ISSN: 2757-9255

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ DERGİSİ

CUKUROVA UNIVERSITY JOURNAL OF THE FACULTY OF ENGINEERING

EYLÜL SEPTEMBER 2026

Cilt/Volume 41 Sayı/Issue 3

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)*
Behzat BALCI *(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: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 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: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

İÇİNDEKİLER

Kalp Hızı Değişkenliği ve Elektrodermal Aktivite Verilerinden Anestezi Durumlarının Makine Öğrenmesi Tabanlı Sınıflandırılması 533
Machine Learning-Based Classification of Anesthesia States from Heart Rate Variability and Electrodermal Activity Data
Nesrin ALTUNTAŞ, Buse Nur DEMİR, Demet YEŞİLBAŞ, Ayşegül GÜVEN

Petrol Ürünleri İthalatının Tahmininde Geleneksel, Hibrit ve Meta-Sezgisel Yaklaşımlar: SARIMA, RF-LSTM ve DE-HW Modellerinin Karşılaştırılması 545
Advanced Time Series Approaches in Petroleum Product Import Modeling: Comparing Hybrid RF-LSTM, SARIMA, and DE-HW Models
Esra KARAKAŞ, Menşure Zühal BARAK

Identifying the Causes of Employee Turnover in Manufacturing: A DEMATEL-Based Analysis and Improvement Framework 563
Üretim Sektöründe İşgücü Devrinin Nedenlerinin Belirlenmesi: DEMATEL Tabanlı Bir Analiz ve İyileştirme Çerçevesi
Serap AKCAN YETGİN, Özgür ZATERİ

PID Position Control of a Rotary Pneumatic Actuator with Directional Control Valve 579
Yön Kontrol Valfi ile Bir Döner Pnömatik Aktüatörün PID Konum Kontrolü
Hamide ASLAN, Mehmet İlteriş SARIGEÇİLİ

CH Sınıfı Kilin Yüksek Fırın Cürufu ve Nano-SiO_2 ile Stabilizasyonunda Zamana Bağlı Dayanım Gelişimi 593
Time-Dependent Strength Development of CH Clay Stabilized with Ground Granulated Blast Furnace Slag and Nano-SiO_2
Firdevs UYSAL, Esra TATLIOĞLU, Resul MUT

Yerel Zemin Etkisinin Farklı Yaklaşımlarının Sismik Tehlike Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi: Sakarya Örneği 605
Evaluation of the Effects of Different Approaches to Local Site Effects on Seismic Hazard: A Case Study of Sakarya, Türkiye
Elif TOPLU, Osman KIRTEL

Makine Öğrenmesi Modelleri Kullanılarak Eriyik Yığma Modellemesi Süreçlerinde Enerji Verimliliğine Yönelik Parametre Optimizasyonu 623
Parameter Optimization for Energy Efficiency in Fused Deposition Modeling Using Machine Learning Models
Mehmet Şah GÜLTEKİN, Cüneyt ÖZDEMİR

Morgedik Barajı (Erciş–Van Derivasyon Tünelinde Su Kaçaklarının Enjeksiyonla Önlenmesi..... 635
Grouting-Based Mitigation of Water Leakage in the Morgedik Dam Diversion Tunnel (Erciş–Van)
Veli KESKİN

Farklı Katkı Maddeleri ile İyileştirilmiş Kil Zeminin Donma-Çözülme Davranışının Konsolidasyona Etkisi..... 651
Effect of Freeze-Thaw Behavior on Consolidation of Clay Soil Improved with Different Additives
İlkim ÖZBAHÇECİ GÖKDENİZ, Baki BAĞRIAÇIK

Multi-Algorithm-Based Optimization of LQR Controller Parameters for a Triple Inverted Pendulum System 663
Üçlü Ters Sarkaç Sistemi için LQR Denetleyici Parametrelerinin Çoklu Algoritma Tabanlı Optimizasyonu
Berivan KOÇ, Handan GÜRSOY-DEMİR

CFD Investigation of the Effect of Jet-Surface Distance on Thermal Performance in Inclined Jet Impingement Cooling..... 679
Eğimli Jet Çarpma Soğutmasında Jet-Yüzey Mesafesinin Isıl Performans Üzerindeki Etkisinin CFD ile İncelenmesi
Haydar KEPEKÇİ

Assessing Sustainability of Oil Shale as an Energy Source: CO_2 Emissions and Energy Consumption Modeling (1970–2030)..... 693
Enerji Kaynağı Olarak Bitümlü Şeyllerin Sürdürülebilirliğinin Değerlendirilmesi: CO_2 Emisyonları ve Enerji Tüketimi Modellemesi (1970–2030)
Mehmet Akif KARTAL

Adıyaman İli ve Civarında Açılan Kuyulardan Edinilen Jeomekanik Parametreler Kullanılarak Kampaniyen Yaşlı Sayındere Formasyonunda Rezervuar Üretkenliğinin Analizi ve Bölgedeki Yeni Keşif Stratejileri (Güneydoğu Anadolu, Türkiye)..... 707
Analysis of Reservoir Productivity in the Campanian-Aged Sayındere Formation Using Geomechanical Parameters Derived from Wells Drilled in Adıyaman Province and Surrounding Areas, and New Exploration Strategies in the Region (Southeastern Anatolia, Türkiye)
Mert AÇIKALIN, Ulvi Can ÜNLÜGENÇ, Ulaş İnan SEVİMLİ

Sodyum Hipoklorit ile Denim Giysi Efektlendirmenin Kumaşın Fiziksel Performansına Olan Etkisinin Farklı Makine Öğrenmesi Teknikleri Kullanılarak Tahminlenmesi 723
Prediction of the Effects of Sodium Hypochlorite-Based Denim Garment Finishing on Fabric Physical Performance Using Different Machine Learning Techniques
Ebru ÇALIŞKAN, Onur BALCI, İbrahim Erdem KALKAN, Cenk ŞAHİN, Abdulkadir AYDIN

Optimization of Centrifugal Fan Efficiency Based on Volute Meridional Inlet Width and Stepanoff Number Using CFD and Kriging-Based Response Surface Method 737
CFD ve Kriging Tabanlı Tepki Yüzeyi Yöntemi Kullanılarak Volüt Meridyonel Giriş Genişliği ve Stepanoff Sayısına Dayalı Santrifüj Fan Verimliliğinin Optimizasyonu
Melih Gazi KIRPIK, Hüseyin AKILLI, Tuğrul SAPMAZ, Hamit TÜRKMEN

Assessment of the Eddy Viscosity-Based Turbulence Models on the Solution of the Highly Separated/Attached Flow 747
Yüksek Derecede Ayrılmış/Bağlı Akışın Çözümünde Girdap Viskozitesi Tabanlı Türbülans Modellerinin Değerlendirilmesi
Ahmet Remzi ERKOÇ, Tural TUNAY

İmalat İşletmelerinde Talep Yanıtı Uygunluğunun CRITIC–MARCOS Yaklaşımıyla Değerlendirilmesi 761
Evaluation of Demand Response Suitability of Manufacturing Facilities Using the CRITIC–MARCOS Approach
Ayça ZENGİNOĞLU

Farklı Dayanım Sınıflarındaki Betonlarda Küp Numune Boyutunun Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi 779
Investigation of the Effect of Cube Sample Size on Compressive Strength in Concrete of Different Strength Classes
Mehmet ALTIN, İsmail Hakkı ÇAĞATAY

Biberiye ve Siyah Üzüm Çekirdeği Etanolik Ekstraktlarının Toplam Fenolik ve Flavonoid Madde Miktarlarının ve Biyolojik Aktivitelerinin Belirlenmesi 791
Determination of Total Phenolic and Flavonoid Contents and Biological Activity of Rosemary and Black Grape Seed Ethanolic Extracts
Ecem ÜNSAL, Ayşegül İNAM, Furkan Ozan ÇÖVEN, Tülay ÖNCÜ ÖNER

Poliklorlu Bifenillerin (PCB'lerin) Ortam Havasındaki Konsantrasyonları, Mekânsal Değişimleri ve Kaynakları 807
Concentrations, Spatial Variations, and Sources of Polychlorinated Biphenyls (Pcbs) in Ambient Air
Mehmet Ferhat SARİ, Fatma ESEN

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

Kalp Hızı Değişkenliği ve Elektrodermal Aktivite Verilerinden Anestezi Durumlarının Makine Öğrenmesi Tabanlı Sınıflandırılması

Nesrin ALTUNTAŞ [1,a], **Buse Nur DEMİR** [1,b], **Demet YEŞİLBAŞ** [2,c], **Ayşegül GÜVEN** [1,d]

[1]*Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye*
[2]*Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0009-0007-4240-9516; [b]**ORCID**: 0009-0002-3993-513X; [c]**ORCID**: 0000-0001-9070-4439; [d]**ORCID**: 0000-0001-8517-3530*

Makale Bilgileri
Geliş : 04.09.2025
Kabul : 01.07.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1777100

Sorumlu Yazar
Demet YEŞİLBAŞ
demetyesilbass@gmail.com

Anahtar Kelimeler
Nosisepsiyon
Anestezi
Elektrodermal aktivite
Kalp hızı değişkenliği
Makine öğrenmesi

***Atıf şekli:** ALTUNTAŞ, N., DEMİR, B.N., YEŞİLBAŞ, D., GÜVEN, A., (2026). Kalp Hızı Değişkenliği ve Elektrodermal Aktivite Verilerinden Anestezi Durumlarının Makine Öğrenmesi Tabanlı Sınıflandırılması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 533-544.*

ÖZ

Anestezi esnasında nosisepsiyonun doğru şekilde değerlendirilmesi, ameliyat sırasında ilaçların yetersiz veya aşırı dozda uygulanmasının önüne geçmesi açısından kritiktir. Çalışmada yaşları 28–77 arasında değişen 101 hastaya ait anestezi sürecinde kaydedilmiş Elektrodermal Aktivite (EDA) ile Kalp Hızı Değişkenliği (HRV) sinyallerini içeren açık erişimli bir veri seti kullanılmıştır. Bu verilerden ortalama, çarpıklık, basıklık ve Shannon entropisi gibi lineer ve non-lineer özellikler çıkarılmıştır. Çıkarılan özellikler makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak sınıflandırılmıştır. En yüksek performans karar ağaçları yöntemi ile elde edilmiş olup %90,3 doğruluk ve %90 F1-skor değerine ulaşılmıştır. Çıkarılan özelliklerden, EDA özelliklerinin nosisepsiyona daha doğrudan yanıt verdiği, HRV'nin ise özellikle non-lineer parametreler aracılığıyla otonom sinir sistemi değişikliklerini yansıttığı görülmüştür. Sonuçlar, multimodal EDA-HRV temelli makine öğrenmesi modellerinin nosisepsiyon varlığının objektif olarak sınıflandırılmasında klinik karar destek açısından potansiyel taşıdığını ortaya koymaktadır.

Machine Learning-Based Classification of Anesthesia States from Heart Rate Variability and Electrodermal Activity Data

Article Info
Received : 04.09.2025
Accepted : 01.07.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1777100

Corresponding Author
Demet YEŞİLBAŞ
demetyesilbass@gmail.com

Keywords
Nociception
Anesthesia
Electrodermal activity
Heart rate variability
Machine learning

***How to cite:** ALTUNTAŞ, N., DEMİR, B.N., YEŞİLBAŞ, D., GÜVEN, A., (2026). Machine Learning-Based Classification of Anesthesia States from Heart Rate Variability and Electrodermal Activity Data. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 533-544.*

ABSTRACT

Accurate evaluation of nociception stages during anesthesia is critical to preventing under- or overdosing of drugs during surgery. In this study, an open-access dataset comprising Electrodermal Activity (EDA) and Heart Rate Variability (HRV) signals recorded during the anesthesia process from 101 patients aged between 28 and 77 years was utilized. Linear and non-linear features, including mean, skewness, kurtosis, and Shannon entropy, were extracted from these signals. The extracted features were subsequently classified using machine learning methods. The highest performance was achieved with the decision tree algorithm, reaching an accuracy of 90.3% and an F1-score of 90%. Among the extracted features, EDA features were found to respond more directly to nociception, while HRV stood out due to its nonlinear parameters. The results demonstrate that multimodal EDA-HRV–based machine learning models provide a promising objective framework for classifying nociception states and may support future clinical decision-support applications.

1. GİRİŞ

Genel anestezi, cerrahi işlemler sırasında hastada bilinç kaybı, analjezi, amnezi ve kas gevşemesi (hareketsizlik) oluşturan, farmakolojik olarak indüklenen geçici bir durumdur ve modern cerrahinin temel bileşenlerinden biridir [1]. İntraoperatif farkındalık, genel anestezi altındaki bir hastanın cerrahi işlem sırasında bilincinin kısmen veya tamamen açık olması ve bu süreçte çevresindeki olayları, konuşmaları, dokunma ya da ağrı hissini algılaması durumudur. Her yıl dünya genelinde milyonlarca hasta ameliyat sırasında istemsiz intraoperatif farkındanlık yaşamaktadır ve bu durum hastaların yaklaşık %1'ini etkilemektedir [2]. İntraoperatif farkındalık, hastanın fizyolojisi ve psikolojisi üzerinde ciddi etkilere neden olabilir. Bunun aksine, aşırı derin anestezi ise, ameliyat sonrası iyileşme süresinin uzaması, karaciğer hasarı, bulantı, kusma, deliryum, inme ve hatta ölüm gibi çeşitli fizyolojik yaralanmalara yol açabilir. Dolayısıyla, anestezi sürecini doğru şekilde izlemek ve anestezi uzmanını ilaçları makul dozlarda uygulama konusunda yönlendirmek, klinik cerrahilerin güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesi için kritik öneme sahiptir [3]. Günümüzde klinik cerrahilerde, Richmond Agitation–Sedation Scale (RASS) kriterleri doğrultusunda anestezi derinliği genellikle anestezi uzmanları tarafından belirli aralıklarla manuel olarak değerlendirilmektedir. Bu süreç, cerrahi işlem sırasında karmaşık bir uyarı–tepki prosedürünün dikkatle uygulanmasını gerektirir [4]. Anestezi derinliği kalp atış hızı, solunum paternleri, kan basıncı, kandaki ilaç konsantrasyonu gibi fizyolojik göstergeler üzerinden ölçülür. Fizyolojik sinyallerin analizi, anestezi derinliğinin doğru şekilde belirlenebilmesi için anestezi uzmanlarının ileri düzeyde klinik deneyim ve alan bilgisine sahip olmasını gerektirir [5]. Ancak, öznel değerlendirmeleri destekleyebilecek ve fizyolojik sinyallere dayalı olarak anestezi/nosisepsiyon durumlarının daha objektif değerlendirilmesine katkı sağlayabilecek makine öğrenmesi tabanlı karar destek yaklaşımlarının geliştirilmesi önemli bir gerekliliktir. Elektrodermal aktivite (EDA), ter bezlerindeki ter birikiminin, bu bezleri aktive eden sempatik sinir sistemi uyarımıyla ilişkili olarak ölçülmesidir. Ter bezlerinde sıvı biriktikçe cildin elektriksel iletkenliği artar. Ter bezleri tamamen dolup ter cilt yüzeyine ulaştığında, bu durum galvanik cilt tepkisi (GSR) veya EDA sinyalinde "darbe" şeklinde kaydedilebilen kısa süreli bir iletkenlik artışına yol açar [6]. Anestezik ajanların ter bezlerinde kuruma etkisi yaratarak ter bezi aktivitesini azalttığı bilinmektedir [7]. Ayrıca, EDA'nın cerrahi işlemlerde anestezi indüksiyonu sırasında tutarlı ve güvenilir bir non-invaziv biyobelirteç olarak kullanılabileceği gösterilmiştir [8]. Kalp hızı değişkenliğinin (heart rate variability-HRV) ölçümü, otonomik aktiviteye erişilebilen bir pencere sunar. HRV'nin tipik spektral dağılımı, iki ana tepe içerir: hem sempatik hem de parasempatik aktiviteden etkilenen düşük frekans (low frequency-LF) bölgesi ile parasempatik aktiviteyle ilişkili ve solunum frekansına odaklanmış yüksek frekans (high frequency-HF) bölgesi. HRV, anestezik ilaç uygulamasını takiben meydana gelen otonomik modülasyonlar hakkında doğrudan bilgi sağlar [9]. HRV ve EDA, invaziv olmayan, düşük maliyetli ve basit bir yöntem olup otonomik aktivite hakkında hasta başı monitörü üzerinden bilgi sağlayarak anestezik ilaçların meydana getirdiği fizyolojik değişiklikler hakkında bilgi sağlar [10]. Bu iki metodun birlikte kullanımı fizyolojik durumun değerlendirmesinde daha güvenilir ve kararlı bir ölçüm sağladığı gösterilmiştir [9].

Makine öğrenmesi (MÖ), bağımsız ve bağımlı değişkenler arasındaki karmaşık ilişkileri ortaya çıkarmak amacıyla desen tanıma ve hesaplamalı öğrenme teorilerini kullanan yapay zekâ alanıdır. MÖ, karmaşık verilerin işlenmesinde etkileyici sonuçlar göstermiştir [11]. Anestezi alanında MÖ metotlarının kullanımı diğer alanlarla kıyaslandığında görece yenidir [12]. MÖ metotlarının anestezi aşamalarının izlenmesinde kullanan çalışma sayısı oldukça sınırlı olup bu çalışmaların odaklandıkları veriler yakın infra-red spektroskopisi [3], elektroensefalografi, elektrokardiyografi (EKG) verileridir [13]. Öte yandan, anestezinin izlenilmesinde doğrudan bilgi sağlayan metotlar olan EDA ve HRV'nin sınıflandırıldığı çalışma sayısı oldukça yetersizdir [14]. Niu ve arkadaşları [15], HRV ve klinik veriler kullanarak yaptıkları sınıflandırmada ameliyat sonrası dönemde gelişecek klinik sonuçları öngörmede hem uygulanabilir hem de etkili olduğunu savundular. Fauchereau ve arkadaşları [16] EKG ile anesteziyi MÖ metotları ile izledikleri çalışmada, HRV'nin anestezi sırasında bilinç durumlarını ayırt etmede önemli bir özellik olduğu bulundu. Analjezi Nosisepsiyon İndeksi'nin algılayamadığı birçok nosiseptif yanıtın multimodal HRV-EDA tabanlı modeller ile başarılı bir şekilde saptanabilmesi, bu yöntemin klinik uygulamalardaki güçlü potansiyelini açıkça göstermektedir [14]. Bu çalışmada multimodal HRV-EDA yöntemi ile elde edilmiş verileri MÖ metotları kullanarak anestezi aşamalarının sınıflandırılmasını öneriyoruz. HRV ve EDA verilerinde karmaşık ve istatistiksel özellikler çıkartıp bu özellikler üzerinden model eğitimi gerçekleştirdik.

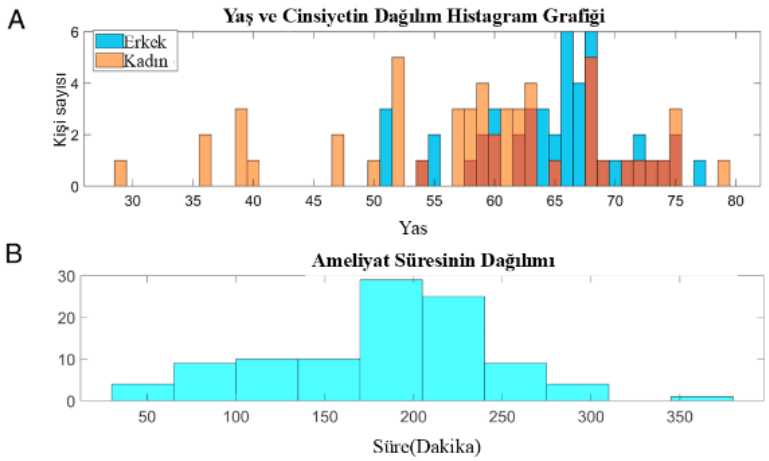
Bu çalışmada, anestezi sürecinde nosisepsiyonun objektif olarak değerlendirilmesi amacıyla EDA ve HRV sinyallerini birlikte ele alan multimodal bir yaklaşım önerilmektedir. Açık erişimli bir veri seti kullanılarak elde edilen bu sinyallerden hem lineer hem de non-lineer özellikler çıkarılmış ve bu özellikler farklı makine

öğrenmesi yöntemleri ile sınıflandırılmıştır. Çalışmanın temel katkısı, EDA ve HRV sinyallerinin birlikte değerlendirilmesi ile nosisepsiyonun daha etkin şekilde izlenebileceğini göstermesidir. Literatürde HRV ve EDA sinyallerinin ayrı ayrı ya da birlikte kullanıldığı çalışmalar bulunmakla birlikte, bu çalışmada söz konusu iki modaliteden elde edilen istatistiksel ve kompleksite temelli özelliklerin sistematik biçimde karşılaştırılması ve farklı makine öğrenmesi yöntemleriyle performans analizinin yapılması hedeflenmiştir. Bu yönüyle çalışma, multimodal EDA-HRV sinyallerinden elde edilen lineer ve non-lineer özelliklerin nosisepsiyon durumlarını ayırt etmedeki potansiyelini ortaya koymakta ve makine öğrenmesi tabanlı sınıflandırma yaklaşımlarının gelecekte geliştirilebilecek klinik karar destek sistemleri için uygulanabilir bir ön değerlendirme çerçevesi sunabileceğini göstermektedir.

