (2020). Effect of electric battery mass distribution on electric vehicle movement safety. *Vibroengineering PROCEDIA, 33*, 78-83.
5. Özdemir, M. & Erdoğan, E.O. (2024). Determination of optimal battery locations for ride comfort in electric automobiles using a nonlinear half-vehicle suspension model. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 39*(1), 339-350.
6. Eroğlu, M., Koç, M.A., Kozan, R. & Esen, İ. (2022). Comparative analysis of full car model with driver using PID and LQR controllers. *International Journal of Automotive Science and Technology, 6*(2), 178-188.
7. Bendat, J.S., & Piersol, A.G. (2010). *Random data: Analysis and measurement procedures* (4th Ed). John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2010.
8. Newland, D.E. (2012). *An introduction to random vibrations, spectral & wavelet analysis* (3rd Ed). Dover Publications, Mineola, NY, 2012.
9. Hua, X. & Thomas, A. (2021). Effect of dynamic loads and vibrations on lithium-ion batteries. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 40*(4), 1927-1934.
10. Brand, M.J., Schuster, S.F., Bach, T., Lorrmann, E., Jossen, A. & Quinger, D. (2015). Effects of vibrations and shocks on lithium-ion cells. *Journal of Power Sources, 288*, 62-69.
11. Somerville, L., Hooper, J.M., Marco, J., McGordon, A., Lyness, C., Walker, M. & Jennings, P. (2017). Impact of vibration on the surface film of lithium-ion cells. *Energies, 10*(6), 741.
12. Hooper, J.M., Marco, J., Chouchelamane, G.H., & Lyness, E.D. (2016). Vibration durability testing of nickel manganese cobalt oxide (NMC) lithium-ion 18650 battery cells. *Energies, 9*(1), 52.
13. Hooper, J.M., Marco, J., Chouchelamane, G.H., Lyness, E.D. & Taylor, J. (2018). Multi-axis vibration durability testing of lithium ion 18650 NCA cylindrical cells. *Journal of Energy Storage, 15*, 103-123.
14. Zhang, L., Ning, Z., Peng, H., Mu, Z. & Sun, C. (2017). Effects of vibration on the electrical performance of lithium-ion cells based on mathematical statistics. *Applied Sciences, 7*(8), 802.
15. Zhang, L., Mu, Z. & Gao, X. (2018). Coupling analysis and performance study of commercial 18650 lithium-ion batteries under conditions of temperature and vibration. *Energies, 11*(11), 2856.
16. Sarı, B., Kazemi Lichaei, M. & Yıldırım, S. (2022). Free vibration analysis of tapered composite aircraft wing via the finite element method. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37*(3), 741-752.
17. Metin, M.A., Şentürk, K. ve Noorı, A.R. (2025). Hexacopter yapısındaki bir dron için gövde ana parçasının üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile serbest titreşim analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40*(2), 415-428.
18. 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.
19. Lu, J.C. (2018). Parametric reduced-order models for the structural dynamics of hybrid electric vehicle batteries. *PhD thesis.* University of Michigan, Ann Arbor, MI.
20. Hooper, J.M. & Marco, J. (2013). Understanding vibration frequencies experienced by electric vehicle batteries. *Proceedings of the IET Hybrid and Electric Vehicles Conference*, 1-6.

21. Hooper, J.M. & Marco, J. (2014). Characterising the in-vehicle vibration inputs to the high voltage battery of an electric vehicle. *Journal of Power Sources, 245*, 510-519.
22. Lang, J.F. & Kjell, G. (2015). Comparing vibration measurements in an electric vehicle with standard vibration requirements for Li-ion batteries using power spectral density analysis. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles, 7*(3), 272-286.
23. Wong, J.Y. (2022). *Theory of ground vehicles.* John Wiley & Sons.
24. Jazar, R.N. (2025). *Vehicle dynamics: theory and application.* Springer Nature.
25. Rao, S.S. & Yap, F.F. (1995). *Mechanical vibrations.* Addison-Wesley New York.
26. Inman, D.J. & Singh, R.C. (1994). *Engineering vibration.* Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ.
27. Ogata, K. (2020). *Modern control engineering.* Prentice Hall, NJ.
28. University of Michigan Transportation Research Institute (UMTRI) (2023). *Road profile measurement database.* Available: www.umtri.umich.edu, Ann Arbor, MI.
29. Bakar, S.A.A., Masuda, R., Hashimoto, H., Inaba, T., Jamaluddin, H., Rahman, R.A. & Samin, P.M. (2012). Ride comfort performance of electric vehicle conversion with active suspension system. *Proceedings of SICE Annual Conference (SICE),* 1980-1985.
30. Dumitriu, D., Chiroiu, V. & Munteanu, L. (2015). Simplified 7 DOF model of car vertical vibrations for small pitch and roll angles. *Applied Mechanics and Materials, 801*, 136-141.
31. Sulaiman, S., Samin, P.M., Jamaluddin, H., Rahman, R.A. & Burhaumudin, M.S. (2012). Modeling and validation of 7-DOF ride model for heavy vehicle. *Proceedings of the ICAMME*.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 1 MART/MARCH 2026

Doğal Gaz Tesisat Firmalarının Gelecek İş Hacminin Tahmini: Mevsimsel ve Kısa Vadeli Dinamiklerin Mevsimsel Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (SARIMA) Modeli ile Analizi

Selin SARAÇ GÜLERYÜZ [1,a], **Fikri EGE** [1,b]

[1]*Toros Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0002-4729-0637; [b]**ORCID**: 0000-0002-9045-4975*

Makale Bilgileri

Geliş : 10.09.2025
Kabul : 23.03.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1781580

Sorumlu Yazar

Selin SARAÇ GÜLERYÜZ
selin.sarac@toros.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Zaman serisi tahminleme
ARIMA
SARIMA
Doğal gaz

***Atıf şekli:** SARAÇ GÜLERYÜZ, S., EGE, F., (2026). Doğal Gaz Tesisat Firmalarının Gelecek İş Hacminin Tahmini: Mevsimsel ve Kısa Vadeli Dinamiklerin Mevsimsel Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (SARIMA) Modeli ile Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(1), 241-252.*

ÖZ

Bu çalışmada Mersin ilindeki doğal gaz tesisat firmalarının gelecekteki iş hacimleri zaman serisi yöntemleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Mevsimsel Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (SARIMA) modeli, mevsimsel bileşenlerin ve kısa vadeli dinamiklerin modellenmesi için kullanılmıştır. 2011 yılından itibaren 10 yıl boyunca toplanan aylık yeni abone sayısı verisi analiz edilmiştir. Durağanlık ADF testi ile sınanmış, model parametreleri ACF ve PACF grafikleri incelenerek $(1,0,0)(0,1,2)_{[12]}$ olarak belirlenmiştir. Modelin doğruluğu MAPE ve R^2 kriterleri ile değerlendirilmiş; sırasıyla %16,51 ve 0,81 değerleri elde edilmiştir. Tahmin sonuçları, mevsimsel değişimlerin işletme planlamalarında belirleyici bir rol oynadığını göstermekte; firmaların insan kaynakları, stok yönetimi ve pazarlama stratejilerinde mevsimselliği esas almaları gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu çalışma, doğal gaz tesisat sektöründeki işletmelere stratejik karar alma süreçlerinde uygulanabilir ve veri temelli bilgiler sunmaktadır.

Forecasting Future Business Volume of Natural Gas Installation Companies: Analysis of Seasonal and Short-Term Dynamics Using the Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (SARIMA) Model

Article Info

Received : 10.09.2025
Accepted : 23.03.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1781580

Corresponding Author

Selin SARAÇ GÜLERYÜZ
selin.sarac@toros.edu.tr

Keywords

Time series forecasting
ARIMA
SARIMA
Natural gas

***How to cite:** SARAÇ GÜLERYÜZ, S., EGE, F., (2026). Forecasting Future Business Volume of Natural Gas Installation Companies: Analysis of Seasonal and Short-Term Dynamics Using the Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (SARIMA) Model. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(1), 241-252.*

ABSTRACT

This study forecasts the future business volume of natural gas installation companies in Mersin province using time series methods. The Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (SARIMA) model was employed to capture seasonal components and short-term dynamics. Monthly new subscriber data collected over a 10-year period starting from 2011 were analyzed. Stationarity was verified using the Augmented Dickey-Fuller (ADF) test, and model parameters were identified as $(1,0,0)$ $(0,1,2)_{[12]}$ through ACF and PACF analysis. Model accuracy was assessed via MAPE and R^2, yielding values of 16.51% and 0.81, respectively. The results reveal that seasonal fluctuations in natural gas demand play a decisive role in business planning, highlighting the need for companies to incorporate seasonality into human resources, inventory, and marketing decisions. This study provides actionable and data-driven insights for strategic decision-making in the natural gas installation sector.

1. GİRİŞ

Doğal gaz tüketimi, toplumun yaşam koşullarını ve ekonomik düzeylerini yansıtmak adına çok önemli bir belirtidir ve belirsiz faktörlerden etkilenmektedir.

Enerji tarih boyunca toplumların gelişimi ve sosyal yapısı açısından önemli bir faktör olmuştur. Günümüzde dünyanın enerji ihtiyacının %86'sı fosil enerji kaynaklarından kaynaklanmaktadır [1]. Petrol dünyadaki en yaygın enerji kaynağıdır ve onu kömür ve doğal gaz izlemektedir.

Ülkemize üç ayrı noktadan boru hatları aracılığıyla doğal gaz gelmektedir. Bunlardan Trakya ve Karadeniz üzerinden gelen hatlarla Rusya'dan, Doğu Anadolu hattı ile de İran'dan alınan gaz Türkiye'ye ulaşmaktadır. Ayrıca Tekirdağ Marmara Ereğli'de bulunan sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) santralı ile de aynı boru hattı sistemine Nijerya ve Cezayir'den sıvılaştırılmış olarak alınan doğal gaz verilmektedir.

Doğal gaz tüketiminin önceden tahmin edilmesi çeşitli nedenlerle önemlidir. Tahminlemenin doğruluğu yatırımları ve operasyonel işleri de doğrudan etkileyecektir. Bu nedenlerden dolayı, doğal gazın başarılı olarak yapılacak talep tahmini, doğal gaz yönetim süreçlerinin tüm yönleriyle ilgili önemli bir faktördür.

Bu çalışmada Mersin ilindeki doğal gaz firmalarının gelecekteki iş hacimleri zaman serisi yöntemleri kullanılarak tahminlenmiştir. Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (ARIMA) modeli mevsimsel bileşenlerin ve kısa vadeli dinamiklerin modellenmesi için kullanılmıştır.

Bu çalışmanın literatüre katkısı şu şekilde özetlenebilir. Öncelikle Türkiye'de doğal gaz tesisat alanında tüketici sayısının ARIMA yöntemiyle tahminlenmesi üzerine bilenen ilk çalışmalardan birini oluşturmaktadır. Mevcut literatür büyük ölçüde doğal gaz tüketim miktarına odaklanırken, bu çalışma tesisat firmalarının iş hacmini doğrudan etkileyen yeni abone sayısını ele almakta ve bu alandaki eksikliği gidermektedir. Mevsimsel ARIMA yapısının bölgesel düzeyde aylık talep dinamiklerine uygulanması, operasyonel planlama açısından somut ve uygulanabilir sonuçlar ortaya koymaktadır. Elde edilen tahmin sonuçları, tesisat firmalarının stratejik insan kaynağı planlaması, envanter yönetimi ve pazarlama kararlarına yönelik ve doğrudan uygulanabilir öneriler sunmaktadır.

Doğal gaz tüketiminin ve talebinin tahminlenmesi, enerji planlaması, arz güvenliği ve işletme yönetimi açısından kritik bir araştırma alanı oluşturmakta; bu alanda istatistiksel zaman serisi yöntemlerinden makine öğrenmesine uzanan geniş bir yöntemsel yelpazede çalışmalar yürütülmektedir. Tahmin modelleri genel olarak tek ve birleşik modeller olarak sınıflandırılmakta; tek modeller ise istatistiksel modeller, makine öğrenmesi modelleri, gri modeller ve bulanık mantık başlıkları altında incelenmektedir [2].

İstatistiksel zaman serisi yöntemleri arasında ARIMA ve türevleri, yorumlanabilirliği, veri etkinliği ve yerleşik teorik altyapısı sayesinde doğal gaz talebinin modellenmesinde tarihsel olarak en yaygın kullanılan yaklaşımlar arasında yer almaktadır. Ediger ve Akar [3], Türkiye'nin birincil enerji talebini yakıt türlerine göre ARIMA modeliyle 2005-2020 dönemine ait öngörüler üretmiş; modelin trend içeren zaman serilerinde tatmin edici sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Benzer bir yaklaşımla Akkurt ve arkadaşları [4], Türkiye'nin doğal gaz tüketimini aylık ve yıllık bazda Box-Jenkins yöntemleriyle modelleyerek SARIMA(0,0,2)(1,1,0) yapısının ARIMA'ya kıyasla daha iyi tahmin performansı sergilediğini göstermiştir. Tümse [5], ARIMA ve derin öğrenme yöntemlerini karşılaştırmalı olarak değerlendirdiği çalışmasında istatistiksel zaman serisi modellerinin özellikle kısa vadeli tahminlerde yorumlanabilirlik ve güvenilirlik açısından rekabetçi konumunu koruduğunu ortaya koymuştur.

Türkiye'nin hem enerji ithalatçısı bir ülke hem de bölgesel dağıtım piyasasına sahip olması, bölge ve şehir ölçeğindeki çalışmaları da ön plana çıkarmaktadır. Bu bağlamda Akpınar ve arkadaşları [6], Türkiye'nin Sakarya ilindeki konut ve düşük tüketimli ticari abonelere ait aylık doğal gaz verilerini zaman serisi ayrıştırma, Holt-Winters ve ARIMA yöntemleriyle modelleyerek ARIMA için rekabetçi bir performans sergilediğini raporlamıştır. Yine alanda bir başka çalışma yapan Akpınar ve arkadaşları [7] ise ARIMA modelini Türkiye'deki konut tüketicilerine uygulamış; zaman serisinden mevsimsel döngü bileşeninin çıkarılarak benzer ayların ayrı modeller halinde tahmin edilmesi yaklaşımının standart tek-model ARIMA'ya kıyasla MAPE değerini yaklaşık %2,2 oranında iyileştirdiğini göstermiştir. Tekin ve arkadaşları [8], Mersin iline ait enerji tüketim verilerini ARIMA yöntemiyle modelleyerek bölge ölçeğindeki istatistiksel tahmin yaklaşımlarının uygulanabilirliğini ortaya koymuştur. Türkiye

bağlamındaki en kapsamlı aylık ölçek çalışmalarından biri olan ve Bursa ile Kayseri illerini kapsayan araştırmada Alakent ve arkadaşları [9], 2014-2024 dönemi SOCAR verilerini kullanarak SARIMA ve üstel düzleştirme modelleri yanı sıra tam zamanında öğrenme tabanlı bir Gaussian süreç modelini karşılaştırmış; tüm Türkiye ölçeğinde de SARIMA yönteminin kabul edilebilir hata düzeylerinde kaldığını doğrulamıştır. Öte yandan Taşpınar ve arkadaşları [10], günlük bazda kısa vadeli doğal gaz tüketim tahminini çok katmanlı algılayıcı yapısındaki yapay sinir ağlarıyla ele almış; 4 yıllık enerji tüketimi ve meteoroloji verilerini kullanarak klasik istatistiksel yöntemlere alternatif bir modelleme çerçevesi sunmuştur.

Mevsimselliğin ve dışsal değişkenlerin modele dahil edilmesi, literatürde SARIMA-X ve SARIMAX modelleri üzerinden tartışılmaktadır. Manigandan ve arkadaşları [11], ABD'nin aylık doğal gaz üretim ve tüketim verilerini çapraz korelasyon fonksiyonu aracılığıyla modellemiş; sektörel değişkenleri bünyesinde barındıran SARIMAX modelinin en iyi performansı sergilediğini saptamıştır. Dışsal değişken yaklaşımını farklı bir metodoloji üzerinden ele alan Hussain ve arkadaşları [12], 2016-2030 dönemini kapsayan tahmin çalışmasında ARIMA ve Holt-Winters modellerini karşılaştırmış; sosyoekonomik göstergelerin gaz talebi üzerindeki belirleyiciliğini vurgulayarak ARIMA'nın uzun vadeli öngörülerde daha güvenilir sonuçlar ürettiğini ortaya koymuştur. Benzer biçimde Sen ve Günay [13], gelecekteki doğal gaz tüketimini tanımlayıcı değişken olarak sosyoekonomik göstergeler kullanan çeşitli çoklu regresyon modelleriyle modellemiş ve tahmin performansının kullanılan gösterge setine karşı duyarlılığını analiz etmiştir.