2. YÖNTEM

2.1. Veriler

Çalışmada physionet.org web sayfasının sunduğu hazır HRV ve EDA sinyalleri kullanılmıştır [14]. HRV verileri 3 kanallı elektrokardiyogram sinyallerinden elde edilmiştir. Sol elin iki parmağından EDA sinyalleri Thought Technology Neurofeedback Sistemi kullanılarak elde edilmiştir. Anestezik Nosiseptif İndeks (ANİ) verisi nosisepsiyon durumunu değerlendirmek amacıyla alınmıştır. Veri toplanması, anestezinin indüksiyonundan önce başlatılıp ekstübasyondan sonraya kadar devam ettirilmiştir. Verilerin örnekleme frekansı 256 Hz'dir [14]. Veriler 28 ila 77 yaşları arasında ve 53'ü kadın ve 48'i erkek olmak üzere toplam 101 kişiye ait olup bu kişilerin yaş dağılımı Şekil 1-A'da yer almaktadır. Veri setini içeren ameliyatların toplam süresi 18.582 dakika olup, sürelerinin dağılımı ise Şekil 1-B'de yer almaktadır.



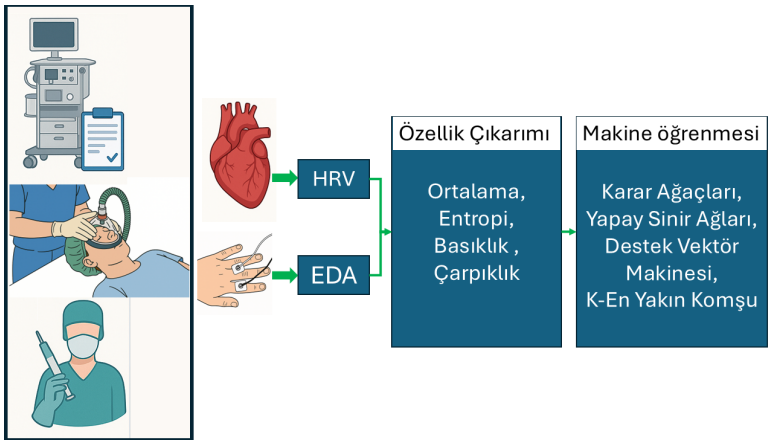
Şekil 1. Çalışmada kullanılan verilerin yaş cinsiyet ve ameliyat süresi dağılımı. Şekil 1-A'da mavi renk erkek hastaları gösterirken açık turuncu renk kadın hastaları ifade etmektedir. Her iki cinsiyet ise kahverengidir. Şekil 1-B'de çalışmadaki ameliyatların süresini göstermektedir [14]

Çalışmada kullanılan veri setine ait temel özellikler Çizelge 1'de özetlenmiştir. Elde edilen HRV ve EDA sinyalleri için, nosiseptif uyaran durumları (noc_stim = 1) ve nosiseptif olmayan durumlar (noc_stim = 0) belirlenerek sınıflandırılmada kullanılmak üzere uygun sınıf etiketleri hazırlanmıştır.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan veri setine ilişkin bilgiler

Özellik	Açıklama
Veri kaynağı	PhysioNet açık erişimli veri tabanı
Katılımcı sayısı	101 hasta
Yaş aralığı	28–77
Cinsiyet dağılımı	53 kadın, 47 erkek
Toplam kayıt süresi	18.582 dakika
Kayıt süreci	Anestezi indüksiyonu öncesinden ekstübasyon sonrasına kadar
Örnekleme frekansı	256 Hz

Bu çalışmada, EDA ve HRV sinyallerinden çıkarılan istatistiksel ve kompleksite temelli özellikler kullanılarak nosisepsiyon varlığı ve yokluğu MÖ yöntemleriyle sınıflandırılmıştır. Önerilen yaklaşım; veri ön işleme, özellik çıkarımı, model eğitimi ve çapraz doğrulama ile performans değerlendirme adımlarından oluşan bir sınıflandırma iş akışı Şekil 2'de yer almaktadır.



Şekil 2. Çalışmada uygulanan adımların şeması

2.2. Ön İşleme

Veriler için literatürde uygun görülen filtreler ile ön işleme adımları uygulanmıştır. EKG verilerinde HRV analizi için öncelikle R tepelerinin doğru şekilde çıkarılması hedeflenmiştir. Bunun için yüksek artefaktlı bölümler 20 Hz düşük geçiren filtre ve eşikleme yöntemleriyle sıfırlanmış, ardından Pan-Tompkins algoritması uygulanmıştır. Artefakt nedeniyle oluşan boşluklar PPG'den elde edilen tepelerle ve gecikme düzeltmesi yapılarak doldurulmuş, tek atımlık yanlışlıklar ise nokta-işlem tabanlı algoritmalarla düzeltilmiştir. Son olarak, düzensiz bölgeler farklı sinyal versiyonları üzerinden optimize edilerek R tepeleri kesinleştirilmiş ve bireysel HRV modelleri hiperparametre taramalarıyla en uygun şekilde uyarlanmıştır.

EDA verilerinde elektrokoter kaynaklı artefaktlar temizlendikten sonra sinyal tonik ve fajik bileşenlere ayrılmış, fajik bileşenden darbeler çıkarılmıştır. Daha sonra darbe zamanlaması ve genlik yapısını modellemek için dört dinamik model uygulanmıştır: geçmişe bağlı ters Gauss (History-Dependent Inverse Gaussian model-HDIG), geçmişe bağlı lognormal (History-Dependent Lognormal model-HDL), uyarlanabilir pencere uzunluğuna sahip HDIG ve darbe genlikleri için HDIG modeli. Bu modeller, EDA darbelerinin hız ve genlik özelliklerini zaman içinde sürekli olarak tahmin edecek şekilde hiperparametre taramalarıyla optimize edilmiştir.

Çalışmada kullanılan veriler toplamda 15 kanallı olup her kanalın ifade ettiği özellikler şunlardır: kalp atım hızının ortalama değeri (the mean value of the heart rate – MuHR), kalp atım hızı varyasyonunun standart sapması (the standard deviation of the heart rate – SigmaHR), HRV spektrumunun toplam gücü (the total power of HRV spectrum – TotalPower), yüksek frekans bandı gücü (high-frequency band power – HF), normalize edilmiş düşük frekans değeri (low-frequency normalized unit – LFnu), normalize edilmiş yüksek frekans değeri (high-frequency normalized unit – HFnu), VLF dışarıda bırakılarak hesaplanan normalize edilmiş LF değeri (low-frequency normalized unit without VLF – LFnu_noVLF), LF/HF oranı (the ratio of low to high frequency – LF/HF), tonik deri iletkenliği (tonic electrodermal activity – TonicEDA), EDA tepki genliklerinin ortalama değeri (the mean amplitude of skin conductance responses – MuAmp), EDA tepki genliklerinin standart sapması (the standard deviation of skin conductance responses – SigmaAmp), log-normal dağılıma göre uyarlanmış tepki büyüklüklerinin ortalama değeri (the mean of phasic responses fitted to log-normal distribution – MuPR_LogN), log-normal dağılıma göre uyarlanmış tepki büyüklüklerinin standart sapması (the standard deviation of phasic responses fitted to log-normal distribution – SigmaPR_LogN), inverse Gaussian dağılıma göre uyarlanmış tepki büyüklüklerinin ortalama değeri (the mean of phasic responses fitted to inverse Gaussian distribution – MuPR_IG) ve inverse Gaussian dağılıma göre uyarlanmış tepki büyüklüklerinin standart sapması (the standard deviation of phasic responses fitted to inverse Gaussian distribution – SigmaPR_IG).

Bu özelliklerden HRV özellikleri aşağıda açıklanmıştır:

MuHR (Mean Heart Rate): Kalp atış hızı sinyalinin ortalama değeridir. Genel kardiyak aktiviteyi yansıtır ve stres, anksiyete veya anestezik düzey gibi durumlarda temel bir karşılaştırma ölçütü sağlar.

SigmaHR (Standard Deviation of Heart Rate): Kalp hızı sinyalindeki değişkenliğin standart sapmasıdır. Otonom sinir sistemi (OSS) aktivitesine duyarlıdır ve kalp atımındaki kısa süreli dalgalanmaları gösterir.

Total Power: HRV spektrumunun toplam gücüdür (VLF + LF + HF). Otonom sinir sistemi aktivitesinin genel bir ölçüsüdür; düşük total power genellikle stres, yorgunluk veya patolojik durumlarla ilişkilidir.

HF (High Frequency Power): Parasempatik (vagal) aktiviteyi temsil eder. Solunum kaynaklı kalp hızı değişkenliğiyle (RSA) güçlü bir şekilde ilişkilidir.

LFnu (Low Frequency Power, normalized): LF bileşeninin normalize edilmiş değeri olup hem sempatik hem de parasempatik etkileri içerir. Stres yanıtlarının ve barorefleks duyarlılığının bir göstergesi olabilir.

HFnu (High Frequency Power, normalized): HF bileşeninin normalize edilmiş değeri. Saf vagal tonusun daha net değerlendirilmesine olanak sağlar.

LFnu_noVLF: Çok düşük frekans (VLF) bileşeni çıkarıldıktan sonra hesaplanan LF gücünün normalize edilmiş değeri. VLF'nin belirsiz etkilerini elimine ederek LF değerlendirmesini iyileştirir.

LF/HF Ratio: LF ve HF güçleri arasındaki orandır. Sempatik-parasempatik dengeyi temsil eden klasik bir göstergedir; yüksek değerler genellikle artmış sempatik aktivite veya azalmış parasempatik aktivite ile ilişkilidir.

EDA özellikleri ve açıklamaları aşağıdaki gibidir:

TonicEDA: Elektrokutanöz aktivitenin tonik, yani bazal seviyesini gösterir. Genel arousal (uyanıklık/uyarılmışlık) durumunun göstergesidir.

MuAmp (Mean Amplitude): Tüm EDA olaylarının ortalama amplitüdü. Daha güçlü fizyolojik tepkiler (örneğin stres veya ağrıya karşı) genellikle daha yüksek amplitüdlerle ifade edilir.

SigmaAmp (Standard Deviation of Amplitude): EDA amplitüdlerinin değişkenliğini gösterir; bireysel farklılıkları ve olayların heterojenliğini ortaya koyar.

MuPR_LogN (Mean Periodic Event Rate, Log-normal): Log-normal dağılıma göre modellenmiş periyodik EDA olaylarının ortalama sıklığıdır. Otonom aktivitenin düzenliliği hakkında bilgi verir.

SigmaPR_LogN (Standard Deviation of Periodic Event Rate, Log-normal): Log-normal dağılıma göre periyodik EDA olay frekansının değişkenliğini gösterir. OSS'nin stabilite/dengesizlik durumlarını yansıtır.

MuPR_IG (Mean Periodic Event Rate, Inverse Gaussian): İnvers Gaussian dağılımına göre modellenmiş periyodik EDA olaylarının ortalamasıdır. Farklı dağılım varsayımlarına göre OSS yanıtlarını değerlendirmeye imkân verir.

SigmaPR_IG (Standard Deviation of Periodic Event Rate, Inverse Gaussian): İnvers Gaussian dağılımına göre EDA olaylarının frekans değişkenliğini gösterir; OSS'nin olay bazlı aktivitesindeki çeşitliliği ortaya koyar.

2.3. Özellik Çıkarma

Çalışmada EDA-HRV endekslerinden başarısı veren lineer ve non-lineer özellikler çıkarılmıştır. Çalışmada ortalama, Shannon entropisi, basıklık ve çarpıklık özellikleri çıkarılmış ve bu özellikler tek bir matris üzerinde birleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan özellikler aşağıda açıklanmıştır [17].

2.3.1. Ortalama

Ortalama, bir veri setinin merkezi eğilim ölçüsüdür ve bir veri kümesindeki tüm değerlerin toplamının, toplam veri sayısına bölünmesiyle hesaplanır. Genelde "aritmetik ortalama" olarak bilinir ve en yaygın kullanılan istatistiksel ölçütlerden biridir. N verinin uzunluğu, $x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ zaman serisi için ortalama hesaplaması Eşitlik (1)'de yer almaktadır.

$$\mu = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i \tag{1}$$

2.3.2. Çarpıklık

Çarpıklık, bir veri setinin simetrik olup olmadığını veya dağılımının bir tarafa eğimli olup olmadığını ölçen bir istatistiksel ölçüttür. Veri dağılımının merkezi eğiliminden sapmalarını incelemek için kullanılır. Ortalama μ ve standart sapma σ olduğu durumda çarpıklık hesaplaması Eşitlik (2)'de yer almaktadır.

$$Çarpıklık = \frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \mu)^3}{\sigma^3} \tag{2}$$

2.3.3. Basıklık

Basıklık, bir veri setindeki dağılımın uç değerlerinin (kuyruklarının) yoğunluğunu ve dağılımın tepe noktasının yüksekliğini ölçen bir istatistiksel ölçüttür. Verinin uç değerlerine ne kadar odaklandığını anlamaya yardımcı olur. Ortalamanın μ ve standart sapmanın σ olduğu durumda basıklık hesaplaması Eşitlik (3)'de yer almaktadır.

$$basıklık = \frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \mu)^4}{\sigma^4} \tag{3}$$

2.3.4. Entropi

Entropi, bilgi teorisi ve istatistikte kullanılan bir ölçüt olup, bir sistemdeki belirsizliği veya düzensizliği ifade eder. Claude Shannon tarafından geliştirilen bu kavram, veri setindeki bilgi miktarını ve rastgeleliği analiz etmek için yaygın olarak kullanılır. Veri M farklı olasılık değerine sahipse her bir olasılık değeri p_i olmak üzere Shannon entropi H Eşitlik (4)'te yer almaktadır.

$$\mathrm{H} = \sum_{i=1}^{\mathrm{M}} \mathrm{p}_i \log(\mathrm{p}_i) \tag{4}$$

2.4. Sınıflandırma

Bu bölümde, EDA-HRV verilerinden elde edilen özelliklerin nosisepsiyon varlığı ve yokluğunu ayırt etmedeki sınıflandırma performansı değerlendirilmiştir. Çalışmadaki veriler Matlab (R2023a-deneme sürümü) kullanarak sınıflandırılmıştır. Model, 60 öznitelik kullanılarak eğitildi ve 5 katlı çapraz doğrulama ile test edilmiştir. Çalışmada literatürde fizyolojik verilerin sınıflandırılmasında sıklıkla kullanılan algoritmalar ile sınıflandırılmış olup bu metotlar aşağıda açıklanmıştır [17,18].

2.4.1. Karar Ağaçları

Karar ağaçları (KA), veri setini yinelemeli bölerek sınıf etiketini tahmin eden temel sınıflandırıcılardandır. Sınıflandırma, karar ağaçlarını temel öğrenici olarak kullanan bagging tabanlı bir topluluk (bagged trees) ile gerçekleştirilmiştir. Topluluktaki her bir ağaç, eğitim setinin değiştirilmiş bir veri örneği olan bootstrap

örnekleriyle oluşturulur. İlk olarak, orijinal veri seti V'den N örnek alınarak, her biri N'nin uzunluğunda olan B farklı bootstrap veri seti oluşturulur, bu işlem Eşitlik (5)'te yer almaktadır.

$$\mathrm{V_b} = \{x_1, x_2, \cdots, x_{N'}\}, \qquad \mathrm{b} = 1,2,3,\cdots,B \tag{5}$$

Her bootstrap örneği için bir karar ağacı büyütülür. Karar ağacındaki her düğüm için tüm özellikler adaydır. En iyi bölme noktası, seçilen safsızlık ölçütüne göre (bu çalışmada Gini indeksi) belirlenir ve düğüm iki alt düğüme ayrılır. Bu işlem, minimum düğüm boyutu koşuluna ulaşılıncaya kadar tekrarlanır. Bir düğüm D'deki sınıf dağılımı p_k, bu durumda Gini safsızlığı Eşitlik (6)'da yer almaktadır.

$$\mathrm{I_{Gini}} = \sum_{i=1}^{\mathrm{K}} \mathrm{p_k}(1 - \mathrm{p_k}) \tag{6}$$

Öncelikle ebeveyn düğümdeki Gini değeri hesaplanır. Ardından, S düğüm, S_1ve S_2 iki alt düğüme ayrıldığında, her bir alt düğüm için Gini değeri bulunur ve bu değerler, alt düğümdeki örnek sayısının toplam örnek sayısına oranı ile ağırlıklandırılarak ortalaması alınır. Bilgi kazancı ebeveyn düğümün Gini değeri ile bu ağırlıklı ortalama arasındaki fark olarak tanımlanır. N evebeyn düğümdeki örnek sayısı ve N_1, N_2 ise alt düğümdeki örnek sayılarını göstermek üzere bilgi kazancı Eşitlik (7)'de yer almaktadır.

$$\Delta I = \mathrm{I_{Gini}}(\mathrm{S}) - \left(\frac{N_1}{N} I_{\mathrm{Gini}}(s_1) + \frac{N_2}{N} I_{\mathrm{Gini}}(s_2)\right) \tag{7}$$

Her bir karar ağacı, yaprak düğümde çoğunluk sınıfa göre tahmin üretmektedir. Çalışmada kullanılan bagging yönteminde ise, bootstrap örneklerinden elde edilen tüm ağaçların tahminleri bir araya getirilmekte ve nihai sınıflandırma, çoğunluk oyu prensibine göre belirlenmektedir. Böylece kararlı ve genellenebilir sonuçlar elde edilmektedir [19].

2.4.2. Yapay Sinir Ağları

İnsan beynindeki sinir hücrelerini taklit ederek, karmaşık verilerdeki ilişkileri öğrenme ve örüntü tanıma yeteneği ile sınıflandırma, tahmin gibi görevleri gerçekleştiren çok katmanlı yapay öğrenme modelleridir. Sinir ağı; bir giriş katmanı, gizli katman(lar) ve bir çıkış katmanından oluşur ve her katmanda bir dizi nöron bulunur. Nöronlar, belirli kurallara sahip olacak şekilde katmanlara paralel biçimde bağlanmıştır. Giriş katmanı, $x = [x_1, x_2, x_3, \ldots, x_{\mathrm{n}}]$ şeklinde tanımlanan özellik matrisini alır. Eğer K.'inci katmanda olduğumuz ve her gizli katmanda n nöron bulunduğu varsayılırsa, girdilerin w ağırlık değeriyle çarpılması ve b bias teriminin eklenmesiyle elde edilen ağırlıklı toplam hesaplanır; bu Eşitlik (8)'de verilmiştir.

$$z_i^{\mathrm{K}} = \sum_{j=1}^{n^{\mathrm{K-1}}} w_{ij}^{\mathrm{K}} a_j^{\mathrm{K-1}} + b_i^K \tag{8}$$

Burada a aktivasyon fonksiyonu ve çalışmada ReLU fonksiyonu kullanıldı. Çıkış katmanında sigmoid fonksiyonu ile sınıf etiketinin hangi sınıfa ait olduğu p olasılık değeri elde edilir [18].

2.4.3. Destek Vektör Makineleri

Sınıflandırma yapılırken en yakın değerler arasındaki mesafeyi ifade eden marjini maksimize eden hiper düzlemi tanımlama prensibine dayalı bir MÖ algoritmasıdır. Veri kümesi (x_i, y_i), olarak tanımlandığında ve $i = 1,2,\ldots l$, $x_i \in R^n$ ve $y_i \in \{+1, -1\}$ olmak üzere. Burda l veri sayısını ve n özellik sayısını göstermektedir. Çok boyutlu uzayda verileri ayırabilecek pek çok hiper düzlem tanımlanabilir. SVM'in temel prensibi, bu belirsizliği ortadan kaldırarak marjini maksimize eden ve böylece sınıfları en iyi şekilde ayıran optimal hiper düzlemi seçmektir. Bu çalışmada farklı kernel fonksiyonları test edilmiş; ancak sınıflandırma performansı açısından en iyi sonuç lineer çekirdek (kernel) fonksiyonu ile elde edilmiştir. Bu nedenle analizlerde lineer kernel tercih edilmiştir. İki destek düzlemi arasında ortada kalan düzlem, iki sınıfı ayıran karar sınırını oluşturur ve şu şekilde ifade edilir: $W_t X + b = 0$. Burada Wağırlık vektörünü, b ise

bias terimini göstermektedir. Destek düzlemleri ise şu şekilde tanımlanır:$W_t X + b = 1$ and by $W_t X + b = -1$. İki destek düzlemi arasındaki mesafe marjin olarak adlandırılır. SVM'in optimal hiper düzlemi belirlemesi için marjini maksimize eden bir W bulması gerekir. Maksimum marjin şu şekilde tanımlanır:$maxMargin = \frac{2}{\|w\|} = \frac{2}{w^t w}$ Dolayısıyla minimize edilmesi gereken değer $\frac{w^t w}{2}$ olur [20]. Bu optimizasyon problemi, iki sınıflı durum için Lagrange Eşitlikleri kullanılarak çözülür. Bu işlem Eşitlik (9)'da yer almaktadır.

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{l} \alpha_i - \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} \alpha_i \alpha_j y_i y_j \, x_i^T x_j \tag{9}$$

Sonuçta, iki sınıfı ayıran sınıflandırma fonksiyonu Eşitlik (10)'da yer aldığı üzere ifade edilir.

$$f(x) = sign\left(\sum_{i=1}^{l} y_i \alpha_i x_i^T x\right) \tag{10}$$

2.4.4. K-En Yakın Komşular Algoritması

K-en yakın komşular algoritması, yeni gelen bir verinin hangi sınıfa ait olduğunu belirlemek için, veriye en yakın k adet komşuya bakarak karar veren basit ve sezgisel bir yöntemdir. Bu algoritmada önce yeni örnek ile eğitim verisindeki tüm örnekler arasındaki mesafe hesaplanır, ardından en yakın k komşu seçilir ve bu komşuların çoğunluk oyu alınarak sınıf belirlenir. Bu çalışmada komşular arasındaki mesafe, kosinüs mesafesi kullanılarak hesaplanmıştır. Veri kümesi (x_i, y_i), olarak tanımlandığında ve $i = 1,2, \ldots l$, $x_i \in R^n$ ve $y_i \in \{+1, -1\}$ olmak üzere. Burda l veri sayısını ve özellik sayısını göstermektedir. Özellik sayısı n olsun ve noktaların i. özelliği sırasıyla x_i ve y_i ile gösterilsin. Kosinüs mesafesi Eşitlik (11)'de yer almaktadır.

$$\mathrm{d}(i,j) = 1 - \frac{\Sigma_{\mathrm{i=1}}^{n} x_i y_i}{\sqrt{\Sigma_{\mathrm{i=1}}^{n}} x_i{}^2 \cdot \sqrt{\Sigma_{1=1}^{n}} y_i{}^2} \tag{11}$$

K-en yakın komşu algoritması algoritmasında uygun komşu sayısının seçimi önemli bir parametredir; çünkü bu seçim, aykırı değerlere karşı hassasiyet ile önemli örüntülerin gözden kaçırılması riski arasında denge sağlar. Bu çalışmada komşu sayısı 10 olarak belirlenmiştir. Daha sonra, komşuların sınıf etiketleri çoğunluk oylaması yöntemiyle değerlendirilmiş ve en fazla oyu alan sınıf, test örneği için tahmin edilen sınıf olarak atanmıştır [19].

2.5. İstatistiksel Analiz

İstatistiksel analizler Matlab (R2023a-deneme sürümü) ortamında gerçekleştirilmiştir. Nosisepsiyon varlığı ve yokluğu arasındaki farklar Paired Samples t-test kullanılarak değerlendirilmiştir. Tüm istatistiksel testlerde anlamlılık düzeyi $p < 0.05$ olarak kabul edilmiştir.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Çalışmada her 15 kanallı veriden çıkarılan özellikler neticesinde 60 özellik kullanılarak sınıflandırılmsupera yapılmıştır. Çalışmada kullanılan sınıflandırıcılar karar ağaçları, lineer regresyon, destek vektör makineleri, yapay sinir ağları olup bu sınıflandırıcıların performansını ölçmek için doğruluk, hassasiyet, duyarlılık, özgüllük, F1-skor, AUC değerlerine bakılmış olup sonuçlar Çizelge 2'de yer almaktadır. Sonuçlar sınıflandırmanın dengeli şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Sınıflandırıcılardan en yüksek sınıflandırma başarısı olup karar ağaçları ile elde edildi. Karar ağaçlarının doğruluk, hassasiyet, duyarlılık, özgüllük, F1-skor, AUC % değerleri sırasıyla 90,3, 93,1, 87,1, 93,5, 90, 95 idi. Karar ağaçlarından sonra ikinci en iyi sınıflandırma doğruluğu %88,2 ile yapay sinir ağları oldu. Destek vektör makineleri ve k-en yakın komşular sınıflandırıcılarının doğruluk değerleri ise sırasıyla %87,1 ve %86,6 idi.

Literatürde, ağrı ve nosisepsiyonun değerlendirilmesine yönelik olarak EDA ve HRV gibi fizyolojik sinyallerin hem ayrı ayrı hem de birlikte kullanıldığı çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bunlardan Zhan ve arkadaşları [21] sadece HRV özellikleri kullanarak yüksek frekans gücü, düşük frekans gücü, yüksek-düşük frekans güç oranı ve örnek entropisi dahil olmak üzere dört özellik çıkarılarak yaptıkları çalışmada derin sinir ağları ile %90,1 sınıflandırma doğruluğu elde ettiler. Posada ve arkadaşları [22] EDA'nın spektral analiz, zaman alanı ayrıştırma ve diferansiyel özelliklere dayalı ağrı uyarım yoğunluğu üç seviyede sınıflandırıldı ve neticede uygulanan uyaranın yoğunluğuyla ilişkili olduğuna dair fizyolojik kanıtlar sağladılar. Bu çalışmalar HRV ve EDA modalitelerinin nosisepsiyon süreçlerini sınıflandırmadaki potansiyelini gösterse de hibrit EDA ve HRV sinyallerinin birlikte kullanıldığı çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Örneğin Subramanian arkadaşları [14] multi modal EDA-HRV metodunun supervised ve unsupervised metotları kullanarak anestezi süreçlerini takip etmedeki potansiyelini araştırdılar. Ayrıca bu multimodal yöntemin Analjezi Nosisepsiyon İndeksi'nden daha güvenilir sonuçlar ortaya koyduğunu savundular. Bununla birlikte, mevcut çalışmaların büyük bir kısmı sınırlı sayıda özellik veya tek bir model yaklaşımı üzerine odaklanmaktadır. Bu çalışmada ise, multimodal EDA-HRV sinyallerinden elde edilen lineer ve non-lineer özellikler birlikte ve sistematik bir şekilde değerlendirilmiş ve farklı makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak karşılaştırılmıştır. Bu yönüyle çalışma, fizyolojik özelliklerin ayırt edici gücünün daha kapsamlı biçimde analiz edilmesine olanak tanımakta ve nosisepsiyonun belirlenmesine yönelik potansiyel biyobelirteçlerin ortaya konmasına katkı sağlamaktadır.

Çizelge 2. Sınıflandırma performans karşılaştırması

Sınıflandırıcı	Doğruluk	Hassasiyet	Duyarlılık	Özgüllük	F1-skor	AUC
Karar ağaçları	90,3	93,1	87,1	93,5	90	95
Sinir ağları	88,2	88,2	88,2	88,2	88,2	93
Destek vektör makineleri	87,1	85,6	89,2	84,9	87,4	95
K- en yakın komşular	86,6	84,7	89,2	83,9	86,9	95

Çalışmada, nosisepsiyon varlığında gözlenen fizyolojik değişikliklerin lineer ve non-lineer özellikler üzerinden incelenmesi amacıyla, nosisepsiyon varlığı ve yokluğu durumları Paired Samples t-test ile istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. İki durumda anlamlı şekilde farklı bulunan özellikler ($p < 0,05$) Çizelge 3'te sunulmuştur.

Çizelge 3. Çalışmada çıkarılan özelliklerin nosiseptif durumda ve nosiseptif olmayan durumdaki istatistiksel karşılaştırılması

Özellik	Parametre	Nosisepsiyon var	Nosisepsiyon yok	p değeri	t-istatistiği
Entropi	MuHR	-176,96 ± 267,68	-1041,40 ± 1132,57	0,0000	7,642
	SigmaHR	-313,63 ± 604,80	-1649,07 ± 2464,67	0,0000	5,122
	TotalPower	-1131,88 ± 3083,56	-2540,83 ± 5458,69	0,0436	2,046
	HF	-1022,52 ± 2674,95	-2383,65 ± 4882,70	0,0275	2,241
	LFnu	-175,63 ± 192,97	-309,38 ± 334,47	0,0005	3,597
	LFnu_noVLF	-100,36 ± 72,50	-274,69 ± 312,89	0,0000	5,082
	LF/HF	-1066,97 ± 2198,25	-2325,07 ± 3054,48	0,0028	3,073
	TonicEDA	-396,12 ± 1083,16	-2693,19 ± 2362,26	0,0000	8,478
	MuPR_LogN	-140,40 ± 242,84	-287,80 ± 601,69	0,0222	2,327
	MuPR_IG	-177,80 ± 460,34	-492,21 ± 1337,00	0,0358	2,131
Ortalama	MuHR	-0,26 ± 0,36	0,74 ± 0,84	0,0000	-11,434
	SigmaHR	0,03 ± 0,37	0,48 ± 0,60	0,0000	-5,537
	TotalPower	0,06 ± 0,29	0,26 ± 0,44	0,0008	-3,475
	HF	0,06 ± 0,33	0,21 ± 0,44	0,0192	-2,383
	LFnu	-0,03 ± 0,26	0,10 ± 0,38	0,0071	-2,753
	HFnu	0,02 ± 0,41	-0,26 ± 0,46	0,0000	4,323
	LFnu_noVLF	-0,01 ± 0,31	0,30 ± 0,48	0,0000	-4,956
	LF/HF	0,01 ± 0,21	0,32 ± 0,43	0,0000	-5,674
	TonicEDA	-0,06 ± 0,56	-0,59 ± 1,51	0,0008	3,479
	MuAmp	0,22 ± 0,46	0,37 ± 0,43	0,0204	-2,360
	SigmaPR_LogN	0,03 ± 0,40	0,17 ± 0,44	0,0177	-2,414

Çizelge 3. *devamı*

Özellik	Parametre	Nosisepsiyon var	Nosisepsiyon yok	p değeri	t-istatistiği
Çarpıklık	SigmaHR	2,72 ± 1,38	1,95 ± 1,18	0,0000	4,333
	TotalPower	5,43 ± 3,18	4,36 ± 2,59	0,0111	2,590
	HFnu	0,94 ± 0,94	1,24 ± 0,76	0,0057	-2,833
	LFnu_noVLF	0,30 ± 0,83	-0,08 ± 0,62	0,0000	4,626
	SigmaPR_LogN	1,34 ± 1,12	0,77 ± 1,49	0,0023	3,138
Basıklık	MuHR	9,02 ± 8,67	5,85 ± 6,18	0,0034	3,010
	SigmaHR	12,66 ± 9,79	7,79 ± 8,29	0,0004	3,649
	TotalPower	45,98 ± 52,05	31,52 ± 36,95	0,0305	2,198
	LFnu_noVLF	2,93 ± 1,72	2,41 ± 1,09	0,0122	2,556
	TonicEDA	9,34 ± 6,73	3,58 ± 2,66	0,0000	7,349
	MuAmp	6,24 ± 7,57	4,13 ± 2,55	0,0120	2,564
	SigmaAmp	8,20 ± 13,78	4,93 ± 7,02	0,0475	2,009
	MuPR_LogN	4,76 ± 3,62	5,90 ± 4,22	0,0487	-1,998

Bu çalışmada, nosisepsiyon varlığı ile yokluğu arasında HRV ve EDA kaynaklı toplam 34 parametrede anlamlı farklılık bulunmuştur. Nosisepsiyon varlığında HRV parametreleri incelendiğinde, LF/HF oranı (0,01 ± 0,21 vs 0,32 ± 0,43, p<0,001) ve LFnu (–0,03 ± 0,26 vs 0,10 ± 0,38, p=0,007) anlamlı olarak daha düşük, HFnu ise daha yüksek bulunmuştur (0,02 ± 0,41 vs –0,26 ± 0,46, p<0,001). Ayrıca HRV'den türetilen entropi değerleri (ör. MuHR: –176,96 ± 267,68 vs –1041,40 ± 1132,57, p<0,001) ile çarpıklık ve basıklık ölçütleri nosisepsiyon sırasında anlamlı artış göstermiştir.

EDA parametreleri değerlendirildiğinde, TonicEDA ortalama değeri (–0,06 ± 0,56 vs –0,59 ± 1,51, p<0,001) nosisepsiyon varlığında daha yüksek bulunmuş; ayrıca entropi (–396,12 ± 1083,16 vs –2693,19 ± 2362,26, p<0,001) ve basıklık (9,34 ± 6,73 vs 3,58 ± 2,66, p<0,001) değerleri de anlamlı şekilde artmıştır

Bu sonuçlar hem HRV hem de EDA'dan elde edilen lineer ve non-lineer parametrelerin nosisepsiyon varlığında anlamlı farklılıklar gösterdiğini ortaya koymuştur. HRV açısından incelendiğinde, entropi ve yüksek moment değerlerinin (çarpıklık, basıklık) artması, kalp atım dinamiklerinde daha karmaşık ve değişken bir yapının ortaya çıktığını işaret etmektedir. Bu durum, ağrıya verilen otonomik yanıtın daha kaotik bir desenle karakterize olduğunu düşündürmektedir [23]. Öte yandan, ortalama LF/HF oranı ve LFnu değerlerinin nosisepsiyon sırasında daha düşük olması, klasik olarak beklenen sempatik baskınlıkla tam örtüşmemektedir. Bu bulgu, intraoperatif koşullarda kullanılan anestezik ve analjezik ajanların sempatik yanıtı baskılayıcı etkisi ile açıklanabilir. Buna rağmen, HRV'den türetilen kompleksite göstergelerinin nosisepsiyona duyarlı olması, bu parametrelerin farmakolojik etkilerden bağımsız olarak otonomik sistemdeki değişiklikleri yansıtma potansiyelini ortaya koymaktadır [24].

EDA parametreleri incelendiğinde ise nosisepsiyon sırasında ortalama değerlerin yanı sıra entropi ve basıklık ölçütlerinde de anlamlı artış gözlenmiştir. Bu bulgular, nosisepsiyonun cilt iletkenliği sinyalinde daha yüksek amplitüdlü ve ani yanıtlarla karakterize olduğunu ve sempatik aktivitenin güçlendiğini ortaya koymaktadır. Literatürde de EDA'nın perioperatif stres ve nosisepsiyonun güvenilir bir belirteci olduğu, özellikle tonik ve fazik yanıtların bu süreçte duyarlı göstergeler sunduğu vurgulanmaktadır [25,26].

Genel olarak bu bulgular değerlendirildiğinde, EDA parametreleri nosisepsiyonun varlığını daha doğrudan ve tutarlı şekilde yansıtırken, HRV özellikleri farmakolojik etkilerden etkilense de özellikle entropi ve yüksek moment temelli ölçütler aracılığıyla nosiseptif yanıtı ortaya koyabilmektedir. Subramanian ve arkadaşları [14], EDA indekslerinin genel olarak HRV indekslerinden daha önemli olduğunu öne sürdüler. Bu neticenin beklendik olduğunu ve sebebinin de kardiyovasküler ilaçlar doğrudan HRV'yi etkilerken, periferik terleme aktivitesini etkilememesi olduğunu belirttiler. Neticede, HRV'yi etkileyen ilaçlar (ör. beta blokerler) verildiğinde bile EDA indeksleri nosisepsiyonun daha güvenilir göstergeleri olmasına neden olmuştur. Sonuçlarımız bu yönüyle, Subramanian ve arkadaşlarının [14] çalışmasıyla paralellik göstermektedir. Bu sonuçlar, intraoperatif nosisepsiyonun objektif değerlendirilmesinde EDA'nın güçlü bir biyobelirteç olduğunu, HRV'nin ise özellikle kompleks özellikleri aracılığıyla tamamlayıcı rol üstlenebileceğini göstermektedir.

4. SONUÇLAR

Nosisepsiyonun, bilinçsizlik sırasında bile sinir sistemi boyunca izlenmesi, cerrahi sırasında uygun anestezi bakımı için kritik öneme sahiptir. Günümüzde bu izleme, kalp atış hızı ve kan basıncının gözle takip edilmesiyle yapılmaktadır. Bir hastanın nosiseptif durumunu objektif olarak izlemek hâlâ zorluk teşkil etmekte ve bu durum, ameliyat sırasında ilaçların sıklıkla aşırı ya da yetersiz dozda verilmesine neden olmaktadır. Cerrahi nosisepsiyonun hatalı yapılması, daha karmaşık postoperatif ağrı yönetimine ve özellikle yaşlı hastalarda postoperatif bilişsel bozukluk gibi yan etkilere yol açabilir [14]. Bu nedenle, nosisepsiyonun objektif ve güvenilir şekilde değerlendirilmesine katkı sağlayabilecek fizyolojik sinyal temelli makine öğrenmesi yaklaşımlarının geliştirilmesi önem taşımaktadır.

Çalışmamızda iki temel bulgu elde ettik. Birincisi, cerrahi işlem sırasında ameliyathane ortamında kaydedilen fizyolojik verilerin, nosisepsiyonun invaziv olmayan indeksler aracılığıyla tahmin edilmesinde kullanılabileceğini göstermektedir. Çalışmada nosisepsiyon varlığında meydana gelen fizyolojik değişiklikler multimodal EDA-HRV sinyalleri üzerinden sınıflandırılması neticesinde en sınıflandırma doğruluğu %90,3 doğrulukla gerçekleştirilmiştir. Bu sonuç, MÖ tabanlı yöntemlerin klinik koşullarda nosisepsiyonun değerlendirilmesi için uygulanabilir ve potansiyel olarak güvenilir bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir.

Çalışmamızdaki ikinci bulgu ise nosisepsiyon varlığında yaşanan fizyolojik değişiklikleri lineer ve non-lineer özellikler aracılığıyla nosisepsiyon varlığındaki potansiyel biyobelirteçleri tanımladık. Bu amaçla nosisepsiyon varlığında ve yokluğu durumlarının istatistiksel açıdan karşılaştırılması yapılmış sonuçlar Çizelge 3'te sunulmuştur. Nosisepsiyon varlığında elde edilen bulgular hem HRV hem de EDA özelliklerinde anlamlı farklılıkların ortaya çıktığını göstermektedir. HRV sinyallerinde entropi ve çarpıklık, basıklık değerlerinin artışı, EDA parametrelerinde ise yalnızca ortalama değerlerin, entropi ve basıklık ölçütlerinin de artması, nosisepsiyon varlığına işaret eden potansiyel biyobelirteç rolü üstlenebileceğini göstermektedir.

Neticede, cerrahi sırasında invaziv olmayan fizyolojik indeksler olan multimodal EDA-HRV verileri kullanılarak nosisepsiyon varlığı ve yokluğu MÖ yöntemleriyle sınıflandırılmıştır. Çalışmada lineer ve non-lineer özellikler çıkarılmış bu özellikler üzerinden nosisepsiyon durumlarını ayırt eden potansiyel biyobelirteçler tanımlanmıştır. Elde edilen bulgular, multimodal EDA-HRV verilerine dayalı MÖ yaklaşımının, nosisepsiyonun objektif sınıflandırılmasında kullanılabilir olduğunu ve gelecekte geliştirilebilecek klinik karar destek sistemleri için ön değerlendirme niteliğinde bir modelleme çerçevesi sunabileceğini göstermektedir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında, 2024/1 döneminde 1919B012405886 başvuru numarasıyla desteklenmiştir. Yazarlar, sağladığı destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkür eder.