Doğal gaz tüketiminin yalnızca miktar değil; fiyat, piyasa yapısı ve arz güvenliğin de dikkate alınarak modellenmesi giderek daha fazla ilgi görmektedir. Shaikh ve Ji [14], Çin'in doğal gaz tüketimini Gir Verhulst ve doğrusal olmayan gri Bernoulli modelleri aracılığıyla tahmin etmiş; gri model yaklaşımlarının sınırlı veri koşullarında dahi güvenilir sonuçlar ürettiğini göstermiştir. Benzer bir odakla Gascon ve Sanchez-Ubeda [15], eklenebilirlik varsayımlarına ve parçalı doğrusal regresyona dayalı modeller için otomatik belirleme prosedürü geliştirerek Monte Carlo simülasyonlarıyla model seçim sürecinin zayıf bağımlı veriler altında istikrarlı davrandığını doğrulamıştır.

İşletme ölçeğindeki çalışmalarda ise, Kovacic ve Dolenc [16] bir çelik fabrikasındaki gaz tüketim maliyetlerini minimize etmek amacıyla doğrusal regresyon ve genetik programlama yaklaşımlarını kombine etmiş; sipariş edilen ile tedarik edilen gaz miktarı arasındaki hatayı azaltmayı hedeflemiştir. Konut ve ticari tüketicilere odaklanan Fabbiani ve arkadaşları [17] ise sırt regresyonu, Gaussian süreci, k-en yakın komşu, yapay sinir ağı ve torus modellerini karşılaştırarak sıcaklık tahminlerinin mevsimsel rolüne dikkat çekmiştir. Benzer temada Gupta ve arkadaşları [18], Singapur'daki konut sektöründe şebeke akış verilerine dayalı matematiksel bir model oluşturmuş ve gaz ile elektrik yük profilleri arasındaki örüntüleri karşılaştırmalı biçimde incelemiştir. Oliver ve arkadaşları [19] ise gaz iletim operatörleri için zirvede talep yaşanan günün önceden tahminlenmesine yönelik bir metodoloji geliştirmiş; güneş radyasyonunun gaz tüketimi üzerindeki istatistiksel açıdan anlamlı etkisini ortaya koymuştur.

Ghana'nın günlük doğal gaz tüketimini ele alan yakın dönem çalışmasında Broni-Bediako ve arkadaşları [20], ARIMA ve SARIMA modellerini karşılaştırmış; SARIMA'nın 6,96 MAPE değeriyle ARIMA'ya (%7,29) kıyasla hafif bir üstünlük sergilediğini ortaya koymuş ve her iki modelin de kabul edilebilir doğruluk düzeyi sağladığını bildirmiştir.

Tüm bu bulgular ışığında, doğal gaz tüketiminin tahminlenmesinde ARIMA ve mevsimsel uzantısı SARIMA'nın özellikle veri yoğunluğunun sınırlı olduğu, yorumlanabilirliğin ve pratikliğin ön planda tutulduğu bölgesel ölçekli uygulamalarda güçlü ve güvenilir bir yöntem olmayı sürdürdüğü görülmektedir. Bununla birlikte, abone sayısı gibi talep yoğunluğunu dolaylı yoldan yansıtan değişkenlerin SARIMA çerçevesinde modellenmesine ilişkin çalışmalar literatürde oldukça sınırlı kalmaktadır; mevcut çalışma bu eksikliği gidermeye yönelik özgün bir katkı sunmaktadır.

2. YÖNTEM

ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) modeli, zaman serisi analizinde sıklıkla kullanılan, hem kısa hem de uzun vadeli tahminlerde etkili olan güçlü bir yöntemdir [21]. Aylık yeni doğal gaz müşteri sayısının tahminlenmesi gibi mevsimsel özellikler taşıyan verilerde bu modelin kullanılması, istatistiksel açıdan tutarlı sonuçlar elde etmeye olanak tanır. ARIMA modeli özellikle trend ve mevsimsellik gibi bileşenleri zaman serisi verilerinden ayrıştırarak gelecekteki değerleri tahmin etmek için etkili bir yapı sunar. Model, verinin içinde var olan stokastik süreçleri de modelleyebilmesi sayesinde doğal gaz müşteri

sayılarında gözlemlenen dalgalanmaların ve ani değişimlerin yakalanabilmesine olanak tanır. Özellikle ekonomik ve politik faktörlerden etkilenen bu tür zaman serilerinde ARIMA modelinin esnek yapısı, dalgalanmaların öngörülmesi ve risklerin azaltılması açısından faydalıdır.

ARIMA modeli üç ana bileşenden oluşur: Otoregresif (AR), Entegre (I) ve Hareketli Ortalama (MA). Bu bileşenler zaman serisinin önceki gözlemleri ve artık terimlerle ilgili dinamiklerini açıklamaya olanak tanır. AR terimi, serinin geçmiş değerlerine dayalı olarak şimdiki değeri tahmin eder. AR(p) parametresi, serinin ne kadar önceki değerlerinin tahmine dahil edileceğini belirler. Doğal gaz müşteri sayısı verisinde AR terimi, geçmiş aylardaki müşteri sayılarına dayanarak gelecek dönem tahminlerinin yapılabilmesine olanak sağlar. Matematiksel olarak, Yt değeri şu şekilde ifade edilir:

$$c + \phi_1 Yt - 1 + \phi_2 Yt - 2 + \ldots + \phi_p Yt - p + \epsilon t \quad (1)$$

MA terimi, önceki tahmin hatalarının şimdiki değer üzerindeki etkisini dikkate alır. MA(q) parametresi, serinin ne kadar önceki hata terimlerinin şu anki tahmine dahil edileceğini belirler. Bu, tahmin edilen müşteri sayısının önceki dönemlerdeki öngörülemeyen şokların ya da düzensiz dalgalanmaların etkisinde olup olmadığını belirlemek için önemlidir. MA bileşeni şu şekilde ifade edilir. Burada $\theta_1, \theta_2, \ldots \theta_q$ MA katsayılarıdır ve ϵt beyaz gürültü terimidir.

$$c + \theta_1 \epsilon t - 1 + \theta_2 \epsilon t - 2 + \ldots + \theta_q \epsilon t - q + \epsilon t \quad (2)$$

I (Entegrasyon) bileşeni, durağan olmayan bir serinin durağan hale getirilmesini ifade eder. d parametresi, serinin kaç kez farkının alındığını gösterir. Mevsimsel serilerde ek olarak mevsimsel fark alma işlemi de uygulanabilir; bu işlem D parametresiyle gösterilir ve seri, s dönem önceki değeriyle karşılaştırılarak mevsimsel etkiden arındırılır.

Bir ARIMA modeli, temel yapı (p,d,q)'nın yanı sıra mevsimsel yapı $(P,D,Q)_{[s]}$ parametreleriyle ifade edilir. Burada P mevsimsel AR teriminin gecikme sayısını, D mevsimsel fark sayısını, Q mevsimsel MA teriminin gecikme sayısını, s ise mevsimsel periyodu (aylık veri için s=12) ifade etmektedir [22].

2.1. ARIMA Modeli Uygulama Adımları

ARIMA modelinin uygulanması dört temel adımdan oluşmaktadır.

Adım 1 Durağanlık Analizi: ARIMA modelinin uygulanabilmesinin temel ön koşulu zaman serisinin durağan olmasıdır. Durağanlık; serinin ortalama, varyans ve otokovaryans yapısının zaman içinde sabit kalması anlamına gelir [21]. Durağan olmayan seriler, fark alma işlemiyle durağan hale getirilir; kaç kez fark alındığı d parametresini belirler. Mevsimsel serilerde mevsimsel fark alma işlemi uygulanarak D parametresi elde edilir. Durağanlık Augmented Dickey-Fuller (ADF) testi ile sınanır [22]. ADF testinin sıfır hipotezi "seride birim kök vardır, seri durağan değildir" şeklindedir. p-değerinin 0,05'ten küçük çıkması sıfır hipotezinin reddedilmesi ve serinin durağan olduğunun kabul edilmesi anlamına gelir.

Adım 2 ACF ve PACF Analizi: Seri durağan hale getirildikten sonra uygun AR (p), MA (q) ve mevsimsel (P, Q) parametrelerinin belirlenmesi amacıyla Otokorelasyon Fonksiyonu (ACF) ve Kısmi Otokorelasyon Fonksiyonu (PACF) grafikleri incelenir [22]. ACF, zaman serisinin kendisiyle farklı gecikme değerlerindeki doğrusal korelasyonunu ölçer; hesaplanan katsayılar güven bandıyla birlikte grafikleştirilir. ACF grafiğinde belirli bir gecikmeden sonra korelasyonun güven bandı içine ani şekilde girmesi (kesme) MA bileşeninin varlığına, geometrik ya da dalgalı biçimde yavaş azalması ise AR bileşeninin varlığına işaret eder. PACF ise ara gecikmelerin doğrusal etkisi arındırıldıktan sonra kalan kısmi korelasyonu ölçer; PACF grafiğinde belirgin bir kesme noktası AR bileşeninin derecesini (p) belirlemeye yarar. Mevsimsel yapının bulunduğu serilerde s, 2s ve 3s. gecikmelerde (aylık veriler için 12., 24. ve 36.) belirgin korelasyon değerleri gözlemlenir; bu değerler mevsimsel P ve Q parametrelerinin belirlenmesinde kullanılır.

Adım 3 Model Tanımlama ve Parametre Tahmini: Seri durağan hale getirildikten sonra uygun AR (p), MA (q) ve mevsimsel (P, Q) parametrelerinin belirlenmesi amacıyla Otokorelasyon Fonksiyonu (ACF) ve Kısmi Otokorelasyon Fonksiyonu (PACF) grafikleri incelenir [22]. ACF, zaman serisinin kendisiyle farklı gecikme değerlerindeki doğrusal korelasyonunu ölçer; hesaplanan katsayılar güven bandıyla birlikte grafikleştirilir. ACF grafiğinde belirli bir gecikmeden sonra korelasyonun güven bandı içine ani şekilde

girmesi (kesme) MA bileşeninin varlığına, geometrik ya da dalgalı biçimde yavaş azalması ise AR bileşeninin varlığına işaret eder. PACF ise ara gecikmelerin doğrusal etkisi arındırıldıktan sonra kalan kısmi korelasyonu ölçer; PACF grafiğinde belirgin bir kesme noktası AR bileşeninin derecesini (p) belirlemeye yarar. Mevsimsel yapının bulunduğu serilerde s, 2s ve 3s. gecikmelerde (aylık veriler için 12., 24. ve 36.) belirgin korelasyon değerleri gözlemlenir; bu değerler mevsimsel P ve Q parametrelerinin belirlenmesinde kullanılır. ACF ve PACF grafiklerinden elde edilen gecikme yapısı esas alınarak aday modeller oluşturulur. Parametreler RStudio (sürüm 4.1.2) ortamında maksimum olabilirlik (maximum likelihood) yöntemiyle tahmin edilir. Serinin kısa vadeli yapısı temel ARIMA bileşeni (p,d,q) ile; yıllık döngüsel yapısı ise mevsimsel bileşen (P,D,Q)[s] ile modellenir.

Adım 4 Model Doğrulama: Seçilen model tahmin edildikten sonra artık (residual) değerleri incelenir. Artıkların bağımsız ve rastsal dağılıp dağılmadığı Ljung-Box testi ile sınanır [25]; p-değerinin 0,05'ten büyük çıkması artıkların beyaz gürültü niteliği taşıdığını ve modelde açıklanmamış otokorelasyon kalmadığını gösterir. Son aşamada model performansı MAPE ve R^2 metrikleriyle değerlendirilir. Mean Absolute Percentage Error (MAPE), gerçek (y_i) ve tahmin edilen değerler ($\hat{y}_i$) arasındaki yüzde hatayı temsil eder [26]. MAPE ölçek bağımsız bir hata metriği olması nedeniyle farklı veri setleri ve büyüklüklerdeki seriler arasında karşılaştırma yapılmasına olanak tanır. İş dünyasında referans alınan MAPE yorumlama aralıkları şu şekildedir [27]: %10'dan küçük değerler çok iyi; %10–%20 arası iyi; %20–%50 arası kabul edilebilir; %50'nin üzerindeki değerler ise yanıltıcı tahmin kalitesine işaret eder.

$$\frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{A_i-\hat{F}_i}{y_i}\right| \tag{3}$$

R^2 (R-kare), gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki ilişkinin benzerliği ve gücünü değerlendirmek amacıyla kullanılır [28]. R^2, 0-1 arası değer alır ve 1'e ne kadar yakınsa model uyumu o kadar yüksektir. y_i gerçek, $\hat{y}_i$ tahmin edilen ve $\bar{y}$ hesaplanan gerçek ortalama değer olmak üzere şu şekilde hesaplanır.

$$1-\frac{\sum(y_i-\hat{y}_i)^2}{\sum(y_i-\bar{y})^2} \tag{4}$$

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışmada 2011-2021 yılları arasında Mersin ilinde kaydedilen aylık yeni doğal gaz abone sayısı ele alınmıştır. Veri içeriğinde abonelerin kimlik bilgileri ve adresleri kişisel veri gizliliği nedeniyle filtrelenmiştir. Tüm işlemler 64 bit Windows 10 işletim sistemine sahip dizüstü bilgisayarda RStudio (sürüm 4.1.2) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

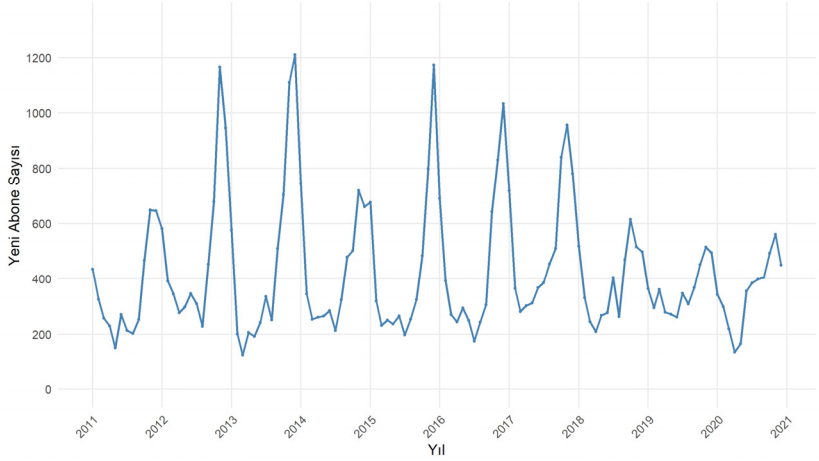
Veri setine ilişkin betimleyici istatistikler Çizelge 1'de sunulmuştur. 120 aylık gözlem süresince kaydedilen yeni doğal gaz abone sayısının ortalaması 423, standart sapması ise 234 olarak hesaplanmıştır. Ortalama ile medyan arasındaki belirgin fark, verinin simetrik dağılmadığına işaret etmektedir. Çarpıklık ve basıklık değerleri bir veri setinin değişkenliğini izlemek için kullanılan önemli kavramlardandır. -1.5 ile +1.5 değerleri arasında olması istenir. Çarpıklık ve basıklık değerlerine göre, kaydedilen aylık Çarpıklık ve basıklık değerlerinin -1.5 ile +1.5 sınırlarını aşması bu yorumu desteklemekte; serinin asimetrik bir yapı sergilediğini ve modellemede ek güçlükler doğurabileceğini göstermektedir.