6. KAYNAKLAR

1. Becker, D.E. & Haas, D.A. (2007). Management of complications during moderate and deep sedation: Respiratory and cardiovascular considerations. *Anesthesia Progress, 54*(2), 59-68.
2. Avidan, M.S., Jacobsohn, E., Glick, D., Burnside, B.A., Zhang, L., Villafranca, A., Karl, L., Kamal, S., Torres, B., O'Connor, M., Evers, A.S., Gradwohl, S., Lin, N., Palanca, B.J. & Mashour, G.A. (2011). Prevention of intraoperative awareness in a high-risk surgical population. *New England Journal of Medicine, 365*(7), 591-600.
3. Liu, Z., Si, L., Shi, S., Li, J., Zhu, J., Lee, W.H., Lo, S.L., Yan, X., Chen, B., Fu, F., Zheng, Y. & Wang, G. (2024). Classification of three anesthesia stages based on near-infrared spectroscopy signals. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 28*(9), 5270-5279.
4. Boucsein, W. (2012). *Electrodermal activity*. Springer Science & Business Media, Berlin.
5. Wang, Q., Liu, F., Wan, G. & Chen, Y. (2022). Inference of brain states under anesthesia with meta learning based deep learning models. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 30*, 1081-1091.
6. Boucsein, W. (2012). Principles of electrodermal phenomena. In *Electrodermal activity*, 1-86. Springer.

7. Kirnö, K., Kunimoto, M., Lundin, S., Elam, M. & Wallin, B. G. (1991). Can galvanic skin response be used as a quantitative estimate of sympathetic nerve activity in regional anesthesia? *Anesthesia & Analgesia, 73*(2), 138-142.

8. Tseng, B., Subramanian, S., Barbieri, R. & Brown, E.N. (2022). Tonic electrodermal activity is a robust marker of psychological and physiological changes during induction of anesthesia. In *2022 44th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)*, 418-421. IEEE.

9. Jeanne, M., Logier, R., De Jonckheere, J. & Tavernier, B. (2009). Heart rate variability during total intravenous anesthesia: Effects of nociception and analgesia. *Autonomic Neuroscience, 147*(1-2), 91-96.

10. Mazzeo, A.T., La Monaca, E., Di Leo, R., Vita, G. & Santamaria, L.B. (2011). Heart rate variability: A diagnostic and prognostic tool in anesthesia and intensive care. *Acta Anaesthesiologica Scandinavica, 55*(7), 797-811.

11. Matava, C., Pankiv, E., Ahumada, L., Weingarten, B. & Simpao, A. (2020). Artificial intelligence, machine learning and the pediatric airway. *Pediatric Anesthesia, 30*(3), 264-268.

12. Lee, H.C., Ryu, H.G., Chung, E.J. & Jung, C.W. (2018). Prediction of bispectral index during target-controlled infusion of propofol and remifentanil: A deep learning approach. *Anesthesiology, 128*(3), 492-501.

13. Tu, Z., Zhang, Y., Lv, X., Wang, Y., Zhang, T., Wang, J., Yu, X., Chen, P., Pang, S., Li, S., Yu, X. & Zhao, X. (2025). Accurate machine learning-based monitoring of anesthesia depth with EEG recording. *Neuroscience Bulletin, 41*(3), 449-460.

14. Subramanian, S., Purdon, P., Barbieri, R. & Brown, E. (2021). Behavioral and autonomic dynamics during propofol-induced unconsciousness. *PhysioNet*.

15. Niu, J., Lu, Y., Xu, R., Fang, F., Hong, S., Huang, L., Xue, Y., Fei, J., Zhang, X., Zhou, B., Zhang, P. & Jiang, R. (2023). The prognostic value of intraoperative HRV during anesthesia in patients presenting for non-cardiac surgery. *BMC Anesthesiology, 23*(1), 160.

16. Fauchereau, C., Carimalo, F., Merienne, A., Laffon, M., Godat, E. & Aude, J.C. (2025). Heart rate fragmentation improves general anesthesia state classification using machine learning. *medRxiv*, 2025.01.07.25320157.

17. Yeşilbaş, D., Batbat, T., Altınkaynak, M., Uğurgöl, E., Güven, A., Dolu, N., Demirci, E. & Izzetoglu, M. (2025). An efficient multimodal electroencephalography and functional near-infrared spectroscopy approach using Stroop task to evaluate internet gaming disorder with machine learning methods: A comprehensive study. *Engineering Applications of Artificial Intelligence, 159*, 111772.

18. Yeşilbaş, D. ve Güven, A. (2021). Kütle spektrometresi verileri kullanılarak yumurtalık kanserinin yapay sinir ağlarıyla sınıflandırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36*(3), 781-790.

19. Çavdar, F., Günen, A. ve Sert, M. (2024). Borlanmış AISI H11 takım çeliğinin kaplama özellikleri ve korozyon oranının makine öğrenmesi temelli modellenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39*(3), 625-638.

20. Akça, Ş. ve Şanlı, F.B. (2022). Kıyı çizgisinin makine öğrenmesi tabanlı Mean-Shift, rastgele orman ve destek vektör makinaları ile belirlenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37*(3), 835-842.

21. Zhan, J., Wu, Z.X., Duan, Z.X., Yang, G.Y., Du, Z.Y., Bao, X. H. & Li, H. (2021). Heart rate variability-derived features based on deep neural network for distinguishing different anaesthesia states. *BMC Anesthesiology, 21*(1), 66.

22. Posada-Quintero, H.F., Kong, Y. & Chon, K.H. (2021). Objective pain stimulation intensity and pain sensation assessment using machine learning classification and regression based on electrodermal activity. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, 321*(2), R186-R196.

23. Riganello, F., Dolce, G. & Sannita, W.G. (2012). Heart rate variability and the central autonomic network in the severe disorder of consciousness. *Journal of Rehabilitation Medicine, 44*(6), 495-501.

24. Chouchou, F. & Desseilles, M. (2014). Heart rate variability: A tool to explore the sleeping brain? *Frontiers in Neuroscience, 8*, 402.

25. Ledowski, T., Pascoe, E., Ang, B., Schmarbeck, T., Clarke, M.W., Fuller, C. & Kapoor, V. (2010). Monitoring of intra-operative nociception: Skin conductance and surgical stress index versus stress hormone plasma levels. *Anaesthesia, 65*(10), 1001-1006.

26. Storm, H., Myre, K., Rostrup, M., Stokland, O., Lien, M.D. & Ræder, J.C. (2002). Skin conductance correlates with perioperative stress. *Acta Anaesthesiologica Scandinavica, 46*(7), 887-895.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

Petrol Ürünleri İthalatının Tahmininde Geleneksel, Hibrit ve Meta-Sezgisel Yaklaşımlar: SARIMA, RF-LSTM ve DE-HW Modellerinin Karşılaştırılması

Esra KARAKAŞ [1,a], **Menşure Zühal BARAK** [1,b]

[1]*Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, İktisadi, İdari ve Sosyal Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, Adana, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0002-8333-3091; [b]**ORCID**: 0009-0002-3993-513X*

Makale Bilgileri
Geliş : 02.06.2026
Kabul : 16.07.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1962748

Sorumlu Yazar
Esra KARAKAŞ
ekarakas@atu.edu.tr

Anahtar Kelimeler
Holt-winters
Diferansiyel evrim algoritması
Rastgele orman (RF)
Kısa-uzun vadeli bellek (LSTM)
SARIMA

***Atıf şekli:** KARAKAŞ, E., BARAK, M.Z., (2026). Petrol Ürünleri İthalatının Tahmininde Geleneksel, Hibrit ve Meta-Sezgisel Yaklaşımlar: SARIMA, RF-LSTM ve DE-HW Modellerinin Karşılaştırılması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 545-561.*

ÖZ

Bu çalışma, Türkiye'nin 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları doğrultusunda ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik planlamalarına katkı sağlamak amacıyla, 27.10 GTİP kodlu petrol ürünleri ithalat miktarını 2030 yılına kadar tahmin etmeyi ve farklı tahmin modellerinin performanslarını karşılaştırmayı amaçlamaktadır. 2007–2026 dönemine ait aylık ithalat verileri kullanılarak Mevsimsel Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (SARIMA), Diferansiyel Evrim algoritmasıyla optimize edilmiş Holt-Winters (DE-HW) ve derin öğrenme tabanlı Hibrit Rastgele Orman–Kısa Uzun Vadeli Bellek (RF-LSTM) modelleri uygulanmıştır. Model performansları Kök Ortalama Kare Hata (RMSE), Ortalama Kare Hata (MSE), Ortalama Mutlak Hata (MAD) ve Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE) ölçütleriyle değerlendirilmiştir. Bulgular, Hibrit RF-LSTM modelinin eğitim ve doğrulama setlerinde sırasıyla %7 ve %5 MAPE değerleriyle en yüksek tahmin performansını sağladığını göstermiştir. Elde edilen 2030 tahminleri, enerji ithalatı bütçe yönetimi, lojistik planlama ve stratejik rezerv kapasitesinin belirlenmesine yönelik politika kararları için veri temelli bir çerçeve sunmaktadır.

Advanced Time Series Approaches in Petroleum Product Import Modeling: Comparing Hybrid RF-LSTM, SARIMA, and DE-HW Models

Article Info
Received : 02.06.2026
Accepted : 16.07.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1962748

Corresponding Author
Esra KARAKAŞ
ekarakas@atu.edu.tr

Keywords
Holt-winters
Differential evolution algorithm
Random forest (RF)
Long short-term memory (LSTM)
SARIMA

***How to cite:** KARAKAŞ, E., BARAK, M.Z., (2026). Advanced Time Series Approaches in Petroleum Product Import Modeling: Comparing Hybrid RF-LSTM, SARIMA, and DE-HW Models. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 545-561.*

ABSTRACT

This study aims to contribute to Türkiye's economic and environmental sustainability planning in line with the 2030 Sustainable Development Goals by forecasting the import volume of petroleum products classified under HS Code 27.10 through 2030 and comparing the performance of different forecasting models. Using monthly import data for 2007–2026, Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (SARIMA), Holt-Winters optimized by the Differential Evolution algorithm (DE-HW), and a deep learning-based Hybrid Random Forest–Long Short-Term Memory (RF-LSTM) model were applied. Model performances were evaluated using Root Mean Square Error (RMSE), Mean Square Error (MSE), Mean Absolute Deviation (MAD), and Mean Absolute Percentage Error (MAPE). The results showed that the Hybrid RF-LSTM model achieved the highest forecasting performance, with MAPE values of 7% and 5% for the training and validation sets, respectively. The forecasts obtained for 2030 provide a data-driven framework for policy decisions concerning energy import budgeting, logistics planning, and strategic reserve capacity determination.

1. GİRİŞ

Türkiye'nin jeolojik yapısı nedeniyle sınırlı yerli fosil yakıt rezervlerine sahip olması, artan enerji talebiyle birlikte özellikle petrol ve rafine petrol ürünlerinin ithalatını enerji arzı açısından önemli bir unsur haline getirmektedir. Nitekim Türkiye'de sanayileşme ve ekonomik büyüme süreci enerji talebini artırırken [1], yerli enerji üretiminin bu talebi karşılamada sınırlı kalması enerji ithalatına olan duyarlılığı artırmaktadır [2,3]. Bu durum, Türkiye'nin ithal rafine petrol ürünlerine olan ihtiyacını artırmakta; enerji arz güvenliği, dış ticaret dengesi ve çevresel sürdürülebilirlik açısından dikkate alınması gereken çok boyutlu bir alan oluşturmaktadır [3]. Enerji talebinin önemli bir kısmının ithalat yoluyla karşılanması, ülke ekonomisi açısından dış kaynaklara duyarlılığı artırmakta ve enerji ithalat maliyetlerinin dikkatle izlenmesini gerekli kılmaktadır. Petrol fiyatlarındaki dalgalanmaların cari işlemler dengesi üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalar da Türkiye gibi enerji ithalatına bağımlı ekonomilerde petrol fiyat şoklarının makroekonomik göstergeler üzerinde önemli etkiler oluşturabileceğini göstermektedir [4,5].

Türkiye'nin küresel petrol piyasalarında fiyatları belirleyen değil, fiyatlardan etkilenen ülkeler arasında yer alması, uluslararası petrol ve rafine ürün fiyatlarındaki değişimlerin ithalat maliyetlerine yansımasına neden olmaktadır. Enerji yoğun ekonomik yapı [6] içerisinde ithalata duyarlılık; cari denge, döviz kuru, üretim maliyetleri ve enflasyon gibi makroekonomik göstergeler üzerinde çeşitli etkiler oluşturabilmektedir. Bu nedenle, enerji ithalatına ilişkin gelişmelerin düzenli olarak izlenmesi ve geleceğe yönelik güvenilir tahminlerin üretilmesi, enerji arz güvenliği ve ekonomik planlama açısından önem arz etmektedir.

Türkiye'de enerji arzı ve petrol ürünleri tedarikinde ithalatın belirgin bir role sahip olması, makroekonomik dinamikler ve ithalat talebinin modellenmesi açısından literatürde önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır. Bu kapsamda yapılan çalışmalar, petrol ve petrol ürünleri talebinin yalnızca fiyat hareketleriyle değil; ekonomik büyüme, ulaştırma faaliyetleri, sektörel enerji kullanımı, döviz kuru ve dış ticaret dengesi gibi çok boyutlu değişkenlerle ilişkili olduğunu göstermektedir. Ediger ve Berk [7], Türkiye'nin ham petrol ithalat politikasını tarihsel bir perspektifle inceleyerek petrol ithalatının ekonomik ve stratejik açıdan önemini vurgulamış ve ithalat stratejisinin belirleyicilerini analiz etmiştir. Petrol ürünleri talebine daha doğrudan odaklanan Solak [8], Türkiye'nin toplam petrol talebi ve ulaştırma sektörü petrol talebi 2012-2020 dönemi için Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (ARIMA) modeli ile tahmin edilmiştir. Benzer şekilde Melikoğlu [9], Türkiye'de benzin, motorin, LPG, biyoetanol ve biyodizel talebini yarı deneye dayalı modellerle tahmin ederek ulaştırma yakıtlarına yönelik talep tahminlerinin enerji planlaması açısından önemini ortaya koymuştur.

Son yıllarda ise petrol ürünleri ve enerji talebinin tahmininde geleneksel ekonometrik modellerin yanında makine öğrenmesi ve yapay zekâ tabanlı yöntemlerin kullanımı artmaktadır. Bu bağlamda, Sahraei ve arkadaşları [10], Türkiye'de 1975–2019 dönemi ulaştırma enerji talebini Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri (MARS) yöntemiyle tahmin etmiş; GSYİH, nüfus, araç-km, ton-km, yolcu-km ve petrol fiyatı değişkenlerini model girdileri olarak kullanmıştır. Beş farklı MARS modelinin karşılaştırıldığı çalışmada, petrol fiyatı ve ton-km değişkenlerini içeren modelin en yüksek tahmin performansını sergilediği belirlenmiştir. Ağbulut [11], Türkiye'de ulaştırma kaynaklı enerji talebi ve CO_2 emisyonlarını derin öğrenme, destek vektör makineleri ve yapay sinir ağları yöntemleriyle tahmin etmiş; kişi başına GSYİH, nüfus, araç-kilometre ve yıl değişkenlerini girdi olarak kullanmıştır. Çalışma sonuçları, makine öğrenmesi yöntemlerinin enerji talebi ve emisyon tahmininde yüksek doğruluk sağlayabildiğini ortaya koymuştur. Ek olarak, Hoxha ve arkadaşları [12] ile Çodur [13] ise topluluk öğrenme yöntemleriyle enerji talebi tahmin performansını artırmaya yönelik modeller geliştirmiştir.

Literatürdeki bulgular, petrol ve petrol ürünleri talebinin yalnızca fiyat hareketleriyle değil; ekonomik büyüme, ulaştırma faaliyetleri, sektörel enerji kullanımı, enerji fiyatları ve dış ticaret dengesi gibi çok boyutlu değişkenlerle ilişkili olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, petrol ürünleri ithalatının gelecekteki eğiliminin yüksek doğrulukla tahmin edilmesi, enerji arz güvenliği, ithalat planlaması, lojistik süreçlerin yönetimi ve stratejik rezerv kapasitesinin değerlendirilmesi açısından önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır. Bu bağlamda, 2710 GTİP kodu kapsamında yer alan petrol yağları ve bitümenli minerallerden elde edilen yağlar ile bu ürünleri içeren müstahzarların ithalatına yönelik güvenilir öngörülerin elde edilmesi, Türkiye'nin enerji ithalat yapısının daha ayrıntılı biçimde analiz edilmesine katkı sağlayacaktır.

Bu çalışma, 2007–2026 dönemine ait aylık ithalat verilerine dayanarak 2710 GTİP kodlu petrol ürünleri ithalatının tahmin edilmesine odaklanmaktadır. Bu kapsamda, ARIMA/SARIMA gibi geleneksel zaman serisi yöntemlerinin yanı sıra meta-sezgisel optimizasyon temelli DE-HW modeli ve makine öğrenmesi tabanlı hibrit RF-LSTM modeli karşılaştırılarak tahmin performansı açısından en uygun modelin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Karşılaştırmalı değerlendirme sonucunda öne çıkan model kullanılarak, 2030 yılına kadar Türkiye'nin petrol ürünleri ithalat eğilimlerine ilişkin güvenilir öngörüler elde edilmesi hedeflenmektedir. Çalışmanın, enerji ithalatı planlaması, lojistik yönetimi, dış ticaret politikalarının şekillendirilmesi ve stratejik rezerv kapasitesinin optimizasyonu süreçlerinde karar vericilere veri temelli katkı sunması beklenmektedir.

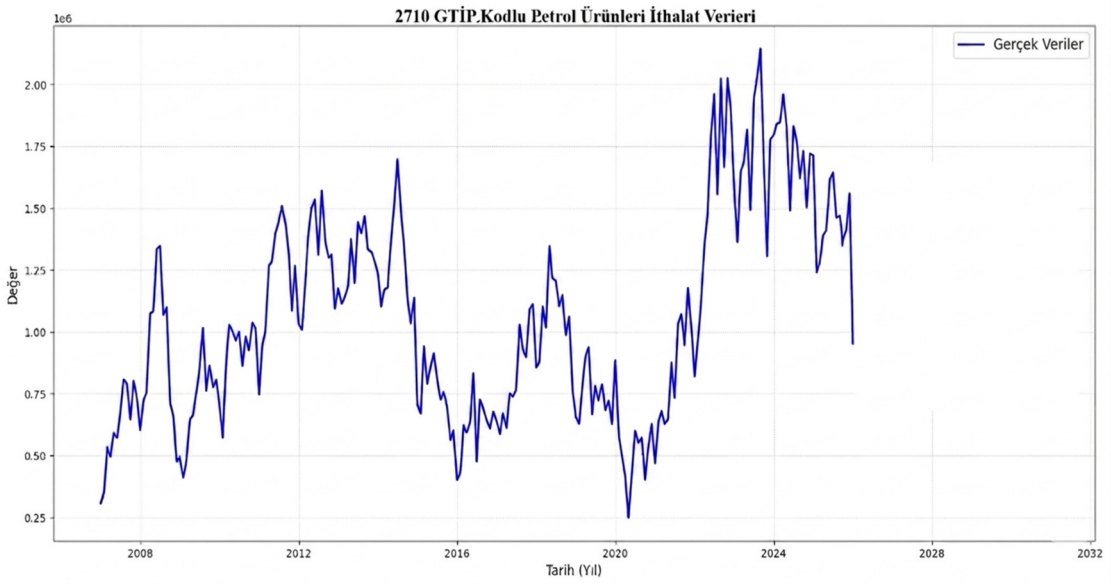
2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Veri Seti

Bu çalışmada, Türkiye'nin petrol ürünleri ithalatı, 27.10 GTİP kodu kapsamında incelenmiştir. Uyumlaştırılmış Sistem (Harmonised System-HS), uluslararası ticarette malların tanımlanması ve kodlanması için kullanılan uluslararası standartlaştırılmış bir ürün adlandırmasıdır. GTİP, Gümrük Tarife İstatistik Pozisyonu'nun kısaltmasıdır. Uluslararası ticarette eşyaların tanımlanması, sınıflandırılması ve vergilendirilmesi için kullanılan 12 haneli rakamsal koddur. Türkiye'de Gümrük Tarife Cetveli'nde yer alan bu kodlar, ithalat ve ihracat işlemlerinde ürünlerin doğru vergilendirilmesini sağlar.

GTİP 27.10, Türkiye'nin enerji ithalatı açısından stratejik öneme sahip ürünleri temsil etmektedir. 27.10 GTİP kodu, petrol yağlarını ve bitümenli minerallerden elde edilen yağları kapsamaktadır (ham yağlar hariç). Bu ürünlerin içerisinde ağırlık itibariyle en az %70 oranında petrol yağı veya bitümenli minerallerden elde edilen yağ bulunması esastır. Bu tarife pozisyonunun temel alt kırılımları şunlardır: 2710.12 kodu, hafif yağlar ve bunların müstahzarlarını (örneğin benzin ve beyaz ispirto) kapsamaktadır; 2710.19 kodu, orta ve ağır yağlar ile bunların müstahzarlarını (örneğin gaz yağı, motorin, fuel-oil, madeni yağlar) içermektedir; 2710.20 kodu, biyodizel içeren petrol yağları ve bitümenli minerallerden elde edilen yağları kapsar; 2710.91 ve 2710.99 kodları ise atık yağları, poliklorlu bifeniller veya terfeniller içerenler dahil olmak üzere kapsamaktadır. Ayrıca, 2710.11 alt kalemi ham petrolü (crude petroleum oils), 2710.12 petrol kokları ve bitümenli minerallerden elde edilen yağları, 2710.19 ise diğer ham petrol türevlerini temsil etmektedir [14].

Bu kapsamda veri setini oluşturan ithalat değerleri, Trademap web sitesi üzerinden 5 Nisan 2026 tarihinde alınmıştır. Çalışmada, Türkiye'nin tüm dünya ile olan ticaret akışları dikkate alınarak, 2007 Ocak – 2026 Ocak dönemine ait aylık 2710 GTİP kodlu petrol ürünlerinin ithalat değerleri (USD) derlenmiştir [15] (Şekil 1).



Şekil 1. 2007 Ocak – 2026 Ocak dönemine ait aylık 2710 GTİP kodlu petrol ürünlerinin ithalat değerleri

2.2. Tahmin Metotları

Zaman serisi tahmin çalışmalarında, verilerin içerdiği doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik yapıların birlikte modellenmesi literatürde önemli bir araştırma problemi olarak ele alınmaktadır. Bu çalışmada, ithalat verilerinin taşıdığı eğilim, mevsimsellik ve karmaşık örüntüler gibi farklı yapısal özellikleri daha kapsamlı biçimde değerlendirebilmek amacıyla geleneksel, hibrit ve evrimsel optimizasyon destekli tahmin yöntemlerini içeren çok yönlü bir metodolojik çerçeve benimsenmiştir. Veri setlerinin yapısal özelliklerinin farklılaşabilmesi nedeniyle, birden fazla tahmin yönteminin karşılaştırmalı olarak kullanılması, model performanslarının daha sağlıklı biçimde değerlendirilmesine ve uygun model seçiminin desteklenmesine katkı sağlamaktadır.

Bu doğrultuda, zaman serilerindeki doğrusal yapıları ve mevsimsel örüntüleri modelleyebilme yeteneğinden dolayı geleneksel bir referans model olarak Mevsimsel ARIMA/SARIMA modeli kullanılmıştır. Verilerdeki doğrusal olmayan ilişkileri ve zamansal bağımlılıkları daha esnek biçimde ele alabilmek amacıyla ise Rastgele Orman (RF) ve Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) yaklaşımlarını bir araya getiren RF-LSTM hibrit modeli çalışmaya dahil edilmiştir. Bu yaklaşımda RF, değişkenler arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri ve etkileşimleri değerlendirebilen ağaç tabanlı bir topluluk öğrenmesi yöntemi olarak kullanılırken, LSTM ardışık zaman bağımlılıklarını ve uzun dönemli örüntüleri öğrenebilme kapasitesiyle modele katkı sağlamaktadır.

Ayrıca, mevsimsel değişimleri modellemede yaygın olarak kullanılan Holt-Winters (HW) yönteminin parametre tahmin sürecini iyileştirmek ve yerel optimuma takılma olasılığını azaltmak amacıyla, sürekli arama uzaylarında etkin çözümler üretebilen evrimsel bir optimizasyon algoritması olan Diferansiyel Evrim (DE) algoritması ile katsayıları optimize edilen DE-HW hibrit modeli de kullanılmıştır. Böylece çalışmada ARIMA/SARIMA, RF-LSTM ve DE-HW hibrit modelleri aynı veri seti üzerinde karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu metodolojik çerçeve, istatistiksel, makine öğrenme temelli ve evrimsel optimizasyon destekli yaklaşımların tahmin performanslarının bütüncül biçimde incelenmesine olanak tanımaktadır.

2.2.1. ARIMA/SARIMA Metodu

SARIMA/ARIMA (Otoregresif Bütünleşik Hareketli Ortalama) modelleri, zaman serilerinin modellenmesi ve tahmin edilmesinde yaygın olarak kullanılan istatistiksel araçlardır. Bu modellerin geliştirilmesi genellikle Box–Jenkins metodolojisi doğrultusunda yürütülmektedir. Söz konusu metodoloji, zaman serisinin temel yapısını yeterli düzeyde temsil eden uygun bir ARIMA(p,d,q) modelinin belirlenmesini amaçlamaktadır ve model tanımlama, parametre tahmini, tanısal kontrol ve öngörüleme olmak üzere dört temel aşamadan oluşmaktadır.

Model tanımlama aşamasında öncelikle serinin durağanlığı incelenir. ARIMA modelleri durağan bir seri varsayımına dayandığından, serinin ortalaması veya varyansı zaman içinde değiştiğinde diğer bir ifade ile seri durağan değilse fark alma işlemi uygulanır. d ile gösterilen fark alma derecesi, Genişletilmiş Dickey–Fuller (ADF) testi gibi birim kök testleri ve/veya serinin otokorelasyon yapısının incelenmesi yoluyla belirlenir. [16,17]. Durağanlık sağlandıktan sonra ikinci aşama, seriyi en uygun biçimde temsil edecek model yapısının belirlenmesidir. Bu aşamada, serinin AR(p), MA(q), ARMA/ARIMA ya da mevsimsel örüntü içermesi durumunda SARIMA yapılarından hangisiyle daha uygun biçimde modellenebileceği değerlendirilir. Bunun için seriye ait otokorelasyon fonksiyonu (ACF) ve kısmi otokorelasyon fonksiyonu (PACF) grafikleri incelenerek, farklı ARIMA ve SARIMA modellerine ilişkin teorik örüntülerle karşılaştırılır. Böylece, tahmin sürecinde kullanılabilecek başlangıç modeli sezgisel olarak belirlenmiş olur. Temel ARIMA(p,d,q) modeli aşağıdaki matematiksel eşitlik ile ifade edilmektedir [18].

$$Z_t = \delta + \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \cdots + \phi_p Z_{p-1} + \epsilon_t - \theta_1 \epsilon_{t-1} - \theta_2 \epsilon_{t-2} - \cdots - \theta_q \epsilon_{t-q} \quad (1)$$

Burada Z_t, t zamanındaki zaman serisi değerini; Z_{t-1}, …, Z_{t-p} ise serinin gecikmeli değerlerini göstermektedir. δ, sabit terimi ifade ederken, p ve q sırasıyla otoregresif (AR) ve hareketli ortalama (MA) bileşenlerinin derecelerini belirtmektedir. φ_1, …, φ_p katsayıları otoregresif parametreleri; θ_1, …, θq katsayıları ise hareketli ortalama parametrelerini göstermektedir. t zamanındaki hata terimi ε_t ile gösterilirken, ε_{t-1}, …, ε_t–q ifadeleri gecikmeli hata terimlerini ifade etmektedir.

SARIMA modeli ise zaman serisi analizinde yaygın olarak kullanılan ARIMA modelinin bir uzantısıdır. SARIMA modelleri, analiz edilen zaman serisinin mevsimsellik göstermesi durumunda özellikle kullanışlıdır. Mevsimsellik, verilerde haftalık, aylık, üç aylık veya yıllık gibi sabit aralıklarla tekrarlanan örüntüleri ifade etmektedir. Mevsimsel olmayan ARIMA modellerinden farklı olarak SARIMA modelleri, serideki trend ve rassal dalgalanmalar gibi mevsimsel olmayan bileşenlerin yanı sıra verinin mevsimsel yapısını da dikkate almaktadır. SARIMA modelinin genel gösterimi $SARIMA\ (p,d,q)(P,D,Q)_S$ şeklindedir. Burada p otoregresif (AR) terimin derecesini, d fark alma derecesini ve q hareketli ortalama (MA) terimin derecesini ifade etmektedir. Benzer şekilde P, Dve Q sırasıyla mevsimsel otoregresif, mevsimsel fark alma ve mevsimsel hareketli ortalama derecelerini; S ise mevsimsel periyodu göstermektedir [18].

Uygun model yapısı belirlendikten sonra ARIMA modelinin parametreleri tahmin edilir. Modelin özelliklerine ve kullanılan yazılıma bağlı olarak parametre tahmini genellikle en çok olabilirlik tahmini veya en küçük kareler tahmini gibi yöntemlerle gerçekleştirilmektedir [19]. Tahmin aşamasını takiben, seçilen modelin zaman serisinin temel yapısını yeterli düzeyde açıklayıp açıklamadığını değerlendirmek amacıyla tanısal kontroller yapılır. Hata terimlerine ilişkin tanısal incelemeler genellikle grafiksel ve istatistiksel araçlar kullanılarak yürütülmektedir. Ljung–Box Q testi, hata otokorelasyonlarının seçilen gecikmeler boyunca anlamlı olup olmadığını değerlendirmek için yaygın biçimde kullanılmaktadır. Q istatistiğiyle ilişkili p değerinin 0,05'in altında olması, hata terimlerinde otokorelasyonun devam ettiğini gösterir. Böyle bir durumda model yeniden gözden geçirilmeli ve uygun bir model elde edilinceye kadar alternatif model yapıları değerlendirilmelidir [18]. Ayrıca hata terimlerine ait ACF ve PACF grafikleri ile normallik testleri tamamlayıcı tanısal araçlar olarak kullanılabilir [20,21].

Mevcut model doğrulandıktan sonra gelecek dönemlere ilişkin öngörülerin üretilmesinde kullanılabilir. Alternatif ARIMA /SARIMA modellerinin tahmin performansı genellikle AIC ve BIC gibi bilgi kriterleri ile RMSE, MAE veya MSE gibi hata ölçütleri birlikte kullanılarak değerlendirilmektedir. Bu kriterler, araştırmacıların alternatif model yapılarını karşılaştırmasına ve hem yeterli uyum sağlayan hem de güvenilir tahmin performansı sunan modeli seçmesine yardımcı olmaktadır [16,22].

2.2.2. Diferansiyel Evrim Algoritması ile Optimize Holt Winters (DE-HW) Metodu

Holt-Winters yöntemi (üçlü üstel düzeltme), zaman serisi verilerini tahmin etmek için tasarlanmış, temel ve yaygın olarak uygulanan seviye, trend ve mevsimsellik içeren zaman serileri için geliştirilmiş bir tahmin metodudur. Karmaşık zaman serilerini yorumlamada güçlü olan bu metod, düzey, eğilim ve mevsimsellik bileşenlerini geçmiş verilerden ayrıştırma ve bu bileşenleri geçmiş gözlemlerin ve tahminlerin ağırlıklı ortalamalarını kullanarak özyinelemeli olarak güncelleme yeteneğine sahiptir. Bu metodoloji, ekonomik göstergeler ve enerji talebinden halk sağlığı gözetimine ve endüstriyel üretime kadar farklı alanlardaki veri setleri için kısa ve orta vadeli tahminlerde sağlam ve hesaplama açısından oldukça etkili bir yöntemdir [23].

Holt–Winters yöntemi seviye, trend ve mevsimsellik bileşenleri ile modellenmektedir. Seviye düzeltme parametresi (α): Zaman serilerindeki rastgele faktörlerin (yani gürültünün) etkisini azaltmaya yardımcı olur. Trend düzeltme parametresi (β): Mevcut dönem ile bir sonraki dönem arasında temel düzeyde meydana gelmesi beklenen değişimi temsil eder. Mevsimsellik düzeltme parametresi (γ): Zaman serisi verilerinin her P döneminde tekrar eden bir davranış gösterme eğilimini ifade eder. Toplamsal ve çarpımsal iki temel çeşidi vardır [23]. Bu çalışmada verinin yapısı nedeni ile toplamsal model kullanılmıştır. Toplamsal model:

Seviye:

$$L_t = \alpha(Y_t - S_{t-m}) + (1-\alpha)(L_{t-1} + T_{t-1}) \quad (2)$$

Trend:

$$T_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1-\beta)T_{t-1} \quad (3)$$

Mevsimsellik:

$$S_t = \gamma(Y_t - L_t) + (1-\gamma)S_{t-m} \quad (4)$$

İleriye dönük h dönemlik tahmin:

$$\hat{Y}_{t+h} = L_t + hT_t + S_{t+h-m[(h-1)/m]} \quad (5)$$

denklemde m mevsimsel uzunluk ve k=(h−1)/m ifade etmektedir [23].

Holt–Winters yönteminde seviye, trend ve mevsimsellik bileşenleri 0 ile 1 arasında herhangi bir değeri almaktadır. Ancak çözüm kümesinin 0 ile 1 arasında sonsuz olması en uygun optimum katsayının hesaplanması oldukça zor bir problem haline gelmektedir. Sonsuz çözüm kümesinde en iyi olduğu çözümü arama yöntemi optimizasyon tekniklerinden meta heuristikler ile daha hızlı bulunabilmektedir. Bu çalışmada Holt-Winters modelindeki α (seviye), β (trend) ve γ (mevsimsellik) katsayılarının optimizasyonunda en etkili yöntemlerden biri olarak kabul edilen Diferansiyel Evrim Algoritması (DE) kullanılmıştır.

Holt-Winters parametre optimizasyon problemi doğrusal olmayan, karmaşık hata yüzeyine sahip ve çok sayıda yerel minimum içeren bir yapı göstermektedir. Klasik optimizasyon yöntemleri çoğu zaman yerel minimumlarda takılı kalabilirken, DE algoritması popülasyon tabanlı küresel arama mekanizması sayesinde çözüm uzayını geniş biçimde tarayarak daha düşük hata değerlerine ulaşabilmektedir. Özellikle zaman serisi tahmin problemlerinde kullanılan MSE, RMSE ve MAPE gibi hata fonksiyonlarının türevlenmesinin zor veya kararsız olduğu durumlarda algoritmanın gradyan bilgisine ihtiyaç duymadan çalışması Diferansiyel Evrim Algoritması için önemli avantaj sağlamaktadır [23]. Algoritmada yer alan mutasyon, çaprazlama ve seçim mekanizmaları sayesinde farklı parametre kombinasyonlarını sürekli güncellemesi, Holt-Winters modelinin veri setine özgü en uygun katsayılarını belirlemesini kolaylaştırmaktadır. Ayrıca algoritmanın keşif ve yoğunlaştırma arasında denge kurabilmesi, özellikle sezonsallık içeren zaman serilerinde daha hızlı yakınsama ve daha yüksek tahmin doğruluğu elde edilmesine katkı sağlamaktadır.

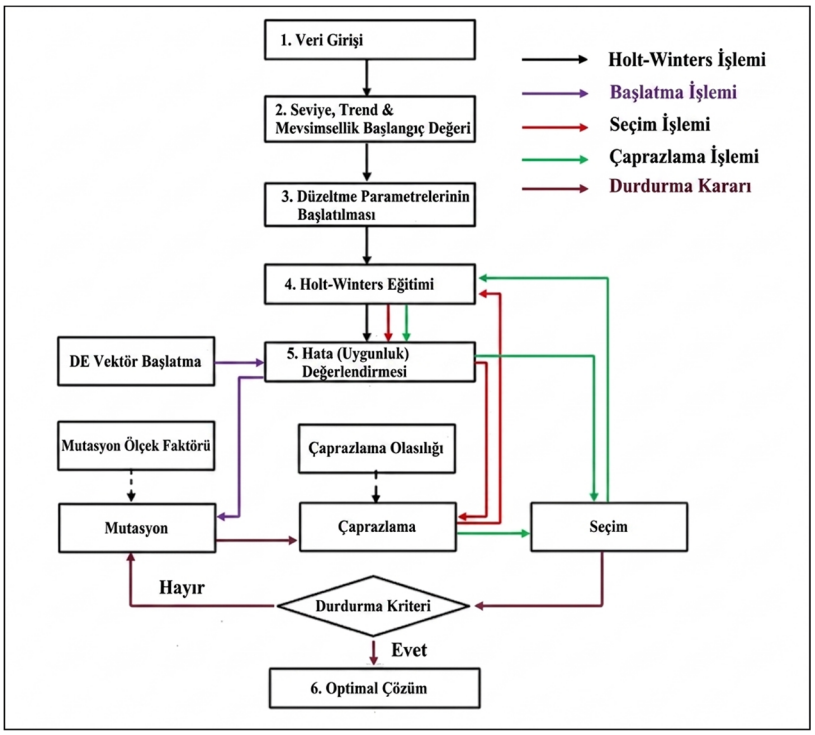
Literatürde Direransiyel Evrim algoritmasının sürekli optimizasyon problemlerinde oldukça güçlü bir küresel optimizasyon yöntemi olduğunu belirtirken, DE'nin karmaşık hata yüzeylerinde gerçek değerli parametre optimizasyonunda başarılı sonuçlar verdiğini göstermiştir [24]. Bu parametrelerin uygun seçilmemesi tahmin doğruluğunu ciddi şekilde düşürmektedir. Bu nedenle çalışma kapsamında parametre optimizasyonu problemi bir minimizasyon problemi olarak ele alınmıştır. Amaç fonksiyonu RMSE değerinin hata oranının minimizasyonudur:

Amaç Fonksiyonu

$$\text{Min } \left(\frac{1}{T} * \sum_i^T (F_i - Y_i)^2\right)^{1/2} \quad \text{i=P,……..T} \tag{6}$$

Kısıtlar:

$$0 \leq [\alpha i, \beta i, \gamma i] \leq 1 \tag{7}$$



Şekil 2. Differansiyel evrim algoritmasının Holt winters katsayılarını hesaplama algoritma akışı

Şekil 2 de gösterildiği üzere algoritma geliştirilen DE-HW Optimizasyonu algoritması parametre özellikleri ise öncelikle 3 parametreye (α (seviye), β (trend) ve γ (mevsimsellik)) göre ayarlanmıştır. Parametrelerin arama uzayında değer sınırları ise [0.0, 1.0]'dir. Başlangıç popülasyon büyüklüğü her bir parametre için 15 toplamda 45'dir. Algoritma maximum iterasyon ya da nesil sayısı olarak 100 belirlenmiştir. Çaprazlama Oranı (CR = 0.7), Mutasyon Faktörü (F = 0.5 - 1.0), Durma Toleransı (tol = 0.01) ve Mutasyon Stratejisi (best1bin) olarak belirlenmiştir.

2.2.3. Hibrit RF-LSTM Metodu

Bu çalışmada derin öğrenme tekniklerinin tahmin çalışmalarındaki yüksek performansları nedeni ile bu çalışmaya dâhil edilmiştir. Petrol verileri gibi yüksek değişkenlik, doğrusal olmayan dinamikler ve küresel şoklara bağlı düzensiz dalgalanmalar içeren zaman serilerinin tahmininde geleneksel doğrusal modeller yetersiz kalabilmektedir. Bu çalışmada tercih edilen hibrit RF-LSTM yöntemi; Rastgele Orman (RF) algoritmasının çok boyutlu veri yapılarındaki karmaşık etkileşimleri çözme ve aşırı öğrenmeyi engelleme gücünü, Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) ağlarının zamansal ardışık bağımlılıkları ve uzun vadeli trendleri yakalama kabiliyetiyle birleştirmektedir. Literatürde, makine öğrenmesi ve derin öğrenmenin bu tür hibrit kombinasyonlarının, enerji piyasalarındaki ani yapısal kırılmaları ve karmaşık kalıpları modellemede tekil tahmin yöntemlerine kıyasla anlamlı derecede daha yüksek doğrusal kararlılık ve düşük hata payı sunduğu ortaya konmuştur [25].