Çizelge 1. Betimleyici istatistikler

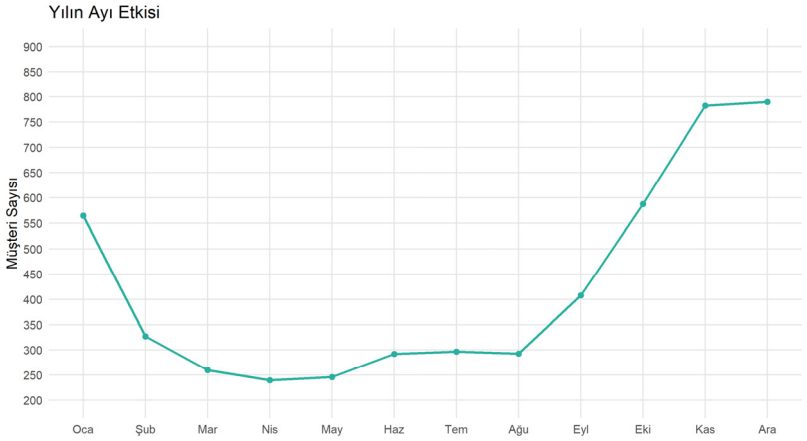
Gözlem Sayısı	Ortalama	Medyan	Std Sapma	Çarpıklık	Basıklık
120	423	345	234	1.46	1.82

Şekil 1'de 2012 ile 2021 yılları arasındaki aylık yeni doğal gaz müşteri sayılarının zaman serisi gösterilmiştir ve doğal gaz sektöründe yeni müşteri kazanımında belirgin mevsimsel bir döngünün olduğunu ortaya koymaktadır. Her yılın özellikle son çeyreğinde veya ilk çeyreğinde zirve yapan müşteri sayıları, yılın diğer dönemlerinde daha düşük seyretmektedir. Bu durum, doğal gaz taleplerinin mevsimsel olarak yoğunlaştığını ve özellikle kış mevsiminde talebin arttığını göstermektedir. Şekil 1'de gözlemlenen zirve ve dip noktaları, verinin mevsimsel bir bileşene sahip olduğunu açıkça göstermektedir. Yılın aynı dönemlerinde düzenli artışlar ve azalmalar olması, doğal gaz kullanımı ve tesisat taleplerinin mevsimsel faktörlerden etkilendiğini kanıtlamaktadır. Kış aylarına denk gelen zirveler, soğuk hava koşullarının ve enerji gereksinimlerinin doğal gaz talebini doğrudan etkilediğini göstermektedir. Verinin genel seviyesine

bakıldığında, uzun dönemli bir trendin olmadığını veya çok belirgin olmadığını söylemek mümkündür. 2012 yılından itibaren müşteri sayılarında belirgin bir artış ya da azalış yönünde güçlü bir eğilim gözlemlenmemektedir. Ancak, 2016 yılından itibaren gözlemlenen dalgalanmalarda bir düşüş trendi dikkat çekmektedir. Bu dalgalanmalar, sektördeki kısa vadeli değişimlerin ve ekonomik ya da dışsal faktörlerin etkisini yansıtabilir. Özellikle 2015 yılından sonra görülen dalgalanmalarda keskin düşüşler, piyasadaki durgunluk veya ekonomik kriz gibi makroekonomik faktörlerden kaynaklanıyor olabilir. Bu tür düşüşler, doğal gaz sektörü için belirsiz dönemlerde müşteri sayılarında önemli bir azalma olabileceğini işaret etmektedir.



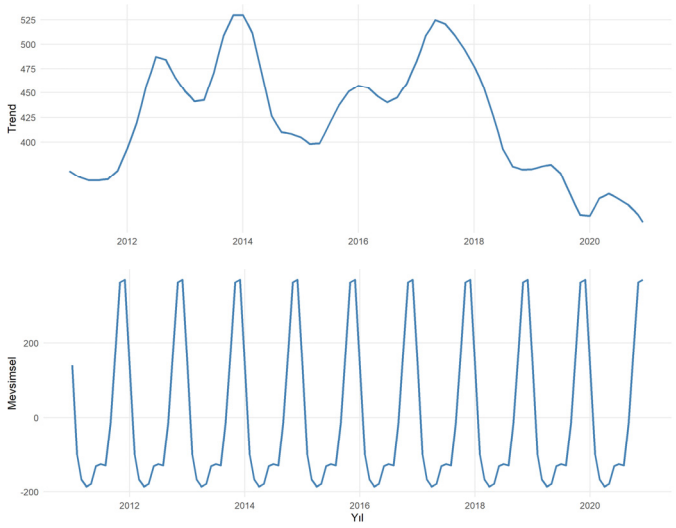
Şekil 1. Aylık yeni doğal gaz müşteri sayısının zaman serisi görselleştirmesi



Şekil 2. Aylık doğal gaz yeni müşteri sayısının yılın ayları üzerindeki değişimi

Şekil 2, mevsimsellik etkilerini inceleyen bir zaman serisi analizini göstermektedir ve her bir ay için müşteri sayısındaki değişim, yıl içindeki doğal gaz taleplerindeki aylık değişkenlikleri ortaya koymaktadır. Şekil 2'de yılın ilk iki ayında, özellikle Ocak ayında yüksek bir müşteri sayısı gözlemlenmektedir. Ocak ayındaki zirve, soğuk kış aylarında doğal gaz talebinin artmasına bağlı olabilir. Şubat ayından itibaren müşteri sayısında ciddi bir düşüş yaşanmakta ve bu eğilim, özellikle Mart ve Nisan aylarında dip yaparak en düşük seviyelere ulaşmaktadır. Bu durum, havaların ısınmasıyla birlikte doğal gaz aboneliği ihtiyacının azaldığını gösterebilir. Bu azalma, doğal gaz tesisat firmalarının iş hacminin büyük oranda mevsimsel faktörlere bağlı olduğunu ve bu dönemlerde iş hacminde düşüş yaşanabileceğini işaret etmektedir. Özellikle yaz aylarında (Haziran, Temmuz ve Ağustos) müşteri sayısında bir stabilizasyon gözlemlenirken, sonbaharın gelmesiyle birlikte müşteri sayısında tekrar bir artış trendi başlamaktadır. Bu artış, kış mevsiminin yaklaşmasıyla birlikte artan doğal gaz talepleri ve yeni abonelik ihtiyaçlarından kaynaklanmaktadır. Kasım ve Aralık aylarında, özellikle Aralık ayında müşteri sayısı 800'ün üzerine çıkarak yıl içindeki ikinci zirvesine ulaşmaktadır. Bu, doğal gaz kullanımının artmasına ve yeni müşterilerin sisteme dahil olmasına yönelik güçlü bir talebin göstergesi olabilir. Bu tür bir mevsimsel analiz, ARIMA zaman serisi modelinin mevsimsel bileşenleriyle desteklenebilir. Yıl içindeki bu tür dalgalanmalar, doğru

modelleme yöntemleriyle tahmin edilebilir ve böylece firma yöneticileri, gelecekteki müşteri taleplerini daha etkin bir şekilde yönetebilir. Sezonluk etkilerin doğru bir şekilde modellenmesi, hem kısa vadeli hem de uzun vadeli iş hacmi planlaması açısından önemlidir.



Şekil 3. Trend ve bileşenler grafiği

Şekil 3'te üstte yer alan eğilim çizgisi, yıllar içindeki genel trendi temsil etmektedir. 2012 yılından 2020 yılına kadar müşteri sayısında belirgin bir azalma trendi gözlemlenmektedir. Bu düşüş eğilimi, doğal gaz sektöründe yeni müşteri kazanımında bir yavaşlama veya doyum noktasına ulaşma durumu olabileceğini işaret edebilir. Şekil 3'te altta yer alan grafikte ise, zaman serisinin mevsimsel bileşeni gözlemlenmektedir ve müşteri sayısındaki mevsimsel etkilerin her yıl düzenli olarak tekrar ettiğini ve belli aylar arasında belirgin zirveler ve dipler yaşandığını göstermektedir. Ocak ayı gibi kış dönemlerinde doğal gaz talebinin arttığını göstermektedir. Yılın bu dönemlerinde müşteri sayısında ani artışlar gözlenmektedir. Bu durum, kış aylarında ısınma ihtiyacının artması ve buna bağlı olarak doğal gaz aboneliğine olan talebin yükselmesi ile açıklanabilir. Yıllık bileşende görülen düşük seviyeler ise yaz aylarına denk gelmektedir. Özellikle Temmuz ve Ağustos aylarında müşteri sayısında belirgin bir azalma söz konusudur. Bu, sıcak hava koşulları nedeniyle doğal gaz kullanımına olan talebin azalmasıyla ilişkilendirilebilir.

3.1. ARIMA Modeli Uygulanması

3.1.1. Durağanlık Analizi

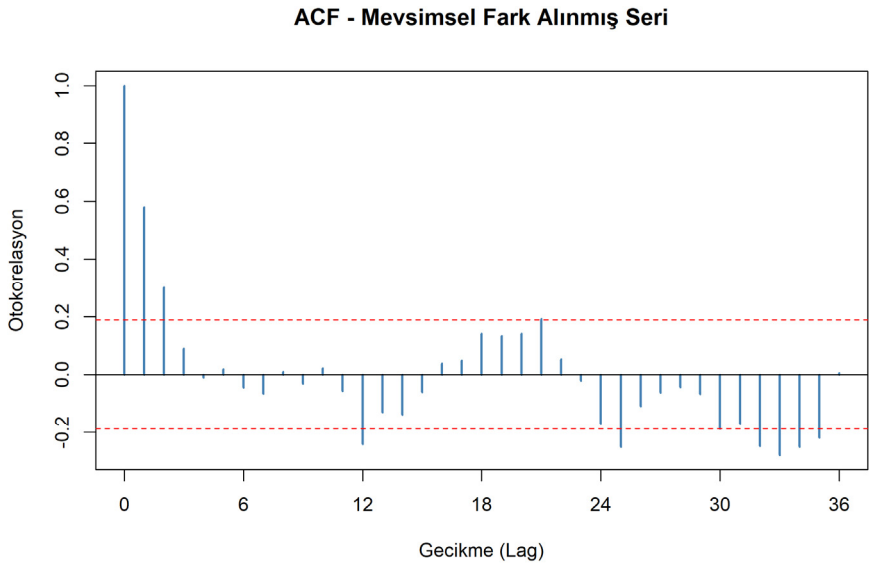
ARIMA modelinin uygulanmasına yönelik ilk adımda ham zaman serisi üzerinde ADF testi gerçekleştirilmiştir. Ham seri için ADF test istatistiği -6,29, p-değeri 0,01 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, $p < 0,05$ olduğundan sıfır hipotezinin reddedildiğini ve serinin genel ortalaması bakımından durağan olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, standart ADF testi mevsimsel birim kökleri tespit etmemektedir [22]. Şekil 1-3'te açıkça gözlemlenen güçlü yıllık döngüsellik, mevsimsel bileşenin modellenmesi için birinci dereceden mevsimsel fark alma işleminin (D=1, s=12) gerekli olduğuna işaret etmektedir. Mevsimsel fark alınan seri üzerinde yeniden gerçekleştirilen ADF testinde istatistik -3,83, p-değeri 0,02 olarak hesaplanmış; serinin mevsimsel fark alma işleminin ardından durağan olduğu doğrulanmıştır.

3.1.2. ACF ve PACF Analizi

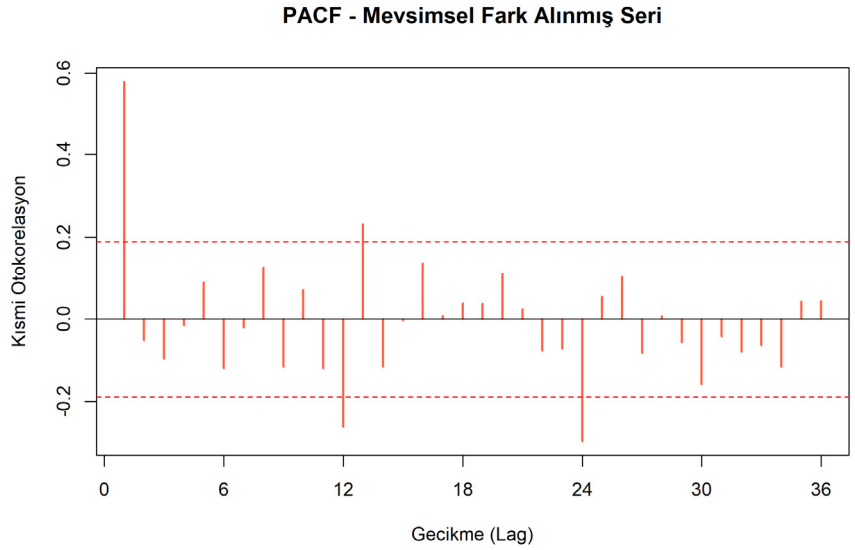
Durağanlaştırılmış seri üzerinde ACF ve PACF grafikleri incelenmiş; elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te sunulmuştur.

Şekil 4'te verilen ACF grafiğinde 1. ve 2. gecikmelerde güven bandının dışında anlamlı korelasyon değerleri gözlemlenmiş; 3. gecikmeden itibaren değerler güven bandının içine girmiştir. 12. gecikmede belirgin negatif bir spike gözlemlenmiş, bu değer 24. gecikmede de kısmen sürmüştür; söz konusu örüntü mevsimsel MA bileşeninin modele ikinci dereceye kadar (Q=2) dahil edilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Şekil 5'te gösterilen PACF grafiğinde ise 1. gecikmede istatistiksel olarak anlamlı bir değer tespit edilmiş; bu bulgu serinin bir otoregresif terim içerdiğini (p=1) ortaya koymuştur. Mevsimsel gecikme olan 12. gecikmede ACF'de anlamlı korelasyon gözlemlenmiş ve bu değer 24. gecikmede de kısmen sürmüştür; söz konusu örüntü mevsimsel MA bileşeninin modele ikinci dereceye kadar (Q=2) dahil edilmesi gerektiğine işaret etmektedir. Mevsimsel PACF incelemesinde 12. gecikmede anlamlı bir değere rastlanmamış; mevsimsel AR bileşenine gerek olmadığı (P=0) kararına varılmıştır.



Şekil 4. Mevsimsel fark alınmış seriye ait ACF grafiği



Şekil 5. Mevsimsel fark alınmış seriye ait PACF grafiği

3.1.3. Model Tanımlama ve Parametre Tahmini

ACF ve PACF analizlerinden elde edilen bulgular doğrultusunda mevsimsel (P,D,Q)[s] bileşeninin modele dahil edilmesiyle birlikte yapı, mevsimsel otoregresif entegre hareketli ortalama modeli olan SARIMA(1,0,0)(0,1,2)$_{[12]}$'ye dönüşmüştür.

Model katsayıları maksimum olabilirlik (ML) yöntemiyle tahmin edilmiştirAR(1) katsayısı 0,62 (standart hata = 0,078) ve mevsimsel MA(1) katsayısı -0,56 (standart hata = 0,133) istatistiksel olarak anlamlıdır. Mevsimsel MA(2) katsayısı -0,21 (standart hata = 0,137) ise sınırda anlamlılık sergilemekle birlikte, ACF grafiğinde 24. gecikmede gözlemlenen korelasyon yapısı ve model artıklarının beyaz gürültü testini geçmesi bu terimin modelde tutulmasını desteklemektedir.

Temel bileşen (1,0,0); serinin bir dönem önceki değeriyle olan kısa vadeli otoregresif ilişkisini, d=0 ile serinin durağan olduğunu ve q=0 ile kısa vadeli MA etkisinin bulunmadığını ortaya koymaktadır. Mevsimsel bileşen $(0,1,2)_{[12]}$ ise yıllık döngüselliği modellemektedir: D=1 ile uygulanan birinci dereceden mevsimsel fark alma işlemi her ayın değerini 12 ay öncesiyle karşılaştırarak döngüsel etkiyi dengelemiş; Q=2 ise önceki iki mevsimsel dönemin hata terimlerinin modele dahil edildiğini ifade etmektedir. Modele ait AIC değeri 1333,26 olarak hesaplanmıştır.