Rastgele Orman (Random Forest-RF), Leo Breiman tarafından geliştirilen, karar ağaçlarına dayalı topluluk öğrenme yöntemidir ve hem sınıflandırma hem de regresyon problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [26]. RF'nin temel amacı, torbalama örnekleme yöntemiyle oluşturulan çok sayıdaki bağımsız karar ağacının çıktılarının regresyon problemlerinde ortalama alınarak birleştirilmesi sayesinde verideki yüksek varyansı azaltmak ve tek bir karar ağacında görülebilen aşırı uyum problemini önlemektir [27]. Özellikle zaman serisi tahmini gibi yüksek değişkenlik içeren veri setlerinde, her bir karar ağacından elde edilen tahminlerin bir araya getirilmesi modelin genelleme performansını artırmakta, aykırı değerlere karşı daha dayanıklı ve kararlı sonuçlar üretmesini sağlamaktadır. RF tahmin süreci matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir [26]:

$$\widehat{Y_{RF}} = \frac{1}{\mathrm{B}}\sum_{b=1}^{B} T_b(x;\circledast_b) \tag{8}$$

Burada:

- $\widehat{Y_{RF}}$: RF modelinin nihai tahmin değeridir.
- B : Ormandaki karar ağacı sayısını ifade eder (*bu çalışmada B = 100'dür?).*
- $T_b(x;\circledast_b)$: Geri koymalı örnekleme yöntemiyle elde edilen $\circledast_b$ parametresine sahip b'inci karar ağacının, x girdisi için ürettiği tahmindir.

Uzun Kısa Vadeli Bellek-LSTM yöntemi, RNN (Tekrarlayan Yapay Sinir Ağı) modelinin özelleşmiş bir türüdür. LSTM sinir ağları, tekrarlayan yapay sinir ağları (RNN) ile benzer bir mimariyi paylaşsalar da, önemli avantajlar sunan benzersiz bir yapay sinir ağı sınıfını temsil ederler. Önceki bir adımın çıktısını bir sonraki adımın girdisi olarak kullanan standart RNN'ler, ardışık adımlarla ilerler ve kısa vadeli bellekleri ile sınırlıdırlar. Bu özellik, onları doğal dil işleme ve zaman serisi analizi gibi ardışık veri problemlerini çözmede etkili kılar. Ancak, uzun vadeli bağımlılıkları öğrenme ve akılda tutma konusundaki sınırlılıkları nedeniyle, ağın işleyişinin erken aşamalarında kritik bilgiler sıklıkla kaybolabilmektedir.

LSTM mimarisi, geleneksel RNN'lerde bulunan bu zorlu kayıp senaryolarının üstesinden gelmek için özel olarak tasarlanmıştır. LSTM hücrelerinin tasarımı, bilgi akışını düzenleyen ve kontrol eden "kapıları" içerir. Bu yapı içinde, unutma kapısı hücre durumu içindeki hangi bilgilerin tutulacağını veya atılacağını belirlerken, girdi kapısı hücreye yeni bilgilerin ne kadarının ekleneceğine karar verir. Ardından hücre durumu bu kararlara göre güncellenerek bilginin uzun vadeli bellekte saklanması sağlanır. Son olarak, çıktı kapısı güncellenmiş hücre durumuna dayanarak gizli durumu (h_t) üretir ve bu durum bir sonraki adıma girdi olarak aktarılır.

Bir Uzun Kısa Vadeli Bellek (LSTM) hücresinin dinamik durumu dört temel bileşen tarafından tanımlanır: girdi kapısı (i_t), unutma kapısı (f_t), çıktı kapısı (o_t) ve hücre durumu (C_t). Bu kapılar; önceki gizli durumu

(h_{t-1}) ve mevcut girdi vektörünü (x_t) dahil ederek, sigmoid (σ) ve hiperbolik tanjant (tanh) aktivasyon fonksiyonları kullanılarak formüle edilir [28]. Bu çalışmadaki modelin çıktısı ise $\widehat{Y_{LSTM}}$'dir. Bu ilişkiler aşağıdaki formüllerle ifade edilir:

a) *Unutma Kapısı* f_t, bir önceki hücre durumundan C_{t-1}'den hangi bilgilerin kaldırılacağına karar verir:

$$f_t = \sigma\,(W_f[h_{t-1}, x_t\,] + b_f) \tag{9}$$

b) *Girdi Kapısı* i_t *ve Aday Durum* $\widetilde{C_t}$, hücre durumunda hangi yeni bilgilerin depolanıp depolanmayacağını belirler:

$$i_t = \sigma\,(W_i[h_{t-1}, x_t\,] + b_i) \tag{10}$$

$$\widetilde{C_t} = \tanh(W_c[h_{t-1}, x_t\,] + b_c) \tag{11}$$

c) *Hücre Durum Güncelleme* C_t, eski hücre durumunu yeni hücre durumuna günceller:

d)

$$C_t = f_t * C_{t-1} + i_t * \widetilde{C_t} \tag{12}$$

e) *Çıktı Kapısı* o_t *ve Gizli Durum* h_t, güncellenmiş hücre durumuna göre çıktıyı belirler:

f)

$$o_t = \sigma\,(W_o[h_{t-1}, x_t\,] + b_o) \tag{13}$$

$$h_t = o_t \odot \tanh(C_t) \tag{14}$$

σ sigmoid aktivasyon fonksiyonunu, W ve *b* eğitim süreci boyunca ağırlık ve bias matrislerini temsil etmektedir.

Zaman serisi verileri genellikle uzun vadeli eğilim (trend) ve döngüsel dalgalanmalar (artıklar/residuals) içerir [25]. Derin öğrenme modellerinin (özellikle LSTM) doğrudan zaman indeksiyle eğitilmesi, geleceğe yönelik tahminlerinde modelin trendi ezberlemesine ve aşırı uyum göstermesine neden olmaktadır.

Bu çalışmada, zaman serisi verilerindeki doğrusal olmayan eğilimleri modellemek ve ana sinyalden ayrıştırmak amacıyla [25] , karar ağaçlarına dayalı bir topluluk öğrenme yöntemi olan Rastgele Orman (RF) algoritması kullanılmıştır. RF algoritması, hem sınıflandırma hem de regresyon problemlerinde yüksek boyuttaki karmaşık veri setleriyle çalışırken sergilediği kararlı performans ile bilinmektedir. Algoritmanın temel amacı, çok sayıda bağımsız karar ağacı inşa ederek bunların çıktılarını birleştirmek, böylece tek bir karar ağacının barındırdığı aşırı uyum riskini ve varyansı minimize etmektir.

Hibrit model çerçevesinde, zaman serisinin barındırdığı yapının LSTM tarafından iyi öğrenilmesi gerekmektedir ancak bu yöntemin eğitim veri setini ezberlemesine neden olmaktadır. LSTM yönteminin veri setini ezberlenmesini önlemek amacıyla bir "trend çıkarma" işlemi uygulanmıştır. Zaman serisinin indeks değerleri bağımsız değişken, serinin gözlem değerleri ise bağımlı değişken olarak kurgulanmıştır. Trend bileşeninin başarılı bir şekilde izole edilmesi için kullanılan RF modelinde hiperparametreler; ağaç sayısı (B) 100 ve maksimum ağaç derinliği 6 olarak belirlenmiştir.

Rastgele Orman (RF) modeline ait ağaç sayısı (B) 100 ve maksimum ağaç derinliği 6 hiperparametreleri, literatürdeki çalışmalar incelenerek ve kural tabanlı yaklaşımlar dikkate alınarak seçilmiştir. RF modellerinde ağaç sayısının 64 ila 128 arasında seçilmesinin asimptotik varyansı dengelemek ve kararlı tahminler üretmek için yeterli olduğu, 100 ağaç değerinin optimum başarım sağladığı gösterilmiştir [29]. Önceki çalışmalar, RF' de derinlik parametresinin doğrudan model karmaşıklığını kontrol ettiğini ve sınırlı derinliğin bir düzenlileştirme işlevi görerek varyansı düşürdüğünü göstermiştir. Bu nedenle bu çalışmada RF'de maksimum ağaç derinliğin 6 sınırlandırılması ise zaman serisi ayrıştırma üzerine yapılan çalışmalar dikkate alınarak karar verilmiştir [30].

Geliştirilen RF modeli, gözlenen zaman serisi verisi üzerinde eğitilerek makro eğilimi (T_t) hesaplamıştır. Gerçek gözlem değerlerinden (Y_t) bu makro eğilim çıkarılarak saf sinyal, yani kalıntılar/artıklar (R_t) elde edilmiştir [25]:

$$R_t = Y_t - T_t \tag{15}$$

Bu matematiksel operasyon sayesinde, veri setindeki aşırı veya ani dalgalanmalar karşısında dirençli olan RF algoritması, serinin doğrusal olmayan genel gidişatını yakalamış; geriye kalan durağana yakın durağan ve döngüsel sinyal (R_t) ise çok değişkenli LSTM modeline girdi olarak beslenmek üzere hazır hale getirilmiştir.

1. Adım: Zaman serisinin zamansal indeks yapısı kullanılarak (ağaç sayısı, B=100) ve maksimum ağaç derinliği ise 6 olarak belirlendiği parametrelere sahip bir RF Regressor modeli eğitilir ve serinin makro trend bileşeni (T_t) tahmin edilmiştir.
2. Artık Sinyalin hesaplaması ve ölçeklendirme de ise gerçek verilerden RF trend çıktısı çıkarılarak eğilimden arındırılmış artık sinyal (R_t) üretilir. Elde edilen artıklar, ortalaması 0, varyansı 1 olacak şekilde normalize edilmiştir.
3. Çok değişkenli girdi matrisinin oluşturulmasında ise ölçeklendirilmiş artık serisine, zamansal döngüselliği temsil etmek üzere sinüs ve kosinüs dönüşümleri uygulanmış sinüs ve kosinüse bağlı çok değişkenli veri matrisi inşa edilmiştir.
4. Kaydırıcı pencere ve veri bölümlemede ise oluşturulan matris, 24 aylık geriye dönük pencereler halinde katlanarak zaman serisi dizilerine dönüştürülür. Veri seti zamansal bütünlüğü korunarak %80 eğitim ve %20 test (doğrulama) olarak ikiye ayrılmıştır.

Modelin doğruluğunu en üst düzeye çıkarmak ve aşırı uyumu engellemek adına çapraz doğrulama ve parametre optimizasyonu yaklaşımlarına paralel olarak Optuna kütüphanesi entegre edilmiştir. TPE (Tree-structured Parzen Estimator) örnekleyicisi kullanılarak 25 iterasyon boyunca LSTM mimarisinin gizli katman boyutu [16,64], öğrenme oranı [0,001- 0,005] ve ağırlık azaltma [0,0001-0,01] hiperparametreleri optimize edilmiştir. Nihai üretim modelinden elde edilen ölçeklendirilmiş artık tahminleri, ters dönüşüm işlemine tabi tutulmuş ve RF modelinin geleceğe yönelik ürettiği makro trend tahminleri ($T_{gelecek}$) ile matematiksel olarak birleştirilerek nihai tahmin değerlerine ulaşılmıştır. Modelin genelleştirme yeteneği Kök Ortalama Kare Hata (RMSE), Ortalama Kare Hata (MSE), Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE) ve Ortalama Mutlak Sapma (MAD) metrikleri kullanılarak kontrol edilmiştir.

2.2.4. Hata Metrikleri

Bu çalışmada tahmin modellerinin performanslarını karşılaştırmak için MAPE, MSE, RMSE ve MAD hata metrikleri kullanılmıştır. Her bir hata metriğinin ölçtüğü ve ele aldığı tahmin kriterleri birbirinden farklıdır. MSE büyük hataları daha çok cezalandırırken, MAPE hataları yüzde olarak ifade etmekte ve MAD ise hataların yönüne bakmaksızın ortalama mutlak hata değeri sunmaktadır. MAPE yüzde cinsinden sunulduğu için, en sezgisel ve anlaşılması kolay öngörü hatası ölçütlerinden biri olarak kabul edilir [31].

MAPE Ortalama Mutlak Yüzde Hata metriğinin formülü aşağıdaki gibidir:

$$\text{MAPE}= \%100/n*\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{y_i-\tilde{y}_i}{y_i}\right| \tag{16}$$

MAD, Ortalama Mutlak Sapma, gerçek değerler ile tahmin edilen değerler arasındaki dikey mesafenin (hatanın) yönüne (pozitif/negatif) bakmaksızın büyüklüğünü ölçer ve MAD hata metriğinin formülü aşağıdaki gibidir:

$$\text{MAD}= (1/n)*\sum_{i=1}^{n}|y_i-\tilde{y}_i| \tag{17}$$

MSE Ortalama Kare Hata, hataların karelerini alarak ölçüm yapan metriğin formülü aşağıdaki gibidir:

$$\text{MSE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2 \tag{18}$$

RMSE, Kök Ortalama Kare Hata, hataların karelerinin ortalamasının karekökünü alarak ölçüm yapan metriğin formülü aşağıdaki gibidir:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(y_i - \tilde{y}_i)^2}{n}} \tag{19}$$

Yukarıda belirtilen formüllerde y_i, gerçek değeri; $\tilde{y}_i$, tahmin değeri; n, veri sayısı ifade etmektedir.

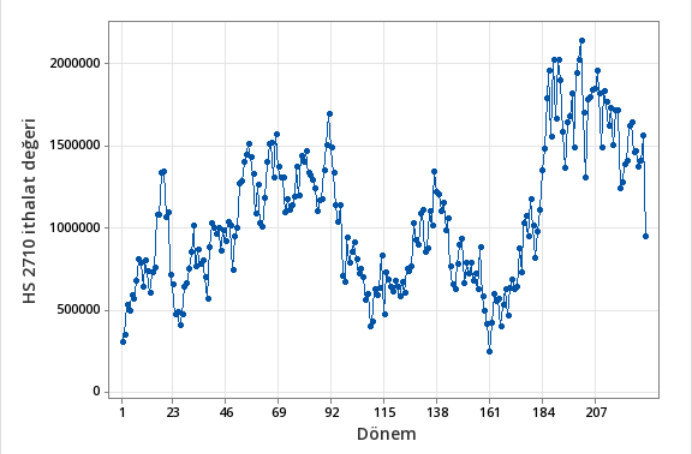
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, Türkiye'nin GTİP 2710 kodlu ürününe ilişkin aylık ithalat değerlerinin tahmin edilmesi amacıyla ARIMA/SARIMA, DE-HW ve Hibrit RF–LSTM modellerinden elde edilen bulgular sunulmuş ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmada önerilen makine öğrenmesi ve meta-sezgisel optimizasyon modellerinin geliştirilmesi, eğitilmesi ve test edilmesi süreçleri; x64 tabanlı çok çekirdekli bir işlemci mimarisi ve 64-bit işletim sistemi altyapısına sahip bir bilgisayar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kodlama ve algoritma entegrasyonu süreçlerinde geliştirme ortamı olarak Visual Studio Code (VS Code) tercih edilmiş olup, tüm sayısal analizler ve modelleme optimizasyonları Python programlama dili kullanılarak yürütülmüştür. Modellerin tahmin performansları MAD, MAPE, MSE ve RMSE hata ölçütleri temelinde incelenmiş; elde edilen sonuçlar doğrultusunda modellerin tahmin başarıları karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır.

3.1. ARIMA/SARIMA Modeli Bulguları

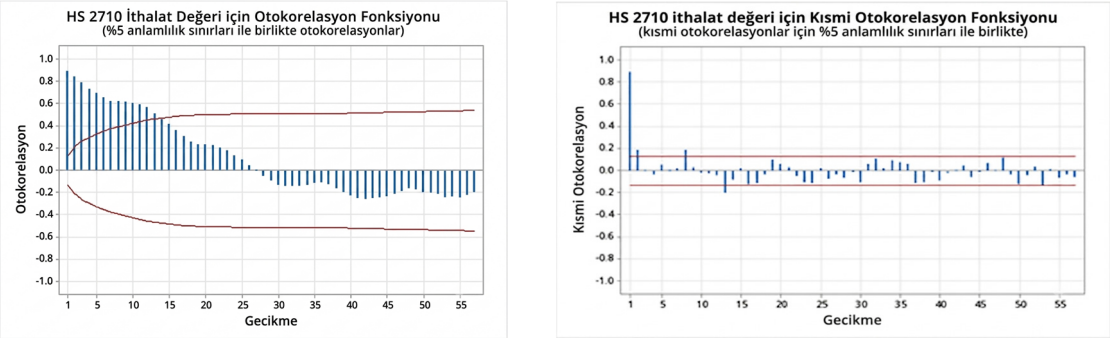
GTİP 2710 kodlu ürüne ilişkin aylık ithalat değerlerine uygun ARIMA modelinin belirlenmesi için Minitab 22 istatistik paket programı kullanılmıştır. Bölüm 2.2.1'de belirtildiği üzere, seri için en uygun ARIMA modelinin belirlenmesinde ilk adım serinin durağanlığının incelenmesidir. Bu amaçla, öncelikle görsel yöntemler kullanılarak bir ön değerlendirme yapılmıştır.

Şekil 3'te sunulan GTİP 2710 petrol ürünleri ithalat değerlerine ait zaman serisi grafiği, serinin dönemler itibarıyla dalgalı bir seyir izlediğini ve belirli dönemlerde artış eğilimi gösterebildiğini ortaya koymaktadır. Grafiksel inceleme, seride olası eğilim ve mevsimsel hareketlerin bulunabileceğine ilişkin ön bir değerlendirme sunmakla birlikte, bu yapıların varlığının istatistiksel testler ve modelleme süreciyle ayrıca doğrulanması gerekmektedir.



Şekil 3. GTİP 2710 ithalat değeri zaman serisi grafiği

Şekil 4'de ise, serinin ACF ve PACF grafikleri verilmiştir. ACF grafiğinde, ilk gecikmelere ait otokorelasyon katsayılarının yüksek olduğu ve gecikme sayısı arttıkça kademeli olarak azaldığı görülmektedir. Bu durum, serinin durağan olmadığını ve trend yapısı içerdiğine dair bilgi vermektedir. PACF grafiğinde ise birinci gecikmede güçlü ve anlamlı bir kısmi otokorelasyon değeri gözlenirken, sonraki gecikmelerin büyük ölçüde anlamlılık sınırları içerisinde kaldığı görülmektedir. Bu bulgular, serinin düzey değerlerinde durağan olmadığını ve ARIMA/SARIMA modellemesi öncesinde fark alma işleminin uygulanması gerektiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4. GTİP 2710 ithalat değeri ACF ve PACF grafiği

Serinin durağanlığına ilişkin görsel değerlendirmelerin istatistiksel olarak da desteklenmesi amacıyla Genişletilmiş Dickey–Fuller (ADF) birim kök testi uygulanmıştır. ADF testinde sıfır hipotezi (H_0), serinin birim kök içerdiğini ve dolayısıyla durağan olmadığını; alternatif hipotez (H_1), ise serinin durağan olduğunu ifade etmektedir. ADF testine ilişkin sonuçlar Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. GTİP 2710 ithalat değerleri serisi için ADF birim kök testi sonuçları

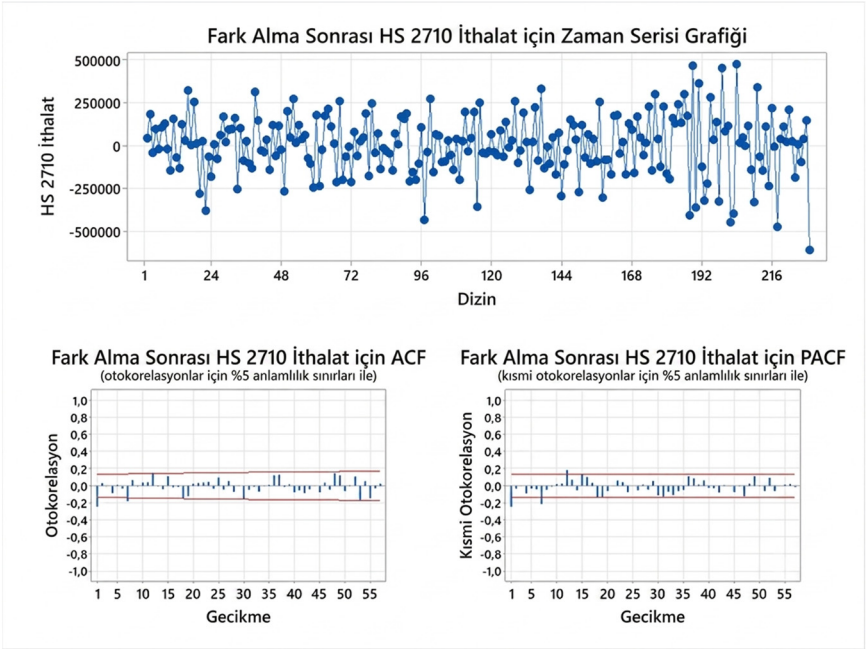
Test istatistiği	Kritik değer(%5)	p-değeri	Karar	Öneri
-2,86987	-2,87436	0,05	H_0 red edilememiştir	Fark alma işlemi uygulanmalıdır

ADF testi sonucunda test istatistiği -2,86987; %5 anlamlılık düzeyindeki kritik değer ise -2,87436 olarak elde edilmiştir. Test istatistiği kritik değerden daha küçük olmadığından sıfır hipotezi reddedilememiştir. Bu nedenle seri düzey değerlerinde durağan kabul edilmemiştir. Bu doğrultuda, modelleme öncesinde serinin durağanlaştırılması amacıyla birinci dereceden fark alma işlemi uygulanmış ve seri durağanlaştırılmıştır.