3.1.4. Model Doğrulama

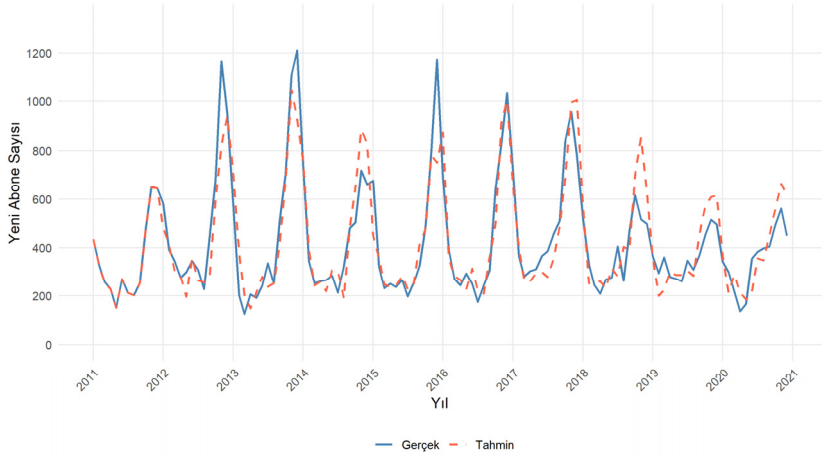
Seçilen SARIMA$(1,0,0)(0,1,2)_{[12]}$ modeline ait artık değerleri Ljung-Box testi ile sınanmıştır. Test istatistiği 20,41, p-değeri 0,67 olarak hesaplanmıştır. $p > 0,05$ olduğundan sıfır hipotezi reddedilememiş; artıklarda istatistiksel olarak anlamlı bir otokorelasyon yapısının bulunduğuna dair yeterli kanıt elde edilememiştir. Bu sonuç, artıkların beyaz gürültü davranışıyla uyumlu olduğunu ve modelin veri yapısını yeterince açıkladığını göstermektedir.

Model performansı MAPE ve R^2 metrikleriyle değerlendirilmiştir. MAPE %16,51, R^2 ise 0,81 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, Lewis [25] tarafından önerilen yorumlama aralıklarına göre iyi düzeyde tahmin doğruluğuna karşılık gelmektedir. 0,81 R^2 değeri ise modelin gerçek değerlerdeki değişkenliğin %81'ini açıklayabildiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, modelinin bu veri seti için güvenilir bir tahmin aracı niteliği taşıdığını ortaya koymaktadır.

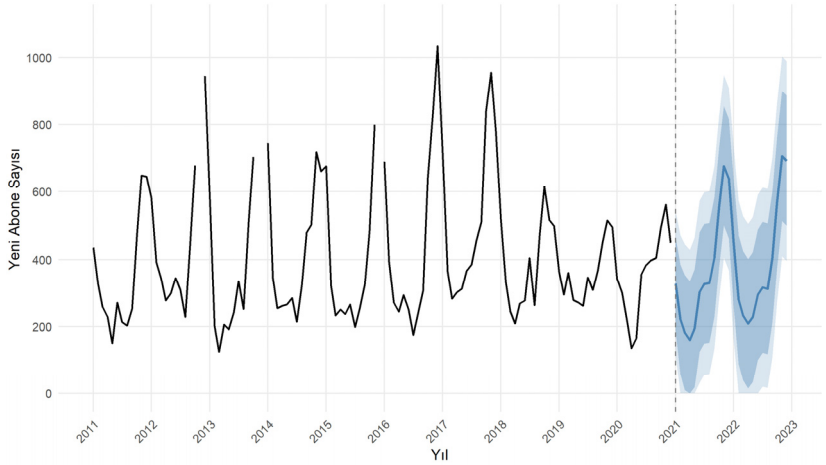
Şekil 6'da gerçek abone sayıları ile SARIMA$(1,0,0)(0,1,2)_{[12]}$ modeli tarafından tahmin edilen değerler birlikte gösterilmektedir. İki serinin genel örtüşme derecesi, modelin mevsimsel döngüleri ve orta vadeli dalgalanmaları başarılı biçimde yakaladığına işaret etmektedir. Özellikle yaz aylarındaki dip noktaları ve sonbahar-kış geçişindeki artış eğilimleri model tarafından tutarlı biçimde tahmin edilmiştir.

Bununla birlikte, 2012-2013 ve 2015-2016 kış dönemlerinde gözlemlenen aşırı zirve değerlerinde tahmin değerlerinin gerçek değerlerin altında kaldığı görülmektedir. Bu sapma, söz konusu dönemlerdeki ani ve olağandışı talep artışlarının modelin öngörü kapasitesinin ötesinde olduğuna işaret etmekte; MAPE değerini olumsuz etkileyen başlıca gözlemler bu uç değerlere karşılık gelmektedir. 2016 sonrasında ise iki seri arasındaki uyumun belirgin biçimde arttığı gözlemlenmektedir; bu durum modelin düşen trend ve azalan volatilite koşullarında daha iyi performans sergilediğini ortaya koymaktadır.

Şekil 7'de SARIMA$(1,0,0)(0,1,2)_{[12]}$ modeli kullanılarak üretilen 24 aylık tahmin sunulmaktadır. Geçmiş gözlemler siyah çizgiyle, model tahmini mavi çizgiyle gösterilmiş; koyu gölgeli alan %80, açık gölgeli alan ise %95 tahmin güven aralığını temsil etmektedir. Kesik dikey çizgi, geçmiş gözlemler ile tahmin döneminin başlangıcını ayırmaktadır. Tahmin sonuçları, mevsimsel döngünün 2021-2022 döneminde de belirleyici olmaya devam ettiğini ortaya koymaktadır. Kış aylarında abone talebinin 600-700 bandına yükseleceği, yaz aylarında ise 200-250 bandına gerileyeceği öngörülmektedir. Güven aralıklarının tahmin ufku ilerledikçe genişlemesi, uzak dönem tahminlerindeki belirsizliğin arttığını göstermekte ve bu durum zaman serisi tahminlemesinde beklenen istatistiksel bir örüntüyü yansıtmaktadır.



Şekil 6. Gerçek ve tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması



Şekil 7. Aylık doğal gaz yeni müşteri sayısının iki yıllık tahmini

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada Mersin iline ait 10 yıl boyunca kaydedilen aylık yeni doğal gaz abone sayısı verisi kullanılarak tesisat firmalarının gelecekteki iş hacimlerinin tahminlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda SARIMA$(1,0,0)(0,1,2)_{[12]}$ modeli kurulmuş ve modelin geçerliliği MAPE ile R^2 performans kriterleriyle sınanmıştır.Analiz sonucunda elde edilen %16,51 MAPE değeri, Lewis [25] tarafından önerilen yorumlama çerçevesine göre iyi düzeyde tahmin doğruluğuna karşılık gelmektedir. 0,81 R^2 değeri ise modelin veri setindeki değişkenliğin %81'ini açıklayabildiğini ortaya koymaktadır. Ljung-Box testi sonucunda artıklarda istatistiksel olarak anlamlı bir otokorelasyon yapısının varlığına dair yeterli kanıt elde edilememiş; bu bulgu modelin zaman serisi varsayımlarını karşıladığını doğrulanmıştır. Bu sonuçlar, modelinin Mersin ili doğal gaz tesisat sektörüne ait aylık abone sayısı tahmininde güvenilir bir araç niteliği taşıdığını göstermektedir.

Literatür incelendiğinde, mevcut çalışmaların büyük çoğunluğunun doğal gaz tüketim miktarını bağımlı değişken olarak ele aldığı görülmektedir. Buna karşın yeni abone sayısı gibi iş hacmini doğrudan yansıtan bir değişkenin SARIMA çerçevesinde modellenmesi literatürde oldukça sınırlı kalmaktadır. Bu çalışma söz konusu boşluğu doldurarak tesisat sektörüne özgü bir tahmin yaklaşımı geliştirmektedir. Öte yandan elde edilen bulgular, mevsimsel yapılarının yalnızca enerji tüketim miktarı değil, sektörel iş hacmi göstergeleri üzerinde de başarıyla uygulanabileceğini ortaya koyması bakımından metodolojik bir katkı da sunmaktadır.

Verinin genel yapısına bakıldığında, yeni abone sayısının güçlü bir mevsimsel örüntü sergilediği görülmektedir. Ocak ayı yıl içindeki birinci zirveyi oluştururken, Kasım-Aralık dönemi ikinci zirve olarak öne çıkmaktadır. Mart-Nisan ayları ise yıllık dip noktasına karşılık gelmektedir. Bu döngünün tutarlı biçimde tekrar etmesi, tesisat talebinin büyük ölçüde hava koşulları ve ısınma ihtiyacına bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Öte yandan trend analizi, 2016 sonrasında yeni abone sayısında kademeli bir düşüş eğilimi bulunduğuna işaret etmektedir. Bu durum, doğal gaz yeni abone oranının belirli bir doyum noktasına yaklaşmakta olduğuna ya da alternatif enerji kaynaklarına yönelimin etkisine işaret edebilir.

Çalışma bulguları, doğal gaz tesisat firmalarına operasyonel ve stratejik düzeyde çeşitli kararlar için somut bir veri zemini sunmaktadır. Tahmin modeli, Ekim-Ocak döneminin yıllık en yüksek talep dönemi olduğunu net biçimde ortaya koymaktadır. Bu bilgi doğrultusunda firmalar söz konusu dönemden önce mevsimlik personel alımı süreçlerini başlatmalı; sözleşmeli ya da yarı zamanlı çalışanlardan oluşan esnek bir kapasite havuzu oluşturmalıdır. Böylece müşteri taleplerine yanıt süreleri kısaltılarak hizmet kalitesi korunabilir. Öte yandan Mart-Ağustos döneminde talep düşüşü yaşandığı bilindiğinden bu dönem, mevcut personelin teknik eğitim programlarına, sertifika yenileme süreçlerine ve bakım faaliyetlerine yönlendirilmesi için stratejik bir fırsat olarak değerlendirilebilir. Boru, vana, sayaç ve bağlantı elemanları gibi tesisat malzemelerinin temin sürelerinin uzun olabildiği göz önünde bulundurulduğunda, firmaların tahmin verilerine dayalı olarak Eylül-Ekim döneminde stok seviyelerini yükseltmesi kritik önem taşımaktadır. Yaz aylarına ait düşük talep öngörüleri ise satın alma miktarlarının kısıtlanması ve stok devir hızının optimize edilmesi için temel alınabilir. Bu yaklaşım hem depolama maliyetlerini düşürecek hem de

nakit akışı üzerindeki baskıyı azaltacaktır. Talep düşüşünün yaşandığı Mart-Ağustos döneminde firmalar, abone tabanını genişletmek amacıyla indirimli paket teklifleri, taksitli ödeme seçenekleri ve bakım-onarım hizmet sözleşmeleri gibi araçları devreye alabilir. Bu dönemlerde mevcut abonelere yönelik çapraz satış fırsatları (baca temizliği, cihaz servisi, periyodik kontrol) değerlendirilerek düşük sezon kayıplarının bir bölümü telafi edilebilir. Yüksek talep dönemlerinde ise yeni müşteri kazanımına yönelik yoğun pazarlama faaliyetleri yerine mevcut iş yükünün etkin yönetimine odaklanılması daha verimli bir yaklaşım olacaktır. Üretilen tahmin aralıkları, firmaların nakit akışı projeksiyonlarını ve bütçe planlamalarını daha gerçekçi bir zemine oturtmasına olanak tanımaktadır. Kış aylarında yoğunlaşan iş hacmine karşılık yaz aylarında yaşanan gelir düşüşü, firmalar için mevsimsel bir finansal dalgalanma riski yaratmaktadır. Bu riski yönetmek amacıyla kış döneminin yüksek gelirlerinden finansal rezerv ayrılması ve düşük talep dönemlerinde sabit giderlerin kontrol altında tutulması önerilebilir. Tahmin belirsizliğinin yüksek olduğu dönemlerde ise acil rezerv veya kredi limiti gibi mekanizmaların önceden hazır edilmesi, firmaları olası talep sapmalarına karşı koruyacaktır. Trend analizinin ortaya koyduğu uzun vadeli abone düşüşü, firmaların yalnızca yeni abone kazanımına dayanan iş modellerini sorgulamasını gerektirmektedir. Bu çerçevede firmalar; periyodik bakım, enerji verimliliği danışmanlığı ve doğal gaz tesisat güvenlik denetimleri gibi katma değerli hizmet alanlarına yatırım yaparak gelir kaynaklarını çeşitlendirebilir. Bunun yanı sıra mevcut abone tabanındaki sadakati artırıcı programlar geliştirmeleri ve yakıt dönüşümü, karma enerji sistemleri gibi komşu alanlarda yetkinlik kazanarak sektördeki rekabet avantajlarını sürdürmeleri önerilmektedir. Özellikle doğal gazın yenilenebilir enerji sistemleriyle entegrasyonuna yönelik artan talep, tesisat firmalarına yeni iş kolları açma potansiyeli sunmaktadır.

5. KAYNAKLAR

1. BP, (2020). *Statistical review of world energy 2020,* (69th Edition), London.
2. Tian, N., Shao, B., Bian, G., Zeng, H., Li, X. & Zhao, W. (2023). Application of forecasting strategies and techniques to natural gas consumption: A comprehensive review and comparative study. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *129*(C), 1-31.
3. Ediger, V.Ş. & Akar, S. (2007). ARIMA forecasting of primary energy demand by fuel in Turkey. *Energy Policy*, *35*(3), 1701-1708.
4. Akkurt, M., Demirel, Ö.F. & Zaim, S. (2010). Forecasting Turkey's natural gas consumption using time series methods. *European Journal of Economic and Political Studies, 3*, 1-21.
5. Tümse, S. (2025). Current status and future forecast of global CO2 concentration using statistical and deep learning time series methods. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *40*(4), 875-888.
6. Akpınar, M. & Yumusak, N. (2016). Year ahead demand forecast of city natural gas using seasonal time series methods. *Energies*, *9*, 727.
7. Akpınar, M. & Yumusak, N. (2013). Forecasting household natural gas consumption with ARIMA model: A case study of removing cycle. *7th International Conference on Application of Information and Communication Technologies*, Baku, 1-6.
8. Tekin, İ., Erat, S. ve Zeren, Y. (2016). Mersin İli'nin 2023 yılına kadar elektrik enerjisi ihtiyacının hesaplanması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *31*(1), 187-196.
9. Alakent, B., Işıklı, E., Kadaifci, C. & Taşpınar, T.S. (2025). Forecasting monthly residential natural gas demand in two cities of Turkey using just-in-time-learning modeling. *PLoS One 20*(6), e0325538.
10. Taşpınar, F., Celebi, N. & Tutkun, N. (2013). Forecasting of daily natural gas consumption on regional basis in Turkey using various computational methods. *Energy and Buildings*, *56*, 23-31.
11. Manigandan, P., Alam, M.S., Alharthi, M., Khan, U., Alagirisamy, K., Pachiyappan, D. & Rehman, A. (2021). Forecasting natural gas production and consumption in United States-Evidence from SARIMA and SARIMAX models. *Energies*, *14*(19), 6021.
12. Hussain, A., Memon, J.A., Murshed, M., Alam, M.S., Mehmood, U., Alam, M.N., Rahman M. & Hayat U. (2022). A time series forecasting analysis of overall and sector-based natural gas demand: A developing South Asian economy case. *Environmental Science and Pollution Research International*, *29*(47), 71676-71687.
13. Sen, D. & Günay, M.E. (2019). Forecasting annual natural gas consumption using socio-economic indicators for making future policies. *Energy*, *173*, 1106-1118.
14. Shaikh, F. & Ji, Q. (2016). Forecasting natural gas demand in China: Logistic modelling analysis. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *77*, 25-32.
15. Gascon, A. & Sanchez-Ubeda, E.F. (2018). Automatic specification of piecewise linear additive models: application to forecasting natural gas demand. *Statistics and Computing*, *28*, 201-217.