Durağanlaştırılmış seriye ilişkin ADF testi sonuçları Çizelge 2'de sunulmuş; serinin zaman serisi grafiği ile ACF ve PACF grafikleri ise Şekil 5'de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Farkı alınmış GTİP 2710 ithalat değerleri serisine ilişkin adf birim kök testi sonuçları

Test istatistiği	Kritik değer(%5)	p-değeri	Karar	Öneri
-7,007	-2,87436	0,05	H_0 red edilir	Fark alma işlemi uygulamaya gerek yoktur



Şekil 5. Farkı alınmış GTİP 2710 ithalat değerleri serisine ait zaman serisi, ACF ve PACF grafikleri

Fark alma işlemi sonrasında elde edilen durağan seriye ilişkin ADF birim kök testi sonuçları ve serinin zaman serisi, ACF ve PACF grafikleri birlikte değerlendirildiğinde, serinin modelleme için uygun hale geldiği görülmektedir. ACF ve PACF grafikleri, serideki otokorelasyon yapısının belirlenmesi ve uygun ARIMA/SARIMA model bileşenlerinin seçilmesi açısından ön bilgi sağlamaktadır. Bu grafiksel incelemeler ve model denemeleri doğrultusunda, GTİP 2710 ithalat değerleri serisi için en uygun model belirlenmiş ve modele ait parametre tahmin sonuçları Çizelge 4'de sunulmuştur.

Çizelge 4. GTİP 2710 ithalat değerleri serisine ait ARIMA/SARIMA modeli parametre tahmin sonuçları

Test istatistiği	Kritik değer(%5)	p-değeri	Karar	Öneri
AR(1)	-0,2682	0,0660	-4,07	0,000
SMA(12)	-0.2300	0.0692	-3,33	0,001

Nihai model sonuçlarına göre, AR(1) parametresinin katsayısı -0,2682 olup istatistiksel olarak anlamlıdır ($p < 0,05$). Bu bulgu, farkı alınmış GTİP 2710 ithalat değerleri serisinde kısa dönemli otoregresif bir ilişkinin bulunduğunu göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, serinin mevcut dönem değerleri üzerinde bir önceki döneme ait değerlerin anlamlı bir etkisi bulunmaktadır. Bununla birlikte, 12 dönemlik mevsimsel hareketli ortalama parametresi SMA(12) de istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,05$).
Aylık veri yapısında 12 dönemlik gecikme yıllık periyoda karşılık geldiğinden, bu sonuç seride yıllık dönemli mevsimsel hata bileşeninin modele anlamlı katkı sağladığını göstermektedir. ACF ve PACF grafiklerinde güçlü ve düzenli bir mevsimsel yapı belirgin biçimde gözlenmemekle birlikte, SMA(12) parametresinin anlamlılığı seride zayıf ancak istatistiksel olarak dikkate alınması gereken bir mevsimsel etkinin bulunduğunu düşündürmektedir.

Bu nedenle, nihai model seçiminde yalnızca grafiksel incelemeler değil, parametrelerin istatistiksel anlamlılığı ve model uygunluk ölçütleri de birlikte değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, GTİP 2710 ithalat değerleri serisinin modellenmesinde AR(1) ve SMA(12) bileşenlerini içeren SARIMA yapısının uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Bir sonraki aşamada, tahmin edilen SARIMA modeline ait hata terimlerinin beyaz gürültü özelliği gösterip göstermediğinin değerlendirilmesi amacıyla tanısal kontroller gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, model artıklarında otokorelasyon bulunup bulunmadığını test etmek için Ljung–Box Q testi uygulanmıştır. Test sonuçlarına göre 12. ve 24. gecikmelerde elde edilen p-değerleri sırasıyla 0,143 ve 0,066 olup 0,05 anlamlılık düzeyinin üzerindedir. Bu durum, model artıklarında kısa ve orta dönemli gecikmeler açısından istatistiksel olarak anlamlı bir otokorelasyon bulunmadığını göstermektedir. Bu doğrultuda, belirlenen $SARIMA(1,1,0)(0,0,1)_{12}$ modelinin GTİP 2710 ithalat değerleri serisinin tahmininde kullanılabilir nitelikte olduğu değerlendirilmiştir. Önerilen modele ait hata ölçütleri Çizelge 5'de verilmiştir.

Çizelge 5. GTİP 2710 ithalat değerleri serisine ait ARIMA/SARIMA modeli sonuçları

Hata metriği	Değer
MSE	28.856.200.000
RMSE	169.871
MAD	131.391,4
MAPE	%13,72

3.2. DE Optimize Holt-Winters Modeli Bulguları

Zaman serisinin doğrusal olmayan trend ve kararlı mevsimsel yapısını eş zamanlı olarak modelleyebilmek adına Toplamsal Holt-Winters yöntemi uygulanmış; modelin dinamiklerini belirleyen düzeltme parametreleri Diferansiyel Evrim (DE) algoritması ile RMSE objektif fonksiyonu minimize edilerek optimize edilmiştir. Küresel optimizasyon işlemi oldukça hızlı 2 saniye gibi kısa bir sürede yakınsamıştır. Optimizasyon süreci neticesinde elde edilen parametre değerleri şu şekildedir:

- Seviye düzeltme parametresi (α), zaman serilerindeki rastgele faktörlerin (yani gürültünün) etkisini azaltmaya yardımcı olan değer: 0,6272
- Trend düzeltme parametresi (β), Mevcut dönem ile bir sonraki dönem arasında temel düzeyde meydana gelmesi beklenen değişimi temsil eden değer: 0,0219

- Mevsimsellik düzeltme parametresi (γ), zaman serisi verilerinin her dönemde tekrar eden bir davranış gösterme eğilimini ifade eden değer: 0,0639

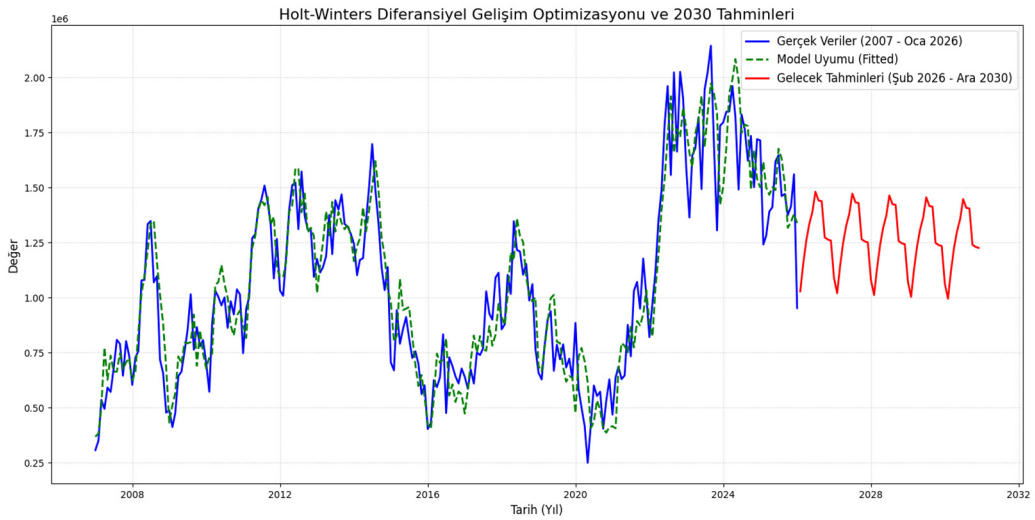
Yüksek bir α değeri (0,6272), modelin petrol ürünleri ithalatındaki güncel değişimlere ve yapısal dalgalanmalara karşı oldukça duyarlı olduğunu ve yakın geçmişteki verilere daha fazla ağırlık verdiğini göstermektedir. Buna karşın, oldukça düşük hesaplanan β (0,0219) ve γ (0,0639) parametreleri, serinin uzun vadeli trend ivmesinin ve mevsimsel kalıplarının zaman içinde ani kırılmalara uğramadan, kararlı ve yumuşatılmış bir yapıda korunduğunu doğrulamaktadır.

DE-HW modelinin geçmiş veriler üzerindeki uyum başarısını ve genelleme yeteneğini ölçmek amacıyla literatürde sıklıkla başvurulan hata metrikleri hesaplanmıştır. Elde edilen istatistiksel sonuçlar Çizelge 6'da sunulmuştur.

Çizelge 6. GTİP 2710 ithalat değerleri serisine ait DE-HW Modeli Sonuçları

Hata metriği	Değer
MSE	26.046.034.698,91
RMSE	161.387,84
MAD	125.340,10
MAPE	%13,70

DE optimize Holt-Winters Modelin ortalama mutlak yüzde hatası (MAPE) %13,70 olarak elde edilmiştir. Petrol piyasası gibi küresel krizlerden, jeopolitik risklerden ve makroekonomik değişimlerden doğrudan etkilenen yüksek değişkenlik gösteren bir veri setinde %13,70'lik bir yüzdesel hata payı, geliştirilen meta-sezgisel tabanlı modelin yüksek doğrulukta kararlı tahminler üretebildiğinin güçlü bir kanıtıdır.



Şekil 6. DE-HW Metodu ile geliştirilmiş GTİP 2710 ithalat değerleri serisine ait gerçek değer ve tahmin değerleri

Optimum parametrelerle çalıştırılan model, Şubat 2026 ile Aralık 2030 arasındaki dönemi kapsayan toplam 59 aylık bir tahmin üretmesi için çalıştırılmıştır. Modelden elde edilen makro düzeydeki yıllık öngörü değerleri Şekil 6'da görselleştirilmiştir. Tahmin çıktıları incelendiğinde, petrol ürünleri ithalatının gelecekteki seyrine dair iki önemli karakteristik bulgu öne çıkmaktadır. Modelin ürettiği sonuçlar incelendiğinde mevsimsel kararlılık vardır Model, geçmiş verilerden öğrendiği mevsimsel döngüyü başarılı bir şekilde geleceğe taşımıştır. Her yılın Temmuz ayında ithalatta zirve noktalarına ulaşılırken, kış aylarında ithalat talebinin dibe vurduğu periyodik dalga yapısı net bir şekilde izlenebilmektedir. Model, 2024 yılı sonrasında veride gözlenen doygunluk ve düşüş eğilimini yakalayarak 2026-2030 aylık tahminlerinin rasyonel bir trend bileşeni olarak yansıtmıştır. Yıllar itibariyle tepe ve dip noktalarının mutlak büyüklüklerinde radikal kırılmalar olmaksızın, uzun vadede hafif seyirli ve dengeli bir gerileme eğilimi öngörülmüştür. Bu kararlı yapı, DE algoritmasının yerel çözümlere takılmadan global optimum parametreleri bularak modelin aşırı öğrenmesini ve gelecek tahminlerinde mantıksız patlamalar yapmasını engellediğini ortaya koymaktadır.

3.3. Hibrit RF-LSTM Modeli Bulguları

Geliştirilen hibrit modelin artık bileşenini tahmin eden çok değişkenli LSTM mimarisinin hiper parametreleri, Bayesyen Optimizasyon tabanlı Optuna algoritması kullanılarak 25 iterasyon boyunca optimize edilmiştir. Yapılan deneysel simülasyonlar sonucunda, en düşük doğrulama hatasını veren optimum mimari yapıyı modelin gizli katmanında 16 nöron kullanılmasına ve ağın 200 epok (eğitim döngüsü) boyunca AdamW optimize edici eşliğinde eğitilmesine karar verilmiştir. Optimizasyon sonucunda en uygun öğrenme oranı 0,001285, regülasyon katsayısı ise 0,000130 olarak belirlenmiştir. RF modelinde ise ağaç sayısı, B=100) ve maksimum ağaç derinliği ise 6 olarak belirlendiği parametrelere sahip bir RF Regressor modeli çalıştırılmıştır.



Şekil 7. Hibrit RF-LSTM Modeli ile geliştirilmiş GTİP 2710 ithalat değerleri serisine ait gerçek değer ve tahmin değerleri

Şekil 7 incelendiğinde başlangıçtan 2026 yılına kadar olan Mavi çizgi (Gerçek veri) ile yeşil/turuncu çizgiler (Modelin tahminleri) neredeyse birebir örtüştüğü görülmektedir. Özellikle 2012 ve 2024'teki büyük zirveleri ve 2016 ile 2020'deki sert düşüşleri model başarıyla yakalamıştır. Zaman serilerindeki bu ani dönüşleri yakalamak modeller için oldukça zordur; Hibrit model burada çok başarılı bir modelleme göstermiştir.

Trend ayrıştırma yaklaşımıyla entegre edilen önerilen hibrit modelin çerçevesinin deneysel bulguları, incelenen zaman çizelgesi boyunca güçlü bir tahmin kabiliyeti ortaya koymaktadır. Modelin performansı, yüksek ölçekli zaman serisi tahminlerinde oynaklık ve doğruluğu değerlendirmek için MSE, RMSE ve MAD nin yanı sıra özellikle standart bir metrik olan Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE) kullanılarak da titizlikle test edilmiştir. Elde edilen değerler Çizelge 7'de verilmiştir.

Çizelge 7. GTİP 2710 ithalat değerleri serisine ait Hibrit RF-LSTM Modeli Sonuçları

Hata metriği	Eğitim hata değeri	Doğrulama hata değeri
MSE	5.875.879.172,91	11.301.858.588,80
RMSE	76.654,28	106.310,20
MAD	60.712,13	87.070,82
MAPE	%7,48	%5,45

Yapay Sinir ağlarında tahmin verilerine ait modellerde karşılaşılan en büyük problemlerden biri modelin veriye göre daha az uygun olması ya da modelin veriyi aşırı derecede ezberleyerek olmasıdır. Çizelge 7'de gösterilen değerler incelendiğinde hibrit modelin, %7,48 gibi oldukça düşük bir Eğitim MAPE değeri elde ederek tarihsel veriler içindeki karmaşık zamansal bağımlılıkları ve doğrusal olmayan kalıpları yakalama konusunda oldukça iyi bir başarı göstermiştir. Ayrıca doğrulama MAPE değeri %5,45 olarak kaydedilmiştir. Eğitim ve doğrulama hataları arasındaki çok küçük olan %2 'lik bir fark ise, hibrit modelin aşırı öğrenme riskini başarılı bir şekilde hafiflettiğini ve veri noktaları üzerinde yüksek genelleme yeteneğine sahip olduğunu yapısal olarak kanıtlamaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Türkiye'nin 2710 GTİP kodlu petrol ve petrol ürünleri ithalat verileri kullanılarak, ekonomik açıdan stratejik öneme sahip bu ürün grubunun 2030 yılına kadar olan ithalat değerlerinin tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, geleneksel zaman serisi yaklaşımlarından ARIMA/SARIMA modelleri ile meta-sezgisel optimizasyon temelli DE-HW ve makine öğrenmesi tabanlı hibrit RF-LSTM modelleri uygulanmıştır. Geliştirilen modellerin tahmin performansları MSE, RMSE, MAD ve MAPE hata ölçütleri kullanılarak karşılaştırılmış ve böylece 2710 GTİP kodlu petrol ürünleri ithalatı için en uygun tahmin yaklaşımının belirlenmesi hedeflenmiştir. Çizelge 8 'de modellerden elde edilen tahmin hata değerleri, GTİP 2710 (petrol yağları ve bitümenli minerallerden elde edilen yağlar) faslı altındaki ithalat değerlerinin tahmininde geleneksel istatistiksel yaklaşımlar ile modern makine öğrenmesi tabanlı hibrit mimarilerin tahmin performanslarını hata metrikleri ile ortaya konulmuştur.

Çizelge 8. GTİP 2710 ithalat değerleri için ARIMA/SARIMA, DE-HW, Hibrit RF-LSTM Modelleri hata metrikleri

Yöntem/Hata metriği	MSE	RMSE	MAD	MAPE
ARIMA/SARIMA	28.856.200.000,00	169.871,00	131.391,40	%13,72
HW-DE	26.046.034.698,91	161.387,84	125.340,10	%13,70
Hibrit RF-LSTM	11.301.858.588,80	106.310,20	87.070,82	%5,45

Elde edilen bulgular, ARIMA/SARIMA modelinin %13,72 düzeyindeki MAPE ve 28.856.200.000,00 düzeyindeki MSE değeri ile belirli bir tahmin performansı sunduğunu; ancak ithalat verilerinde gözlenen ani dalgalanmalar, yapısal değişimler karşısında hibrit RF-LSTM modeline kıyasla daha sınırlı bir doğruluk düzeyine ulaştığını göstermektedir.

Benzer şekilde, HW-DE modeli de %13,70 MAPE ve 161.387,84 RMSE değerleriyle ARIMA/SARIMA modeline oldukça yakın bir performans sergilemiştir. Bu sonuç, meta-sezgisel optimizasyon desteğiyle geliştirilen HW-DE yaklaşımının geleneksel modellere kıyasla az miktarda da olsa iyileştirici bir katkı sağlayabildiğini, ancak doğrusal olmayan örüntülerin ve zaman içindeki karmaşık bağımlılıkların modellenmesinde geliştirilen hibrit RF-LSTM modelinin daha güçlü bir tahmin performansı ortaya koyduğunu göstermektedir. Önerilen Hibrit RF-LSTM modeli tüm hata ölçütleri açısından diğer modellere kıyasla daha düşük hata değerleri üretmiştir. Modelin MSE değeri 11.301.858.588,80; RMSE değeri 106.310,20; MAD değeri 87.070,82 ve MAPE değeri %5,45 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, RF-LSTM modelinin hem hata büyüklüğü hem de oransal tahmin doğruluğu açısından karşılaştırılan diğer yöntemlere göre daha az hata içeren sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır.

Bu bağlamda elde edilen bulgular, küresel şoklara ve dış ticaret koşullarındaki değişimlere duyarlılık gösteren ithalat serilerinin modellenmesinde, makine öğrenmesi ve derin öğrenme temelli hibrit yaklaşımların geleneksel zaman serisi modellerine kıyasla daha yüksek tahmin performansı sunma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Karşılaştırmalı hata ölçütleri dikkate alındığında en düşük hata değerlerini üreten Hibrit RF-LSTM modeli, gelecek dönem tahminleri için uygun model olarak belirlenmiştir. Bu model aracılığıyla 2030 yılına kadar elde edilen tahmin değerleri Çizelge 9'da sunulmuştur.