16. Kovacic, M. & Dolenc, F. (2016). Prediction of the natural gas consumption in chemical processing facilities with generic programming. *Genetic Programming and Evolvable Machines*, *17*, 231-249.
17. Fabbiani, E., Marziali, A. & Nicolò, G.D. (2021). Forecasting residential gas demand: machine learning approaches and seasonal role of temperature forecasts. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*, *26*(2), 202-204.
18. Gupta, P., Zan, T.T.T., Dauwels, J. & Ukil, A. (2018). Flow-based estimation and comparative study of gas demand profile for residential units in Singapore. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, *10*(3), 1120-1128.
19. Oliver, R., Duffy, A., Enright, B. & O'Connor, R. (2017). Forecasting peak-day consumption for year-ahead management of natural gas networks. *Utilities Policy, 44*, 1-11.
20. Broni-Bediako, E., Buabeng, A. & Allotey, P. (2024). Predicting Ghana's daily natural gas consumption using time series models. *Petroleum Science and Engineering*, *8*(1), 27-37.
21. Box, G.E.P. & Jenkins, G.M. (1970). *Time series analysis: Forecasting and control.* Holden-Day, San Francisco, 553.
22. Box, G.E.P., Jenkins, G.M., Reinsel, G.C. & Ljung, G.M. (2015). *Time series analysis: Forecasting and control.* John Wiley & Sons, New Jersey, 712.
23. Chatfield, C. (2004). *The analysis of time series: An introduction.* Chapman & Hall/CRC, London, 352.
24. Said, S.E. & Dickey, D.A. (1984). Testing for unit roots in autoregressive-moving average models of unknown order. *Biometrika*, *71*(3), 599-607.
25. Ljung, G.M. & Box, G.E.P. (1978). On a measure of lack of fit in time series models. *Biometrika*, *65*(2), 297-303.
26. Makridakis, S., Andersen, A., Carbone, R., Fildes, R., Hibon, M., Lewandowski, R., Newton, J., Parzen, E. & Winkler, R. (1982). The accuracy of extrapolation (time series) methods: Results of a forecasting competition. *Journal of. Forecasting*, *1*, 111-153.
27. Lewis, C.D. (1982). *Industrial and business forecasting methods: A practical guide to exponential smoothing and forecasting.* Butterworth-Heinemann, Oxford, 143.
28. Montgomery, D.C., Peck, E.A. & Vining, G.G. (2012). *Introduction to linear regression analysis.* Wiley, New Jersey, 672.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 1 MART/MARCH 2026

Province-Level Efficiency Analysis of Public Hospitals in Turkey: A Data Envelopment Analysis and Self-Organizing Maps (SOMDEA) Approach

Metin ÖZŞAHİN [1,a]

[1]*Osmaniye Korkut Ata University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Department of Management Information Systems, Osmaniye, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0001-9989-526X*

Article Info
Received : 14.07.2025
Accepted : 18.03.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1741485

Corresponding Author
Metin ÖZŞAHİN
metinozsahin@osmaniye.edu.tr

Keywords
Public hospitals
Data envelopment analysis
Self-organizing maps
Artificial neural networks

***How to cite:** ÖZŞAHİN, M., (2026). Province-Level Efficiency Analysis of Public Hospitals in Turkey: A Data Envelopment Analysis and Self-Organizing Maps (SOMDEA) Approach. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(1), 253-269.*

ABSTRACT

In today's Turkey, the healthcare sector holds a critically important position, as it affects numerous aspects of society. Among the key units that must utilize their investment capacity and available resources most efficiently, hospitals serve as the central service providers within the healthcare system. In a sector involving a wide range of stakeholders, evaluating hospital performance at the provincial level through Data Envelopment Analysis (DEA) offers significant advantages in promoting efficiency within the public sector. This study aims to analyze the operational effectiveness of public hospitals and guide them toward optimal performance levels, thereby contributing to national welfare and the sustainability of quality of life. Unlike previous studies, this research not only employs DEA for provincial-level efficiency analysis but also incorporates Self-Organizing Maps (SOM), an unsupervised learning method from artificial neural networks, to identify and explain the underlying factors contributing to variations in efficiency. This combined approach has named SOMDEA, enables a more interpretable and comprehensive understanding of performance differences among provinces.

Türkiye'de Kamu Hastanelerinin İl Bazlı Verimlilik Analizi: Veri Zarflama Analizi ve Öz-Düzenleyen Haritalar (SOMDEA) Yaklaşımı

Makale Bilgileri
Geliş : 14.07.2025
Kabul : 18.03.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1741485

Sorumlu Yazar
Metin ÖZŞAHİN
metinozsahin@osmaniye.edu.tr

Anahtar Kelimeler
Kamu hastaneleri
Veri zarflama analizi
Özdüzenleyici haritalar
Yapay sinir ağları

***Atıf şekli:** ÖZŞAHİN, M., (2026). Türkiye'de Kamu Hastanelerinin İl Bazlı Verimlilik Analizi: Veri Zarflama Analizi ve Öz-Düzenleyen Haritalar (SOMDEA) Yaklaşımı. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(1), 253-269.*

ÖZ

Günümüz Türkiye'sinde sağlık sektörü, toplumun birçok yönünü etkileyen hayati bir konumda yer almaktadır. Yatırım kapasitesini ve mevcut kaynaklarını en verimli şekilde kullanması gereken temel birimlerin başında gelen hastaneler, sağlık sisteminin merkezî hizmet sağlayıcılarıdır. Pek çok paydaşı içeren bu sektörde, iller düzeyinde hastane performansının Veri Zarflama Analizi (VZA) ile değerlendirilmesi, kamu sektöründe verimliliğin artırılması açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bu çalışma, kamu hastanelerinin operasyonel etkinliğini analiz etmeyi ve onları optimum performans düzeylerine yönlendirmeyi amaçlamakta; böylece ulusal refaha ve yaşam kalitesinin sürdürülebilirliğine katkı sağlamayı hedeflemektedir. Önceki çalışmalardan farklı olarak, bu araştırma yalnızca VZA ile iller düzeyinde verimlilik analizi yapmakla kalmayıp, yapay sinir ağlarının denetimsiz öğrenme yöntemlerinden biri olan Özdüzenleyici Haritalar (SOM) yöntemini de sürece dâhil ederek, verimlilikteki farklılıkları etkileyen temel faktörleri ortaya koymayı ve açıklamayı amaçlamaktadır. SOMDEA olarak adlandırılan bu bütünleşik yaklaşım, iller arasındaki performans farklılıklarının daha anlaşılır ve kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

1. INTRODUCTION

The healthcare sector is one of the most strategic components of public service, directly influencing a country's economic development, social welfare, and overall quality of life [1]. In developing countries such as Turkey, a considerable share of public expenditure is allocated to healthcare. Therefore, the efficient use of limited resources has become a national priority to ensure the sustainability of health policies and equitable access to services [2]. Public hospitals, as the main service providers, constitute the backbone of the healthcare system both in terms of cost and service delivery. Accordingly, assessing their performance regularly and accurately is essential for policy improvement and effective resource allocation [3].

In Turkey, the healthcare system has experienced significant growth and development over the past decades, with improvements in infrastructure, service coverage, and health outcomes. Despite this progress, inter-provincial disparities remain a concern, making it crucial to evaluate hospital performance at the provincial level to inform targeted policy interventions.

Hospitals are complex institutions where multiple inputs—such as medical personnel, hospital beds, equipment, and pharmaceuticals—are transformed into outputs like outpatient services, inpatient treatments, recovery rates, patient satisfaction, and surgical procedures. Due to this complexity, traditional performance evaluation techniques often fall short in capturing overall efficiency. For this reason, quantitative and multi-criteria methods such as Data Envelopment Analysis (DEA) have gained prominence. DEA is a non-parametric frontier method that enables the measurement of the relative efficiency of Decision-Making Units (DMUs) using multiple inputs and outputs without requiring a predefined production function [4,5]. In Turkey, numerous studies have employed DEA to analyze hospital efficiency and to highlight inter-provincial differences in healthcare performance [6,7].

However, while DEA provides an efficiency score, it does not explain the underlying reasons for efficiency or inefficiency, nor how socio-economic, demographic, or environmental factors influence performance across regions. This represents a gap in the current literature: the reasons for inter-provincial differences in hospital performance in Turkey are not sufficiently explained. To address this limitation, recent studies have started integrating artificial intelligence and machine learning techniques with DEA outputs [8]. Among these, Self-Organizing Maps (SOM) offer a powerful unsupervised learning approach that enables the visualization of high-dimensional data, clustering of similar units, and detection of structural patterns affecting efficiency scores [9,10].

In this study, the fundamental research question is therefore defined as follows:

"What are the underlying demographic, socio-economic, and environmental factors that explain inter-provincial differences in the efficiency of public hospitals in Turkey?" To answer this question, this study first measures provincial hospital efficiency using the Charnes–Cooper–Rhodes (CCR) model of DEA. Subsequently, efficiency scores are combined with demographic and socio-economic indicators—such as population density, education level, per capita income, elderly and child population ratios, regional development level, and climatic conditions—and analyzed using Self-Organizing Maps (SOM). This integrated approach, termed SOMDEA, not only measures efficiency but also provides a deeper understanding of why efficiency varies across provinces. This methodological combination is rarely applied in the Turkish health policy literature and therefore constitutes the innovative contribution of this study.

2. LITERATURE REVIEW

2.1. Research Background for Data Envelopment Analysis

Hayami and Ruttan evaluated agricultural productivity in 38 countries using the Cobb-Douglas production function. Although DEA or the Malmquist Index were not applied, this study became a foundational reference for subsequent productivity analyses [11]. Capobianco and Fernandes [12] examined capital structure in the global airline industry using DEA and ratio analysis, highlighting efficient capital utilization and the importance of managerial decisions over national contexts. Luh et al. [13] and Fulginiti and Perrin [14] applied the Malmquist Productivity Index to assess cross-country productivity, demonstrating its

flexibility in international comparisons. Stepanyan [15], Dao [16], and Teker et al. [17] analyzed airline financial performance using ratio analysis and DEA, showing the effects of operational and managerial factors on efficiency. Rosini and Gunawan [18] combined DEA with TOPSIS and correlation analysis for a multi-method perspective on airline performance evaluation.

Ray and Kim [19] applied DEA to the U.S. steel industry, identifying technical and allocative inefficiencies and emphasizing regulatory compliance in operational efficiency. Yolalan [20] and Çingi and Tarım [21] evaluated Turkish banks' efficiency using DEA, revealing higher efficiency in private and foreign banks compared to public banks. Bayrak et al. [22] applied DEA to 25 textile firms in Istanbul, identifying efficient practices.

Doğan and Tanç [23] evaluated 18 accommodation businesses in Cappadocia, identifying efficient firms and suggesting improvements for others. Ayan and Perçin [24] compared standard, constrained, and fuzzy DEA for Turkish automotive firms, finding fuzzy DEA more realistic. Saranga [25] examined Indian auto parts firms, highlighting working capital management's impact on operational efficiency. Apearing and Thollander [26] studied industrial energy efficiency barriers, emphasizing organizational factors. Debnath and Sebastian [27] assessed India's iron and steel industry productivity with DEA, noting inefficiencies in public enterprises. Özcan and Anıl [28] analyzed Turkey's top 500 steel firms with DEA and the Malmquist Index, illustrating differences in sensitivity between methods. Şengül [29] evaluated efficiency trends of basic metal firms in BIST 100 using DEA.

Mukherjee et al. [30] assessed public banking efficiency by combining service quality and DEA, finding high-quality services linked to better resource-to-performance transformation. Kayalıdere and Kargın [31] evaluated textile and cement firms on ISE using DEA, identifying efficient and inefficient firms. Önal and Sevimeser [32] applied DEA to Turkish banks (1980–2004), showing efficiency differences among foreign, state-owned, and private banks. Lo and Lu [33] implemented a two-stage DEA for Taiwanese holding companies, finding larger firms generally more efficient. Kula and Özdemir [34] assessed cement companies with input-oriented DEA, identifying efficient firms and improvement targets. Ertuğrul and Işık [35] evaluated basic metals firms using output-oriented CCR DEA, suggesting benchmarks for inefficient companies. Behdioğlu and Özcan [36] applied DEA to 29 Turkish banks (1999–2005), reporting average efficiency scores and identifying efficient groups under CCR and BCC models. Erik and Kuvvetli [37] applied the input-oriented CCR model to evaluate the Industry 4.0 integration efficiency of 24 manufacturing firms in the Adana region of Turkey, using 39 inputs covering IT infrastructure, ERP module usage, R&D activities, and quality management. They found that 13 of the firms achieved an efficiency score of 1, indicating relative efficiency in Industry 4.0 readiness.

2.2. DEA in Healthcare Institutions

Efficiency in hospitals, as key components of the healthcare sector, is crucial for effective resource management and quality service delivery. Accordingly, Data Envelopment Analysis (DEA) has been widely employed to evaluate hospital performance, treating healthcare providers as decision-making units (DMUs) and using various inputs and outputs.

Kirigia et al. [38] assessed 32 healthcare facilities in Kenya, using six input variables (clinical staff, allied health personnel, laboratory staff, administrative personnel, non-salary expenditures, and beds) and four output measures, including outpatient visits, antenatal/family planning services, vaccinations, and general consultations. Steinmann et al. [39] analyzed hospitals in Germany and Switzerland, using staff, expenses, and beds as inputs and patient bed-days as output. Spinks and Hollingsworth [40] conducted a cross-country OECD comparison with GDP, education, health expenditure, and unemployment as inputs and life expectancy as output.

Nayar and Ozcan [41] examined 53 hospitals to investigate the effect of quality indicators on efficiency. They used technical inputs (beds, expenditures, assets, staff expenses), technical outputs (discharges, outpatient visits, educational expenditures), and quality outputs (patients receiving antibiotics, oxygen, and pneumococcal vaccines), and found that quality measures significantly affected efficiency.

In Turkey, Ayanoğlu et al. [42] analyzed 16 hospitals using financial inputs (material, personnel, outsourced services, other expenditures, depreciation) and service revenue as output. Yiğit [43] evaluated all hospitals under Public Hospital Unions with three inputs (specialist physicians, general practitioners, hospital beds) and six outputs, including outpatient visits, inpatient admissions, surgeries (A, B, C), and bed occupancy rate. Bardakçı and Filiz [44] assessed six public hospitals in Artvin, Turkey, using beds, doctors, and nurses as inputs and surgeries, outpatient visits, and inpatient admissions as outputs.

Asandului et al. [45] and Cetin and Bahce [46] applied DEA to public healthcare systems in European and OECD countries, examining inputs such as physicians, hospital beds, and healthcare expenditures, with outputs including life expectancy, disability-free life expectancy, and infant mortality.

Digital hospital efficiency has also been studied in Turkey. Kılıç [47] demonstrated that digital hospitals improved workflow efficiency, reduced paper-related costs, and enhanced service quality. Tüfekçi et al. [48] reviewed the HIMSS EMRAM model and Turkey's digital healthcare progress, while Bayer et al. [49] highlighted practical advantages of digital hospitals, such as faster patient tracking, improved safety, and reduced administrative costs.

Some DEA applications in the healthcare sector, including authors, year, institutions, and input-output variables, is presented in Table 1.

Table 1. DEA studies applied in the public sector in the literature

Author and year	Public institution applied	Inputs	Outputs
Güçlü [50] - 1999	35 military hospitals under the Turkish Armed Forces	Number of physicians, beds, and other healthcare staff	Number of inpatients, outpatient visits, surgeries, tests, and medical board decisions
Özdemir [51] – 2015	Black Sea Economic Cooperation (BSEC) countries	Health expenditure per capita, doctors per capita, and the number of hospital beds	Population, healthy life expectancy
Şenol and Gençtürk [52] - 2017	Public Hospitals in Turkey	Number of beds, number of physicians, the number of nurses and midwives	Outpatient clinic examination, number of emergency examinations, number of operations in group A, number of operations in group B, number of operations in group C, number of hospitalized patients

2.3. Study Motivation

Overall, the literature demonstrates that DEA has been widely applied across different sectors including agriculture, banking, manufacturing, and transportation. These studies collectively highlight the flexibility of DEA in evaluating relative efficiency under multiple input–output conditions. However, although DEA has been extensively used for productivity measurement, relatively fewer studies integrate DEA with machine learning techniques to explore the structural determinants of efficiency. This gap provides motivation for the present study, which combines DEA with Self-Organizing Maps (SOM) to uncover underlying demographic and socio-economic factors affecting healthcare efficiency across provinces in Turkey.

3. MATERIAL AND METHOD

3.1. Study Framework

This study is structured in three main stages, as illustrated in Figure 1. First, data required for the Data Envelopment Analysis (DEA) were collected. Second, DEA was applied to measure the relative efficiency of decision-making units (DMUs). Third, efficiency scores were analyzed using Kohonen Self-Organizing Maps (SOM) to identify key factors influencing efficiency levels. In Figure 1, orange colors show input variables, blue colors show Output Variables and purple colors show city demographic variables.

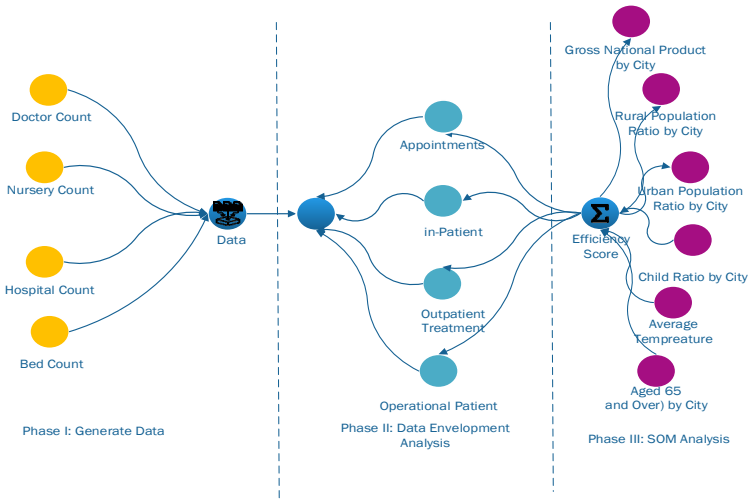


Figure 1. Study framework

3.2. Material

The study utilizes provincial-level data from the *Health Statistics Yearbook 2023* [53], published by the Ministry of Health of Turkey. In the DEA, all hospitals within each province were considered as DMUs.

Inputs were selected based on common indicators in the literature [50-52], including:

- *Number of hospitals*
- *Number of beds*
- *Number of physicians*
- *Number of nurses and midwives*

Outputs included:

- *Number of outpatient visits*
- *Number of inpatients*
- *Total inpatient days*
- *Number of surgeries*
- *Bed turnover rate*

After computing efficiency scores at the provincial level, demographic characteristics were incorporated to analyze their relationship with efficiency indices using SOM.

3.3. Method

3.3.1. Data Envelopment Analysis (DEA)

Data Envelopment Analysis (DEA) is a linear programming approach developed to evaluate the relative efficiency of DMUs producing similar goods or services, especially when multiple inputs and outputs exist. The method, initially introduced by Charnes et al. [54], has been widely applied in healthcare, education, banking, and manufacturing.

Key features of DEA include:

- Handling multiple inputs and outputs simultaneously,
- No requirement for a predefined functional relationship between inputs and outputs,
- Efficiency comparison against reference DMUs or peers,
- Flexibility in measurement units,

Input selection criterion: To ensure the robustness of DEA results, the number of DMUs (n) and the number of inputs (m) and outputs (s) were determined according to the commonly used rule in DEA studies [55]:

$$n \geq \max\{m * s, 3(m + s)\} \quad (1)$$

This criterion ensures sufficient DMUs to avoid overestimation of efficiency scores. In this study, 81 provinces in Turkey were considered as Decision Making Units (DMUs). The model includes four input variables and five output indicators. According to Equation (1), the number of DMUs satisfies the recommended rule for DEA applications, ensuring the robustness of the efficiency estimation.

3.3.2. DEA Models

The study applies the input-oriented Charnes–Cooper–Rhodes (CCR) model under constant returns to scale (CRS). Input-oriented models are appropriate when outputs are difficult to control directly, focusing on minimizing inputs for a given level of output. The CCR efficiency of DMU k is defined as:

$$\text{CCR Efficiency} = \frac{\sum_{r=1}^{s} u_r * y_r}{\sum_{i=1}^{m} v_i * x_i} \quad (2)$$

where y_r and x_i denote outputs and inputs, u_r and v_i are weights, s is the number of outputs, and m is the number of inputs. For comparison, the Banker–Charnes–Cooper (BCC) model allows variable returns to scale (VRS) by adding the convexity constraint $\sum_{j=1}^{n} \lambda_j = 1$ separating scale efficiency from technical efficiency [56].

The fractional programming form of the CCR model can be transformed into a linear programming problem for computational purposes. The input-oriented CCR model can therefore be expressed as the following linear programming formulation (3):

$$\begin{aligned} &min\theta \text{s.t.} \\ &\sum_{j=1}^{n} \lambda_j x_{ij} \leq \theta x_{ik} \\ &\sum_{j=1}^{n} \lambda_j y_{rj} \geq y_{rk} \\ &\lambda_j \geq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

where θ represents the efficiency score of the evaluated DMU k, x_{ij} and y_{rj} denote the input and output values of DMU j, x_{ik} and y_{rk} denote the inputs and outputs of the evaluated DMU k, and λ_j are intensity variables defining the reference frontier. This linear programming problem is solved for each DMU to obtain its relative efficiency score with respect to the efficient frontier constructed by the observed units.

3.3.3. Computational Environment and Software

All analyses in this study were performed using Python 3.10 on a Windows 10 environment. The following libraries were given at Table 2. The computational environment relied on several widely used scientific computing libraries in Python. Pandas was used for data manipulation and preprocessing [57]. NumPy for numerical computation [58], and SciPy for linear programming optimization [59]. Data normalization was performed using the MinMaxScaler function from the scikit-learn machine learning [60]. Self-Organizing Maps were implemented using the MiniSom library [61].

Table 2. Using software packages with Python

Component	Library	Version	Purpose
Linear programming	SciPy (linprog, HiGHS)	1.12	CCR/BCC DEA solution
Data processing	pandas	2.2	IO & preprocessing
Numerical computation	numpy	1.26	Matrix operations
Normalization	scikit-learn (MinMaxScaler)	1.4	Input–output scaling
Visualization	matplotlib	3.8	Figures
SOM	MiniSom	2.3	Clustering & topology visualization

The DEA models (CCR under CRS and BCC under VRS) were implemented by directly solving the corresponding linear programs using the HiGHS interior-point solver in SciPy. No external DEA package was employed, allowing full control over constraints and model structure. For validation, bootstrap DEA (Simar–Wilson), super-efficiency (Andersen–Petersen), slack analysis, and ±5% sensitivity analysis were computed to evaluate the robustness of efficiency scores and frontier stability.

3.3.4. Validation and Robustness Checks

Because DEA is a deterministic, non-parametric method and is sensitive to sampling variation, several statistical and robustness procedures were implemented following Simar and Wilson [62] and Andersen and Petersen [63].

Bootstrap DEA (Simar–Wilson): To obtain bias-corrected efficiency estimates and confidence intervals, 200 bootstrap replications were performed for both CCR and BCC models. The bootstrap-corrected scores were computed as $\theta_{BC} = \theta - Bias(\theta)$, and 95% confidence intervals were derived from the empirical distribution of bootstrap samples.

Super-Efficiency (Andersen–Petersen): Outlier detection and frontier stability were assessed using the super-efficiency model, where each DMU is excluded from the reference set. Super-efficiency values greater than 1 indicate that the DMU remains efficient even when evaluated against all others, serving as a strong indicator of robustness.

Slack-Based Measures: Input slacks were calculated to verify the presence of weak efficiency and to determine whether DMUs require non-proportional adjustments after the radial contraction. Slack analysis complements θ-scores by identifying excess resources not captured by proportional reduction.

Sensitivity Analysis (±5%): To evaluate stability, inputs were perturbed by ±5% and efficiencies recalculated:

+5% inputs → decreased efficiency
–5% inputs → increased efficiency

Sensitivity results confirmed (or contradicted) the robustness of the frontier and the relative ranking of DMUs. In addition, feasibility and degeneracy control were examined during the DEA computations. All linear programming problems satisfied feasibility conditions, ensuring that each DMU could be evaluated against a valid reference set. Degeneracy issues, which may occur when multiple optimal solutions exist, were mitigated through the use of the HiGHS interior-point solver implemented in SciPy, which provides stable and numerically robust solutions for large-scale linear programming problems.

3.3.5. Self-Organizing Maps

Self-Organizing Maps (SOM), also known as Kohonen maps, are an unsupervised neural network method introduced by Teuvo Kohonen [9]. SOM is widely used for clustering, dimensionality reduction, and data visualization tasks, particularly when dealing with high-dimensional datasets. It projects complex data onto a lower-dimensional (typically two-dimensional) grid while preserving the topological properties of the input space.

In this study, SOM is applied to analyze the relationship between the DEA-based efficiency indices of Turkish provinces and various demographic variables such as population density, age structure, and education level. The main goal is to identify clusters of provinces with similar efficiency-demographic patterns and to reveal potential regional structures or disparities.

The SOM algorithm operates through the following steps:

1. **Initialization:** A grid of neurons (typically 2D) is initialized with random weight vectors of the same dimension as the input data.
2. **Best Matching Unit (BMU) Selection:** For each input vector, the neuron with the smallest Euclidean distance to the input (the BMU) is identified.

3. **Weight Update:** The weights of the BMU and its neighboring neurons are updated to become more similar to the input vector.
4. **Iteration and Convergence:** This process is repeated over several iterations, with a decreasing learning rate and shrinking neighborhood radius to ensure convergence.

SOM's ability to produce an interpretable two-dimensional map makes it particularly effective for visualizing the distribution of multidimensional provincial data. This method has been successfully applied in several socio-economic and regional development studies [64,65], demonstrating its strength in uncovering hidden patterns and clustering structures.

In this context, SOM allows the identification of provinces that share similar DEA performance scores and demographic characteristics. Such clustering results offer valuable insights into regional inequalities and can inform data-driven policy recommendations. SOM transforms complex multidimensional data into an interpretable 2D layout where topologically similar items cluster together. It has been demonstrated to effectively detect spatial and socio-economic structures even in complex systems. For example, it has been successfully applied to air quality station characterization [66] and landscape–demographic correlations via explainable SOM frameworks [67].

A recent survey of methodological improvements also highlights enhanced SOM robustness and usability in socio-economic data modeling [68].

- **DEA indices and demographic variables** are standardized and input into the SOM.
- **Topology preservation** ensures provinces with comparable profiles reside nearby on the map.
- **Post-clustering interpretation** involves analyzing neuron regions to interpret groupings—for example, identifying provinces where DEA efficiency correlates with higher education or lower population density.
- **Validation** through silhouette analysis, U-matrix visualizations, and cluster stability testing.

This mapping facilitates a nuanced understanding of how demographic patterns link with performance outcomes, providing a data-driven basis for targeting regional policy interventions.

3.3.6. Healthcare Industry in Turkey

Turkey's healthcare system operates within a mixed model, integrating public provision through universal health insurance with a growing private sector. Since the launch of the Health Transformation Program in 2003, significant progress has been made in access, coverage, and key health indicators. As of 2024, over 99% of the population is covered by the Social Security Institution (SGK), yet healthcare expenditure remains relatively low—approximately 6.3% of GDP—compared to the OECD average [69].

Despite broad insurance coverage, the Turkish healthcare system continues to face challenges such as regional inequalities in service provision, workforce shortages in rural areas, and increasing pressure due to population aging. Moreover, the growing demand for private services has amplified debates around healthcare equity and efficiency [70].

Recent studies have emphasized emerging trends in Turkey's health sector, including the rapid development of digital health technologies such as telemedicine, which gained momentum during and after the COVID-19 pandemic. For example, recent findings show that telecardiology systems in Istanbul have contributed to reducing both patient costs and carbon emissions [71].

Turkey has also positioned itself as a global player in medical tourism, supported by state-backed initiatives and competitive pricing. In 2024, the sector was valued at approximately $3.9 billion and is expected to grow steadily over the next decade [72].

In Turkey, the healthcare sector is one of the areas with the highest concentration of public expenditures, and these expenditures have been increasing steadily over the years. Figure 2 presents a graph illustrating public health expenditures and non-interest expenditures, summarizing the trend in healthcare spending.

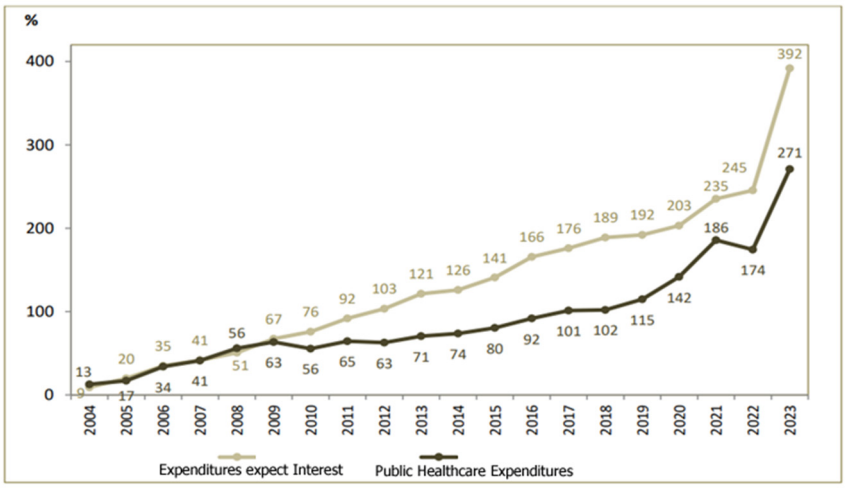


Figure 2. Change in public health expenditures over the years [73]

As can be seen in Figure 2, healthcare spending is constantly increasing, with a 392% increase, exceeding normal levels, in 2023 compared to the previous year. This undoubtedly has a significant impact on households. Figure 2 shows that per capita healthcare spending for 2023 is ₺2,589.

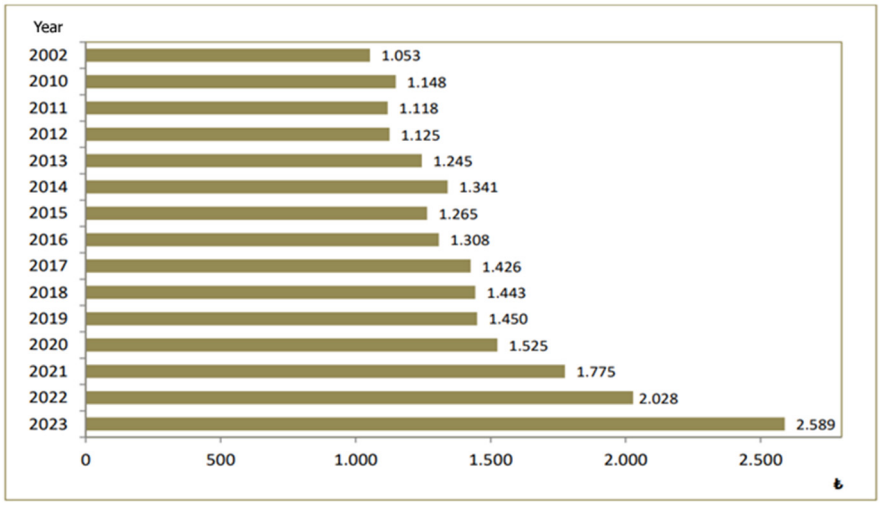


Figure 3. Out-of-pocket healthcare expenditures per capita, Real, ₺, 2023 [73]

As can be seen in Figure 3, per capita healthcare spending has generally increased by around 250%. When we correlate this figure with annual population growth, we see that it has increased at a higher rate. Consequently, we believe that considering the Turkish healthcare sector as a significant system utilizing such a large amount of expenditure and input, evaluating it, and analyzing inefficiencies will create significant added value. Numerous studies conducted using DEA can be found in the literature focusing on this sector. Therefore, comparing the recently published 2023 indicators with past studies on productivity is crucial. This allows us to assess how the healthcare sector in Turkey has evolved in terms of productivity.

4. FINDINGS

4.1. DEA Findings

In analyses conducted using Python 3.1, efficiency analyses were performed on a provincial basis using both the BCC and CCR methods. During the DEA, provinces were selected as DMUs, and the number of beds, doctors, hospitals, nurses, and midwives were used as input variables for the year 2023, while the number of examinations, inpatients, surgeries, days in bed, and bed turnover were used as output variables. The graph showing efficiency scores using the CCR and BCC methods is shown in Figure 4.

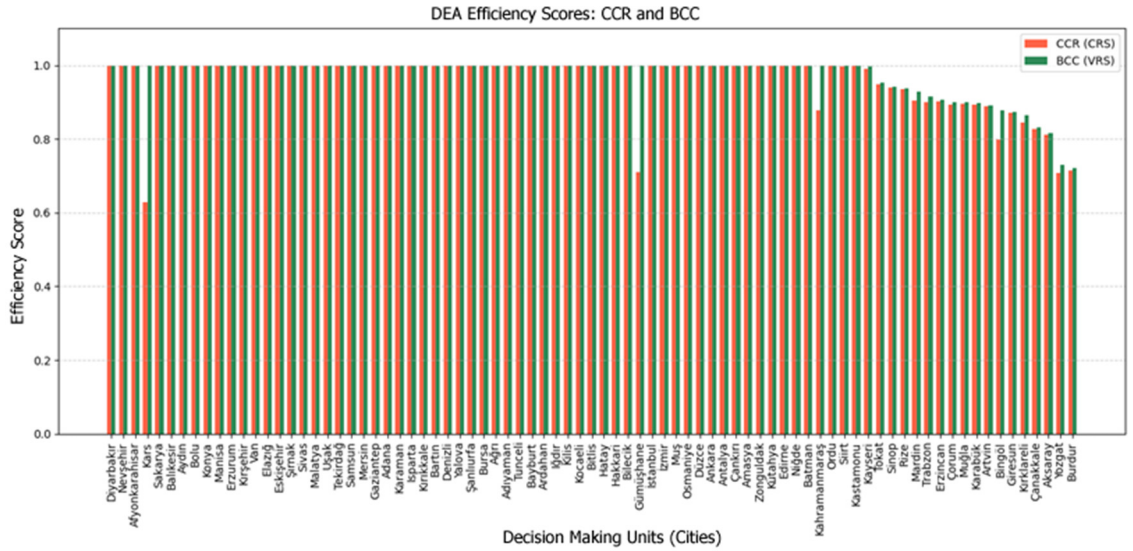


Figure 4. Efficiency scores by province using the CCR and BCC results for every city in Turkey

Analysis of the findings reveals that 22 cities had poor efficiency scores according to the CCR method, with Kars having the lowest score at 0.628610. Eighteen provinces also had low efficiency scores according to the BCC method, with Burdur having the lowest efficiency score at 0.720798.

4.2. Self-Organizing Maps (SOMDEA) Findings

After obtaining productivity scores by province, the aim was to investigate the impact of demographic characteristics on these productivity scores. For this purpose, the Self-Organizing Maps method, a frequently used unsupervised learning method in the literature, was chosen. The dataset used in this phase consisted of CRS values obtained through DEA, along with demographic data for each province, including population, rural population ratio, child ratio, elderly ratio, GDP, and average years of schooling. Using python script implements a Self-Organizing Map (SOM) based Data Envelopment Analysis (SOMDEA) approach to evaluate the efficiency of public hospitals in Turkey at the regional level. The data is first loaded and managed using pandas, a standard library for scientific data manipulation in Python. Pandas enables efficient reading of Excel files, handling missing values, and extracting relevant features, which is essential for preprocessing in operations research and efficiency studies.

Before training the SOM, the input data is normalized using MinMaxScaler from scikit-learn. Normalization scales all features to a common range [0,1], ensuring that variables with larger magnitudes do not dominate the training process. This step is critical because SOMs are sensitive to the relative scale of input variables, and proper normalization preserves the contribution of each feature in clustering and pattern recognition.

The core of the analysis is performed using MiniSom, a lightweight Python library for Self-Organizing Maps. SOMs are unsupervised neural networks that map high-dimensional input data onto a lower-dimensional grid while preserving the topological structure. In this code, a 9×9 SOM grid is trained with 500 iterations, using a learning rate of 0.5 and a neighborhood radius (sigma) of 1.0. During training, each hospital (Decision Making Unit, DMU) is associated with a "winning neuron" that represents its position on the SOM, allowing similar hospitals to cluster together.

Finally, the regional analysis is conducted by mapping each province to its corresponding SOM neuron and averaging the weight vectors within each region. The results are visualized using matplotlib as radar charts, showing the characteristic feature patterns for each Turkish region. This combination of SOM and DEA (SOMDEA) provides a robust framework for uncovering latent efficiency patterns among hospitals, combining the clustering capability of SOMs with the benchmarking perspective of DEA. Figure 5 shows the Self Organizing Maps of our study.

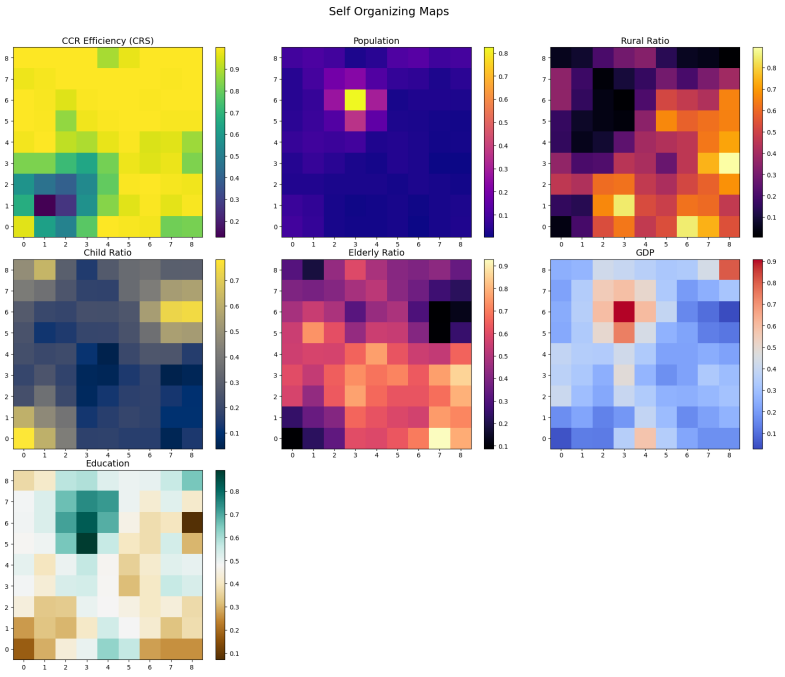


Figure 5. SOMDEA maps

As shown in Figure 5, a dataset consisting of 7 variables was used in the analysis. Training was performed using a 9×9 Kohonen map. In the resulting visualizations, lighter colors represent higher values, whereas darker colors represent lower values. The interpretation was conducted by analyzing the demographic variables and their effects, specifically on CRS (Constant Returns to Scale) efficiency. The findings obtained from Figure 5 are as follows:

- The region with the highest population is also the one with the lowest proportion of rural population. However, some provinces with relatively low populations also exhibit low rural population ratios.
- The region with the highest population is also among the provinces with the highest CRS efficiency.
- In provinces with the lowest CRS efficiency, it is observed that these regions tend to have low GDP, the shortest average years of schooling, and an above-average elderly population. Additionally, the proportion of children is also high in these areas.
- In regions where the rural population ratio is high and the elderly population is also high, CRS efficiency appears to be at a good level.
- In provinces with the highest average years of schooling, CRS efficiency is also high, indicating that as the average education level increases, the efficiency of institutions (i.e., hospitals) in those regions improves.
- In provinces with high GDP levels, CRS efficiency is generally high. However, in some low-GDP provinces, CRS efficiency was still found to be high, likely due to lower elderly population ratios.
- Provinces with the highest child population also tend to have the lowest elderly population, and low education levels and low GDP characterize these regions. Despite this, CRS efficiency is still high, suggesting that a high child population may positively influence efficiency.
- Provinces with higher average years of schooling also tend to have higher GDP values, suggesting a positive correlation between education level and income.
- There is a single point of extreme population density (shown in yellow), likely representing a highly populated city like Istanbul, while other regions are sparsely populated. This indicates a clear imbalance in population distribution across Turkey, which is reflected in the SOM map.
- No systematic effect of population on VRS efficiency was observed. Both highly populated and sparsely populated areas can be efficient.
- The rural population ratio does not directly align with CCR efficiency. Being rural or urban alone is not a decisive factor.

- The child population ratio is not negatively correlated with CCR efficiency. Some areas with high child populations fall into efficient categories.
- As the elderly population increases, CCR efficiency tends to decrease. In other words, regions with a predominantly elderly population are more likely to be classified as less efficient.
- As GDP increases, CCR efficiency also tends to rise, suggesting that economic strength is associated with higher efficiency. There is a clear and positive relationship between education level and CCR efficiency.

The provinces identified as efficient according to the CCR model generally exhibit strong performance in several key input categories. Specifically, efficient provinces tend to have a higher number of physicians and nurses per capita, a well-distributed bed capacity, and higher bed turnover rates, indicating optimized use of hospital infrastructure. In addition, provinces with larger hospital networks (measured by total hospital count) and greater specialization capabilities tend to reach or approach the efficiency frontier. These results suggest that human resource density, rather than physical capacity alone, plays a critical role in driving efficiency. The SOM analysis further supports this finding by clustering efficient provinces together with those possessing higher education levels, higher GDP, and lower elderly dependency ratios, indicating that favorable socio-economic conditions indirectly enhance hospital input utilization.

For provinces classified as inefficient, the SOM clusters reveal several shared demographic and socio-economic characteristics. Inefficient provinces generally fall into clusters with low GDP, low average years of schooling, and high elderly population ratios, suggesting a structural disadvantage in both the availability and utilization of healthcare resources. In addition, these regions commonly exhibit a higher rural population ratio, which may contribute to reduced accessibility to centralized healthcare services and increased logistical burden on hospitals. The SOM clusters also show that inefficient provinces often have high child dependency ratios combined with low population density, a pattern associated with higher demand pressure but limited service delivery capacity. This complementary analysis highlights that inefficiency is not solely caused by hospital-level operational issues, but is systematically related to regional socio-economic constraints. Incorporating SOM findings into the interpretation therefore strengthens the explanatory depth of the DEA results.

5. DISCUSSION

The results of the Data Envelopment Analysis (DEA) indicate that significant inter-provincial disparities in efficiency persist within Turkey's healthcare system. According to the CCR model, 22 provinces exhibited low efficiency scores, while the BCC model identified 18 provinces with low efficiency. This finding suggests that, although efficiency has improved in some regions compared to previous years, regional imbalances remain a continuing issue.

For instance, Yiğit [43], in a study based on 2013 data, found that 25 provinces were technically inefficient under the CCR model. Similarly, Bardakçı and Filiz [44], in their study based on 2016–2017 data, reported that among hospitals in the province of Artvin, four were efficient while two were found to be inefficient. The findings of the present study indicate that although some provinces have shown relative improvement over time, there is still a pressing need for comprehensive, region-specific strategies to enhance overall efficiency across the country.

The fact that provinces such as Kars and Burdur stand out with low efficiency scores suggests an imbalance between resource utilization and service outputs in those areas. The literature frequently highlights that low GDP and low levels of education negatively affect efficiency [40,46]. In this context, the findings from the Self-Organizing Maps (SOM) analysis in this study—which show that areas with shorter average years of schooling, low GDP, and a high elderly population tend to have low CRS scores—are consistent with previous research.

The positive relationship between education level and CRS efficiency aligns with earlier studies. For example, Spinks and Hollingsworth [40], in a comparative analysis among OECD countries, found that countries with higher average years of schooling tend to have more efficient healthcare systems. Similar findings were observed in this study concerning Turkey.

Another notable point is that some provinces with low GDP still exhibited high CRS scores. This may indicate that in regions with a younger population and consequently lower elderly care costs, hospital services operate more efficiently and at a lower cost. For such regions, health policies prioritizing child health may further support overall system efficiency.

In general, this study based on 2023 data demonstrates that while there has been some improvement in efficiency levels in Turkey's healthcare sector over time, regional inequalities in efficiency remain a challenge yet to be resolved. The increasing use of AI-assisted methods, such as Self-Organizing Maps (SOM), in the literature allows not only for measuring efficiency levels but also for modeling and explaining the underlying causes of inefficiency [8,9]. Regional based SOM results an also evaluated at Figure 5.

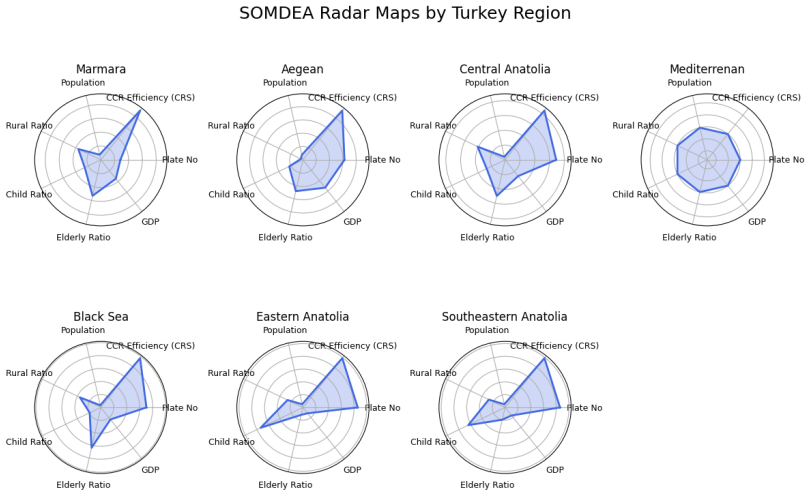


Figure 6. SOMDEA radar maps

At Figure 6, the radar charts provide a comparative visualization of the normalized socioeconomic and demographic indicators across Turkey's seven geographical regions. Each chart integrates multiple variables—Population, CCR Efficiency (CRS), Plate Number, GDP, Elderly Ratio, Child Ratio, and Rural Ratio allowing a multidimensional assessment of regional characteristics within the SOMDEA framework. This structure supports an understanding of how demographic composition and economic capacity interact with measured efficiency across regions.

The Marmara Region demonstrates a distinct profile characterized by high CCR efficiency and balanced performance across other indicators. As Turkey's most industrialized and urbanized region, Marmara's moderate-to-high values in population and GDP align with its developed economic structure. Similarly, the Aegean Region reflects high efficiency levels combined with stable demographic ratios, suggesting a mature socioeconomic environment with moderate administrative and economic loads.

Central Anatolia exhibits efficiency levels comparable to Marmara and the Aegean, supported by a relatively balanced distribution in rural, child, and elderly ratios. This pattern indicates a diversified demographic composition and consistent economic performance across the region's provinces. In contrast, the Mediterranean Region presents more moderate and evenly distributed values across all indicators, reflecting a region that maintains demographic balance while demonstrating slightly lower efficiency compared to western regions.

The Black Sea Region displays a unique structure with a notably high rural population ratio. While its efficiency level remains strong, the region's demographic pattern is characterized by a higher proportion of rural settlements and moderate elderly and child ratios. Eastern Anatolia, on the other hand, reveals a demographic profile marked by high rural and child ratios alongside lower population and GDP values. Despite these structural challenges, the region maintains a high efficiency score, suggesting effective resource utilization within its contextual constraints.

Finally, Southeastern Anatolia demonstrates a prominently high child ratio and relatively low elderly ratio, indicative of a younger population structure. Although the region's GDP levels are modest, its CCR

efficiency remains strong, pointing to potential advantages in demographic dynamism. Overall, the comparative analysis of the radar charts reveals that western regions generally exhibit more balanced socioeconomic indicators and consistently high efficiency, while eastern regions are characterized by younger populations, higher rurality, and lower economic output, yet maintain considerable efficiency within the SOMDEA assessment.

6. CONCLUSIONS

This study adopts an integrated approach by employing Data Envelopment Analysis (DEA) and Self-Organizing Maps (SOM) to measure the efficiency of public hospitals in Turkey at the provincial level. Initially, the relative efficiency levels of hospitals were calculated using the Charnes-Cooper-Rhodes (CCR) and Banker-Charnes-Cooper (BCC) models. Then, the relationships between efficiency scores and various demographic and socio-economic variables were visualized and analyzed through the SOM method.

Based on 2023 data, the study found that, according to the CCR model, 22 provinces and, according to the BCC model, 18 provinces exhibited low performance in terms of efficiency. Compared to previous years, these figures indicate a modest improvement. For example, Yiğit [43] reported that 25 provinces were inefficient based on 2013 data.

The findings reveal that the healthcare infrastructure does not solely determine hospital efficiency but is also closely related to a wide range of factors such as population structure, economic development, rural/urban ratios, education levels, and age distribution of the provinces. Notably, provinces with higher education levels and per capita income tend to exhibit higher efficiency, while those with a larger elderly population generally display lower efficiency scores.
In this context, policies aimed at improving efficiency in healthcare services should not be limited to the healthcare delivery system but should also be integrated with regional development initiatives, investments in education, and broader social policies.

Overall, the integrated SOMDEA approach presented in this study offers a methodological advancement by not only identifying efficiency levels but also uncovering the underlying socio-economic patterns associated with provincial disparities. The complementary use of SOM enhances traditional DEA interpretations by illustrating the structural factors that shape efficiency outcomes. Implementing the recommended revisions such as incorporating more detailed SOM-based interpretations and refining the presentation of efficient and inefficient groups will significantly enhance the analytical depth and policy relevance of the study. By strengthening these elements, the manuscript will provide clearer guidance for regional healthcare planning and contribute more effectively to the ongoing academic discussion on public-sector efficiency measurement.

For Future studies, conducting similar analyses over multiple years, incorporating time series and trend analyses, and performing comparative assessments between public and private hospitals will contribute to a more in-depth understanding of the healthcare system.

In conclusion, although there has been a partial increase in efficiency in Turkey's healthcare system, regional disparities remain a significant issue. In this regard, the proposed SOMDEA method provides more comprehensive and actionable insights than traditional efficiency analyses, enriching the academic literature. Future studies may focus on expanding the model to include time series and private sector comparisons to enhance its explanatory power further.

7. REFERENCES

1. World Health Organization, (2020). *Health and the economy: A vital relationship*. https://www.who.int /teams/ health-financing-and-economics/economic-analysis/health-and-wealth
2. Tatar, M., Mollahaliloğlu, S., Şahin, B., Aydın, S., Maresso, A. & Hernández-Quevedo, C. (2011). Turkey: Health system review. *Health Systems in Transition, 13*(6), 1-186.
3. O'Neill, L., Rauner, M., Heidenberger, K. & Kraus, M. (2008). A cross-national comparison and taxonomy of DEA-based hospital efficiency studies. *Socio-Economic Planning Sciences, 42*(3), 158-189.

4. Chilingerian, J. A. & Sherman, H. D. (2011). Health-care applications: From hospitals to physicians, from productive efficiency to quality frontiers. In W. W. Cooper, L. M. Seiford, & J. Zhu (Eds.), *Handbook on data envelopment analysis* (2nd ed., 164, 445-493). Springer.

5. Özcan, Y.A. (2014). *Health care benchmarking and performance evaluation: An assessment using data envelopment analysis (DEA)* (2nd ed.). Springer.

6. Manavgat, G. & Demirci, A. (2020). Decentralization matter of healthcare and effect on regional healthcare efficiency: Evidence from Turkey. *Sosyoekonomi, 28*(44), 261-281.

7. Küçük, A., Özsoy, V.S. & Balkan, D. (2019). Assessment of technical efficiency of public hospitals in Turkey. *European Journal of Public Health, 29*(Suppl. 4), ckz143.

8. Emrouznejad, A. & Yang, G.L. (2018). A survey and analysis of the first 40 years of scholarly literature in DEA: 1978-2016. *Socio-Economic Planning Sciences, 61*, 4-8.

9. Kohonen, T. (1982). Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biological Cybernetics, 43*(1), 59-69.

10. Vesanto, J. & Alhoniemi, E. (2000). Clustering of the self-organizing map. *IEEE Transactions on Neural Networks, 11*(3), 586-600.

11. Hayami, Y. & Ruttan, V.W. (1970). Agricultural productivity differences among countries. *American Economic Review, 60*(5), 895-911.

12. Capobianco, H.M.P. & Fernandes, E. (2004). Capital structure in the world airline industry. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, 38*(6), 421-434.

13. Luh, Y.H., Chang, C.C. & Huang, F.M. (2008). Efficiency change and productivity growth in agriculture: A comparative analysis for selected East Asian economies. *Journal of Asian Economics, 19*(4), 312-324.

14. Fulginiti, L.E. & Perrin, R.K. (1997). LDC agriculture: Nonparametric Malmquist productivity indexes. *Journal of Development Economics, 53*(2), 373-390.

15. Stepanyan, V. (2014). Financial performance assessment of U.S. airline companies: A ratio analysis approach (2007-2012). *International Journal of Economics and Financial Issues, 4*(1), 49-58.

16. Dao, P. (2016). Performance evaluation based on financial ratios: Case of Finnair and Scandinavian Airlines. *Master's thesis.* Metropolia University of Applied Sciences.

17. Teker, S., Teker, D. & Güner, A. (2016). Financial performance of the top 20 airlines. *Procedia – Social and Behavioral Sciences, 235*, 603-610.

18. Rosini, M. & Gunawan, F. (2018). Multi-method approach to financial performance measurement in the airline industry: Ratio analysis, TOPSIS, DEA, and correlation analysis. *Journal of Transport Economics and Policy, 52*(2), 205-221.

19. Ray, S.C., & Kim, H.J. (1995). Cost efficiency in the US steel industry: A nonparametric analysis using data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research, 80*(3), 654-671.

20. Yolalan, R. (1995). Türk bankacılık sektörü için göreli mali performans ölçümü. *TBB Bankacılar Dergisi, 19*, 35-40.

21. Çingi, H. ve Tarım, M. (2000). Türkiye'de ticari bankaların verimliliğinin veri zarflama analizi ile ölçülmesi: 1989-1990 dönemi analizi. *İktisat, İşletme ve Finans, 15*(174), 25-38.

22. Bayrak, A., Özcan, A.İ., Anıl, N.K. ve Emre, F. (2013). İstanbul ilinden seçilmiş tekstil sektörüne ait firmaların veri zarflama analizi ile etkinliklerinin ölçülmesi. *Review of Social, Economic & Business Studies, 3*(4), 161-177.

23. Doğan, N.Ö. ve Tanç, A. (2008). Konaklama işletmelerinde veri zarflama analizi yöntemiyle faaliyet denetimi: Kapadokya örneği. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 22*(1), 239-259.

24. Ayan, T.Y. & Perçin, S. (2008). Measuring efficiency of Turkish automotive firms with the fuzzy DEA model. *Hacettepe Üniversitesi İİBF Dergisi, 26*(1), 99-119.

25. Saranga, H. (2009). The Indian auto component industry: Estimation of operational efficiency and its determinants using DEA. *European Journal of Operational Research, 196*(2), 707-718.

26. Apearing, S. & Thollander, P. (2013). Barriers and drivers to industrial energy efficiency improvements: A literature review. *Energy Policy, 62*, 657-664.

27. Debnath, A.K. & Sebastian, J. (2014). Efficiency analysis of Indian iron and steel industry using data envelopment analysis. *International Journal of Productivity and Performance Management, 63*(3), 290-309.

28. Özcan, A.İ. ve Anıl, N.K. (2017). İlk 500 arasında yer alan demir-çelik sektörüne ait firmaların VZA ve Malmquist yöntemleriyle verimliliklerinin ölçümü. *Kırklareli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 6*(1), 112-120.

29. Şengül, Ü. (2020). BIST 100'de yer alan ana metal sanayi firmalarının veri zarflama analizi ile performans ölçümü. *Journal of Life Economics, 7*(2), 161-176.

30. Mukherjee, A., Nath, P. & Pal, M. (2003). Resource, service quality, and performance triad: A framework for measuring efficiency of banking services. *Journal of the Operational Research Society, 54*, 723-735.
31. Kayalıdere, A. ve Kargın, S. (2004). İstanbul Menkul Kıymetler Borsası'nda işlem gören tekstil ve çimento sektöründeki şirketlerin teknik verimlilik analizi: 2002 yılı verileriyle DEA uygulaması. *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi, 33*(2), 57-76.
32. Önal, Y. & Sevimeser, A. (2006). *Efficiency analysis of Turkish banks: A DEA approach using balance sheet data (1980–2004).* Banks Association of Turkey.
33. Lo, S.F. & Lu, W.M. (2006). Does size matter? Finding the profitability and marketability benchmark of financial holding companies. *Asia-Pacific Journal of Operational Research, 23*(2), 229-246.
34. Kula, V. & Özdemir, A. (2007). Input-oriented DEA approach for measuring the efficiency of cement industry companies: An application in Istanbul Stock Exchange. *Industrial Management & Data Systems, 107*(2), 177-193.
35. Ertuğrul, İ. ve Işık, A.T. (2008). İşletmelerin VZA ile mali tablolarına dayalı etkinlik ölçümü: Metal ana sanayiinde bir uygulama. *Afyon Kocatepe Üniversitesi İİBF Dergisi, 10*(1), 201-217.
36. Behdioğlu, S. ve Özcan, A.G.G. (2009). Veri zarflama analizi ve bankacılık sektöründe bir uygulama. *Süleyman Demirel Üniversitesi İİBF Dergisi, 14*(3), 301-326.
37. Erik, A. ve Kuvvetli, Y. (2021). Üretim işletmelerinin Endüstri 4.0 entegrasyonunun veri zarflama analizi ile değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36*(3), 637-647.
38. Kirigia, J.M., Emrouznejad, A., Sambo, L.G., Munguti N. & Liambila, W. (2004). Using data envelopment analysis to measure the technical efficiency of public health centers in Kenya. *Journal of Medical Systems, 28*, 155-166.
39. Steinmann, L., Dittrich, G., Karmann, A. & Zweifel, P. (2004). Measuring and comparing the inefficiency of German and Swiss hospitals. *European Journal of Health Economics, 5*(3), 216-226.
40. Spinks, J. & Hollingsworth, B. (2005). Cross-country comparisons of technical efficiency of health production. *Health Economics, 18*(2), 109-122.
41. Nayar, P. & Özcan, Y.A. (2008). Data envelopment analysis comparison of hospital efficiency with inclusion of quality measures. *Journal of Medical Systems, 32*(3), 193-199.
42. Ayanoğlu, Y., Atan, M. ve Beylik, U. (2010). Hastanelerde veri zarflama analizi yöntemiyle finansal performans ölçümü ve değerlendirilmesi. *Sağlıkta Performans ve Kalite Dergisi, 2*(2), 40-62.
43. Yiğit, V. (2016). Hastanelerde teknik verimlilik analizi: Kamu hastane birliklerinde bir uygulama. *Süleyman Demirel Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi, 7*(2), 9-16.
44. Bardakçı, S. ve Filiz, M. (2020). Veri zarflama analizi ile kamu hastaneleri için etkinlik ölçümü: Artvin ilinde örnek bir uygulama. *İnönü Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Dergisi, 8*(2), 445-460.
45. Asandului, L., Roman, M. & Fatulescu, P. (2014). The efficiency of healthcare systems in Europe: A data envelopment analysis approach. *Procedia Economics and Finance, 10*, 261-268.
46. Cetin, V.R. & Bahce, S. (2016). Measuring the efficiency of health systems of OECD countries by data envelopment analysis. *Applied Economics, 48*(37), 3497-3507.
47. Kılıç, T. (2016). Digital hospital: An example of best practice. *International Journal of Health Services Research and Policy, 1*(2), 52-58.
48. Tüfekçi, N., Yorulmaz, R. ve Cansever, İ.H. (2017). Dijital hastane. *Journal of Current Researches on Health Sector, 7*(2), 143-156.
49. Bayer, E., Kuyrukçu, A.N. ve Akbaş, S. (2019). Dijital hastane uygulamalarının hastane çalışanlarının ve yöneticilerinin perspektifinden değerlendirilmesi. *Akademik Araştırmalar ve Çalışmalar Dergisi, 11*(21), 335-360.
50. Güçlü, A. (1999). Türk Silahlı Kuvvetleri hastanelerinde teknik verimlilik ölçümü: Veri zarflama analizi uygulaması. *Master's thesis.* Gülhane Askeri Tıp Akademisi.
51. Özdemir, A. (2015). Hizmet sektörü etkinliğinin makro düzeyde incelenmesi: Karadeniz Ekonomik İşbirliği Teşkilatı üyesi ülkelerin sağlık sektörü üzerine bir analiz. *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 33*, 189-205.
52. Şenol, O. ve Gençtürk, M. (2017). Veri zarflama analiziyle kamu hastaneleri birliklerinde verimlilik analizi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 29*, 265-286.
53. Republic of Türkiye Ministry of Health. (2025). *Health Statistics Yearbook 2023*. General Directorate of Health Information Systems, Ankara. https://ekutuphane.saglik.gov.tr/Ekutuphane/kitaplar/S%C4%B0Y2023_%C4%B0ngilizce%2831.01.2025%29.pdf
54. Charnes, A., Cooper, W.W. & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision-making units. *European Journal of Operational Research, 2*(6), 429-444.

55. Özden, Ü. (2008). Veri zarflama analizi ile Türkiye'deki vakıf üniversitelerinin etkinliğinin ölçülmesi. *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi, 37*(2), 167-185.
56. Dinc, M. & Haynes, K.E. (1999). Sources of regional inefficiency: An integrated shift-share, data envelopment analysis and input-output approach. *Annals of Regional Science, 33*, 469-489.
57. McKinney, W. (2010). Data structures for statistical computing in Python. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, 51-56.
58. Harris, C.R., Millman, K.J., van der Walt, S.J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., Wieser, E., Taylor, J., Berg, S., Smith, N.J., Kern, R., Picus, M., Hoyer, S., van Kerkwijk, M.H., Brett, M., Haldane, A., del Río, J.F., Wiebe, M., Peterson, P., Gérard-Marchant, P., Sheppard, K., Reddy, T., Weckesser, W., Abbasi, H., Gohlke, C. & Oliphant, T.E. (2020). Array programming with NumPy. *Nature, 585*(7825), 357-362.
59. Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T.E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S.J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K.J., Mayorov, N., Nelson, A.R.J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., Carey, C.J., Polat, İ., Feng, Y., Moore, E. W., VanderPlas, J., Laxalde, D., Perktold, J., Cimrman, R., Henriksen, I., Quintero, E.A., Harris, C.R., Archibald, A.M., Ribeiro, A.H., Pedregosa, F. & van Mulbregt, P. (2020). SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods, 17*(3), 261-272.
60. Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M. & Duchesnay, É. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research, 12*, 2825-2830.
61. Vettigli, G. (2018). *MiniSom: Minimalistic implementation of self-organizing maps.*
62. Simar, L. & Wilson, P.W. (2000). A general methodology for bootstrapping in nonparametric frontier models. *Journal of Applied Statistics, 27*(6), 779-802.
63. Andersen, P. & Petersen, N.C. (1993). A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis. *Management Science, 39*(10), 1261-1264.
64. Kohonen, T. (2001). *Self-organizing maps* (3rd ed.). Springer.
65. Kaski, S. & Lagus, K. (1996). Comparing self-organizing maps. In *Proceedings of the International Conference on Artificial Neural Networks*, 809-814. Springer.
66. Costa, A., Silva, M. & Pereira, J. (2024). Characterizing air quality stations using self-organizing maps. *Environmental Monitoring Journal, 15*(1), 45-59.
67. Wandeto, J. & Dresp-Langley, B. (2024). Explainable self-organizing map frameworks for landscape–demographic correlation analysis. *Journal of Spatial Analytics, 8*(2), 110-127.
68. Guérin, M., Lefèvre, S. & Moreau, P. (2024). Advances in self-organizing map methodologies for socio-economic data modeling: A review. *Journal of Computational Social Science, 10*(1), 25-48.
69. Statista, (2024). *Health expenditure in Turkey as a percentage of GDP in 2024.* https://www.statista.com/statistics/893497/turkey-health-expenditure-as-share-of-gdp/
70. TechSci Research, (2024). *Turkey healthcare market outlook 2024*. https://www.techsciresearch.com/report/turkey-hospital-market/15177.html, Access date: 01 Haziran 2025
71. Köse, M., Yılmaz, E. & Arslan, F. (2024). Impact of telecardiology systems on patient costs and carbon emissions in Istanbul hospitals. *Journal of Digital Health Innovations, 3*(1), 12-25.
72. FMI Blog, (2024). *Medical tourism in Turkey: Market trends and future outlook*. https://www.fmi.com/blog/medical-tourism-turkey-2024,
73. Türkiye İstatistik Kurumu, (2025). *TÜİK 2024 sağlık harcamaları verileri.* https://ohsad.org/wp-content/uploads/2025/12/TUIK-2024-Saglik-Harcamalari-Verileri.pdf, Erişim tarihi: 01 Haziran 2025)

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 1 MART/MARCH 2026

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 yayınlansın veya yayınlanmasın iade edilmez. Makaleleri yayınlama 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.