Çizelge 9. GTİP 2710 ithalat değerleri için en iyi sonucu veren Hibrit RF-LSTM Modeli ile 2030 yılına tahmin değerleri

Aylar/Yıllar	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Ocak	*1.713.598*	*952.007*	1.087.538	1.086.019	1.085.080	1.084.666
Şubat	*1.240.566*	1.132.652	1.127.850	1.121.071	1.121.389	1.120.833
Mart	*1.280.841*	1.204.622	1.193.895	1.192.727	1.193.110	1.192.994
Nisan	*1.390.111*	1.221.752	1.214.966	1.217.792	1.217.955	1.218.382
Mayıs	*1.410.276*	1.216.333	1.211.655	1.213.941	1.214.208	1.214.658
Haziran	*1.618.367*	1.208.357	1.206.621	1.207.327	1.207.656	1.207.947
Temmuz	*1.646.163*	1.201.575	1.199.132	1.199.715	1.199.954	1.200.117
Ağustos	*1.460.702*	1.189.957	1.189.852	1.190.334	1.190.486	1.190.562
Eylül	*1.470.063*	1.179.045	1.179.477	1.179.460	1.179.512	1.179.526
Ekim	*1.374.377*	1.168.128	1.168.134	1.168.060	1.168.035	1.168.005
Kasım	*1.413.160*	1.152.135	1.152.427	1.152.156	1.152.078	1.152.012
Aralık	*1.559.565*	1.121.019	1.121.287	1.120.930	1.120.757	1.120.622

Çizelge 9'da sunulan tahmin sonuçlarına göre, 2007 yılında 306.251 düzeyinde gerçekleşen ithalat değerinin, ekonomik büyüme, sanayi üretimindeki artış ve enerji talebindeki genişlemeye paralel olarak 2026 yılı Ocak ayında 952.007 seviyesine ulaştığı görülmektedir. Bu gelişme, petrol ürünlerinin ekonomik faaliyetler içerisindeki önemini ve söz konusu ürünlere yönelik talebin zaman içerisinde artış eğiliminde olduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte, genel yükseliş eğiliminin 2019–2020 döneminde zayıfladığı ve bu süreçte ithalat değerlerinin 248.745 seviyesine kadar gerilediği gözlenmektedir. Bu dönemin COVID-19 pandemisiyle örtüşmesi, söz konusu gelişmenin pandemi kaynaklı küresel ekonomik ve ticari koşullarla ilişkili olabileceğini düşündürmektedir. Ancak pandemi sonrası dönemde ekonomik faaliyetlerdeki toparlanma ve küresel ticaret koşullarındaki normalleşmeyle birlikte ithalat hacminde yeniden artış eğilimi ortaya çıkmış ve son altı yıllık dönemde 1.618.367 seviyesine ulaşılmıştır.

2026-2030 dönemine ilişkin tahmin sonuçları da petrol ürünleri ithalatının önümüzdeki yıllarda yüksek seviyelerini koruyabileceğine ve talebin devam eden ekonomik faaliyetlerle uyumlu bir görünüm sergileyebileceğine işaret etmektedir.

Bu çalışmada geliştirilen hibrit RF-LSTM modeli, geçmiş verilerdeki doğrusal olmayan dinamikleri ve dönemsel dalgalanmaları uygun bir şekilde modelleyerek diğer yöntemlere göre daha yüksek doğrulukta gelecek tahminleri üretmiştir. Bununla birlikte, uzun dönemli (2026-2030) petrol ürünleri ithalatı öngörülerinin, yalnızca geçmiş veri örüntülerine bağlı kalmayan bir dizi yapısal ve dışsal faktörün etkisi altında şekillenebileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Özellikle petrol ve türevleri (HS 2710), küresel ve bölgesel jeopolitik gelişmeler ile enerji politikalarındaki değişimlere karşı son derece hassastır. Tedarik zincirindeki olası kırılmalar, ticaret rotalarındaki gerilimler veya ulusal stratejik stok politikaları, ithalat hacimlerinde modelin öngördüğü pürüzsüz trendin dışına çıkan ani dalgalanmalara (şoklara) yol açabilir. Diğer taraftan, karbon nötr hedefleri doğrultusunda hız kazanan teknolojik dönüşümler ve elektrikli araçların (EV) yaygınlaşması gibi alternatif enerji kaynaklarına geçiş süreçleri, uzun vadede fosil yakıtlara olan yapısal talebi aşağı yönlü baskılama potansiyeline sahiptir. Sonuç olarak, önerilen yapay zekâ tabanlı model makroekonomik planlama için güçlü ve güvenilir bir temel senaryo sunmakla birlikte; karar vericilerin bu istatistiksel öngörüleri jeopolitik risk senaryoları ve yeşil enerjiye geçiş tahminleri gibi nitel ve dışsal dinamiklerle birlikte, dinamik bir esneklikle değerlendirmesi daha doğru karar almada etkili olacağı düşünülmektedir.

6. KAYNAKLAR

1. Kökyıldırım, A. & Antmen, Z.F. (2024). Determination of financial performance in electric power enterprises with entropy weighted WASPAS analysis method. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39*(3), 849-860.
2. Erkök, B. & Kütük, Y. (2023). Dependency on imported energy in Turkey: Input-output analysis. *Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 45*(1), 47-70.
3. Ürkmez, İ. & Okyar, M.C. (2022). The effect of renewable energy on energy import dependence: An empirical analysis in Turkey. *Siyasal: Journal of Political Sciences, 31*(2), 443-462.
4. Özlale, Ü. & Pekkurnaz, D.J.E.P. (2010). Oil prices and current account: A structural analysis for the *Turkish Economy. 38*(8), 4489-4496.
5. Yalta, A.Y. & Yalta, A.T. (2017). Dependency on imported oil and its effects on current account. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, Policy, 12*(10), 859-867.
6. Tekin, P. (2022). Çukurova Bölgesi için kısa vadeli yapay zeka tabanlı rüzgar güç tahmini. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37*(4), 1143-1154.
7. Ediger, V.Ş. & Berk, I. (2011). Crude oil import policy of Turkey: Historical analysis of determinants and implications since 1968. *Energy Policy, 39*(4), 2132-2142.
8. Solak, A.O. (2013). Türkiye'nin toplam petrol talebi ve ulaştırma sektörü petrol talebinin Arima Modeli ile tahmin edilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 18*(3), 131-142.
9. Melikoglu, M. (2014). Demand forecast for road transportation fuels including gasoline, diesel, LPG, bioethanol and biodiesel for Turkey between 2013 and 2023. *Renewable Energy, 64*, 164-171.
10. Sahraei, M.A., Duman, H., Codur, M.Y. & Eyduran, E. (2021). Prediction of transportation energy demand: multivariate adaptive regression splines. *Energy, 224*, 120090.

11. Ağbulut, Ü. (2022). Forecasting of transportation-related energy demand and CO2 emissions in Turkey with different machine learning algorithms. *Sustainable Production Consumption, 29*, 141-157.
12. Hoxha, J., Codur, M.Y., Mustafaraj, E., Kanj, H. & El Masri, A. (2023). Prediction of transportation energy demand in Türkiye using stacking ensemble models: Methodology and comparative analysis. *Applied Energy, 350*, 121765.
13. Kayacı Çodur, M. (2024). Ensemble machine learning approaches for prediction of Türkiye's energy *Demand. Energies, 17*(1), 74.
14. Bakanlığı, T.C.T. (2026). TAREKS gümrük tarife istatistik pozisyonu (GTİP) sorgulama ekranı. https://uygulama.gtb.gov.tr/Tara/, Erişim tarihi: 15.05.2026.
15. Centre-ITC, U.T.M.-I.T. (2026), Trade Map - International Trade Statistics. https://www.trademap.org/, Erişim tarihi: 05.04.2026.
16. Makoni, T. & Chikobvu, D. (2023). Assessing and forecasting the long-term impact of the global financial crisis on manufacturing sales in South Africa. *Economies, 11*(6), 158.
17. Nwokike, C.C. & Okereke, E.W. (2021). Comparison of the performance of the SANN, SARIMA and ARIMA models for forecasting quarterly GDP of Nigeria. *Asian Research Journal of Mathematics, 17*(3), 1-20.
18. Hanke, J.E. & Wichern, D.W. (2009). *Business forecasting.* Pearson Education, Last Page.
19. Makoni, T. & Chikobvu, D.J.E. (2023). Assessing and forecasting the long-term impact of the global financial crisis on manufacturing sales in South Africa. *Economies, 11*(6), 158.
20. Dritsakis, N. & Klazoglou, P. (2018). Forecasting unemployment rates in USA using Box-Jenkins methodology. *International Journal of Economics Financial Issues 8*(1), 9.
21. Chand, S. & Kamal, S. (2014). Mixed portmanteau test for diagnostic checking of time series models. *Journal of Applied Mathematics, 2014*(1), 545413.
22. Kibona, S.E. & Mbago, M.C. (2018). Forecasting wholesale prices of maize in Tanzania using Arima Model. *General Letters in Mathematics, 4*(3), 131-141.
23. Ünal, Y.Z., Al-Turki, U.M., Zaim, S., Demirel, Ö.F. & Görener, R. (2015). Developing spreadsheet models of Holt-Winter methods and solving with Microsoft Excel solver and differential evaluation technique: An application to tourism sector. In *2015 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM)*, IEEE, 1-8.
24. Eltaeib, T. & Mahmood, A. (2018). Differential evolution: A survey and analysis. *Applied Sciences, 8*(10), 1945.
25. Zhang, G.P. (2003). Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model. *Neurocomputing, 50*, 159-175.
26. Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning, 45*(1), 5-32.
27. Akça, Ş. & Şanlı, F.B. (2022). Kıyı çizgisinin makine öğrenmesi tabanlı mean-shift, rastgele orman ve destek vektör makinaları ile belirlenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37*(3), 835-842.
28. Ran, X., Shan, Z., Fang, Y. & Lin, C. (2019). An LSTM-based method with attention mechanism for travel time prediction. *Sensors, 19*(4), 861.
29. Oshiro, T.M., Perez, P.S. & Baranauskas, J.A. (2012). How many trees in a random forest?, In *International Workshop on Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition*, Springer, 154-168.
30. Probst, P., Wright, M.N. & Boulesteix, A.L. (2019). Hyperparameters and tuning strategies for random forest. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining Knowledge Discovery, 9*(3), e1301.
31. Aree, S. & Tooprakai, S. (2025). Maintenance decision modeling for solar photovoltaic performance prediction using RMSE and MAPE methods. In *2025 International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers, and Communications (ITC-CSCC)*, IEEE, 1-6.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

Identifying the Causes of Employee Turnover in Manufacturing: A DEMATEL-Based Analysis and Improvement Framework

Serap AKCAN YETGİN [1,a], **Özgür ZATERİ** [1,b]

[1]*Tarsus University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Mersin, Türkiye*

[a]***ORCID***: *0000-0003-2621-9142;* [b]***ORCID***: *0009-0002-4272-5299*

Article Info

Received : 04.04.2026
Accepted : 16.07.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1904473

Corresponding Author

Serap AKCAN YETGİN
serapakcan@tarsus.edu.tr

Keywords

H*uman resource management*
E*mployee turnover*
J*ob resignation*
D*EMATEL*
W*orkforce retention*

How to cite: *AKCAN YETGİN, S., ZATERİ, Ö., (2026). Identifying the Causes of Employee Turnover in Manufacturing: A DEMATEL-Based Analysis and Improvement Framework. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 563-577.*

ABSTRACT

Employee turnover intentions and behaviors significantly influence both the psychological and also economic performance of organizations. Identifying the underlying reasons behind employees' decisions to resign is therefore essential for sustaining workforce stability. This study aims to explore the key factors influencing blue-collar employees—particularly skilled and experienced workers—in their intention to leave their jobs within the manufacturing sector. Using the Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL) method, the causal relationships and relative dominance among 24 turnover criteria were analyzed to identify the most influential factors. The findings indicate that inadequate wages, unfair management, unbalanced workload distribution, poor communication with supervisors, and lack of a sense of belonging are the most critical drivers of turnover. Based on these insights, targeted improvement strategies are proposed to strengthen employee retention and loyalty in manufacturing organizations.

Üretim Sektöründe İşgücü Devrinin Nedenlerinin Belirlenmesi: DEMATEL Tabanlı Bir Analiz ve İyileştirme Çerçevesi

Makale Bilgileri

Geliş : 04.04.2026
Kabul : 16.07.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1904473

Sorumlu Yazar

Serap AKCAN YETGİN
serapakcan@tarsus.edu.tr

Anahtar Kelimeler

İ*nsan kaynakları yönetimi*
İ*şgücü devri*
İ*şten ayrılma*
D*EMATEL*
İ*şgücü bağlılığı*

Atıf şekli: *AKCAN YETGİN, S., ZATERİ, Ö., (2026). Üretim Sektöründe İşgücü Devrinin Nedenlerinin Belirlenmesi: DEMATEL Tabanlı Bir Analiz ve İyileştirme Çerçevesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 563-577.*

ÖZ

Çalışanların işten ayrılma niyetleri ve davranışları, kuruluşların hem psikolojik hem de ekonomik performansını önemli ölçüde etkiler. Bu nedenle, çalışanların istifa kararlarının altında yatan nedenleri belirlemek, işgücü istikrarını sürdürmek için çok önemlidir. Bu çalışma, imalat sektöründeki mavi yakalı çalışanların -özellikle vasıflı ve deneyimli işçilerin- işlerinden ayrılma niyetlerini etkileyen temel faktörleri araştırmayı amaçlamaktadır. DEMATEL yöntemi kullanılarak, 24 işten ayrılma kriteri arasındaki nedensel ilişkiler ve göreceli baskınlık analiz edilerek en etkili faktörler belirlenmiştir. Bulgular; yetersiz ücretler, adil olmayan yönetim, dengesiz iş yükü dağılımı, yöneticilerle zayıf iletişim ve aidiyet duygusunun eksikliğinin işten ayrılmanın en kritik nedenleri olduğunu göstermektedir. Bu bulgulara dayanarak, imalat kuruluşlarında çalışanların bağlılığını ve sadakatini güçlendirmek için iyileştirme stratejileri önerilmiştir.

1. INTRODUCTION

The human resources (HR) department plays a pivotal role in shaping the reputation and sustainability of organizations. Beyond recruitment, HR professionals contribute to defining company vision and mission, managing compensation systems, facilitating training and promotion processes, and ensuring employee well-being [1,2]. HR departments also play a central role in managing both hiring and termination processes, which together determine the overall workforce equilibrium of an organization [3].

Retaining skilled employees is one of the most persistent challenges in organizational management. Previous research highlights that turnover intentions are influenced by numerous factors, including job satisfaction, management style, communication quality, compensation structure, and workplace ergonomics. These determinants vary not only by sector but also by individual employee characteristics. Employees may decide to leave due to diverse motivations—ranging from inadequate pay and excessive workload to lack of recognition or poor managerial relations. Managing these factors effectively contributes to overall organizational harmony and productivity. Enhanced job satisfaction, in turn, increases employees' emotional commitment and reduces turnover intentions. Accordingly, this study focuses on understanding the turnover dynamics among experienced and skilled blue-collar workers in the manufacturing industry. Using the DEMATEL method, the study investigates the interrelationships and dominance levels among turnover criteria to determine the most influential causes. The research further proposes improvement strategies for high-value employees and enhance organizational performance. The research further proposes improvement strategies for high-value employees and enhance organizational performance.

Table 1. Previous studies on job leaves

Authors	Method	Authors	Method
Jantan, Hamdan, Othman [7]	Data mining	PérezCampdesuñer et al. [18]	Neural Network
Alao, Adeyemo [8]	Forecasting	Bhuva, Srivastava [19]	Forecasting, data mining
Park, Shaw [9]	Meta-analysis	Stamolampros et al. [20]	Logistic regression
Katsieka, Theodosiou, Morgan [10]	Nomological Network	Michael et al. [21]	Factor analysis
Bellon [11]	Logistic regression	Khalid et al. [22]	Factor analysis
Punnoose, Ajit [12]	Forecasting	Eka et al. [23]	Regression analysis
Presbitero, Roxas, Chadee [13]	structural equation Modeling	Bolt, Winterton, and Cafferkey [24]	Literature review
Javhav [14]	Questionnaire	Khahan et al. [25]	Regression analysis
Rubenstein, Eberly, Lee, Mitchell [15]	Meta-analysis	Rizki, Siti, Arif [26]	Smart-Pls analysis
Sabbagha et al. [16]	Structural equation modeling	Sharmila, Asokan, Rajermani, Kumarashvari [27]	Empirical tests
Aliyu, Nyadzayo [17]	Structural equation modeling	Wong, Wong, Sudhakar [28]	Meta analysis

Understanding the causes of employee turnover is essential for both organizations and individuals. Senior management often views turnover analysis as an opportunity to identify underlying issues and to implement preventive measures that can minimize unwanted resignations [4]. Furthermore, addressing the factors that drive employees to leave is a prerequisite for ensuring workforce continuity [5]. Employee demographics—such as age, marital status, education level, and occupational background—are among the most commonly cited determinants of turnover [6]. In addition to demographic characteristics, workload intensity and job stress have been shown to influence employees' intentions to resign. The relationship is generally proportional: as the workload increases, so does the likelihood of turnover. A large body of research has explored turnover behavior using various quantitative and qualitative methodologies. Recent studies are summarized in Table 1, demonstrating the diversity of analytical approaches employed in the field. However, despite extensive research, few studies have combined multi-criteria decision-making (MCDM) techniques with practical improvement proposals. This study addresses that gap by applying the

DEMATEL method to identify causal relationships among turnover criteria in a manufacturing setting. The remainder of this paper is structured as follows: Section 2 details the research methodology; Section 3 presents the empirical application and findings; Section 4 discusses improvement suggestions; and Section 5 concludes with managerial implications and recommendations for future research.

2. METHOD

This study investigates the reasons behind employee turnover within a large-scale manufacturing company. The analysis was conducted in three main stages: (1) Investigation, (2) Analysis, and (3) Improvement.

2.1. Investigation Phase

In the problem identification stage, a *fishbone diagram*—also known as the Ishikawa Diagram —was used to systematically identify potential causes of employee turnover. Originally developed by Professor Kaoru Ishikawa in 1943, this tool helps visualize causal relationships within a process and is widely adopted in quality management [29].

The procedure followed six key steps:

1. Defining the problem collaboratively with experts and managers.
2. Conducting brainstorming sessions to determine main branches of causes.
3. Identifying and labeling sub-causes on each branch of the diagram.
4. Applying the 5W1H framework (*What, Where, When, Why, How, Who*) to refine causal relationships.
5. Reviewing the diagram with expert feedback.
6. Finalizing the diagram after achieving consensus.

2.2. Analysis Phase

After identifying the root causes of turnover using a fishbone analysis, it is necessary to analyze the turnovers. In this study, the DEMATEL method, a multi-criteria decision-making method, was used to examine the weightings of the reasons for turnover and to find the reason with the most significant turnover weight. The DEMATEL method, which allows for graphical data generation, allows for problem planning and solution by making the root cause more meaningful. This method is known as a successful method for determining the interaction between alternatives [30]. The steps followed in the DEMATEL method are listed as follows [31].

Step 1 - Calculating the Direct Relationship Matrix

The values in the direct relationship matrix indicate the direct relationship of variable i on variable j. The degree of comparison is determined as 0: No Effect, 1: Low Effect, 2: Medium Effect, 3: High Effect, and 4: Very High Effect.

$$D = \begin{bmatrix} 0 & d_{1n} \\ d_{n1} & 0 \end{bmatrix} \tag{1}$$

Step 2 - Normalized Matrix Calculation

In this step, normalization is performed by dividing all values in the direct relationship matrix created in the previous step by the largest value in the row and column totals. The smallest value in the row and column is determined, with the diagonal values set to zero, and the following formulas are applied.

$$x = \frac{D}{S} \tag{2}$$

$$S = max\left(\sum_{i=1}^{n} x_{ij}\,,\ \sum_{j=1}^{1} x_{ij}\right) \tag{3}$$

Step 3 - Total Correlation Matrix

In this step, the normalized matrix from the previous step is converted into a total correlation matrix using the following formula. The normalized direct correlation matrix is subtracted from the identity matrix. The inverse of the subtracted matrix is then taken. The subtracted and inversed matrix is multiplied by itself to form the total correlation matrix.

$$T = x + x^2 + \cdots + x^n = x(1-x)^{-1} \quad (4)$$

Step 4 - Determining the Cause-and-Effect Criteria

In this step, the sum of the rows and columns of the matrix from the previous step is determined. A new matrix is created by performing calculations according to the formulas below. After these values are calculated, they are added, and the subtracted value is found. This will create two groups. These groups represent the interaction between the criteria. These are the determination of the cause criteria and the determination of the effect criteria. The values formed by summing are ranked. The highest value indicates a greater correlation with the other criteria, while the lowest value indicates a lesser correlation with the other criteria. In the subtracted values, the variable with a positive result is in the cause group, and the variable with a negative result is in the effect group.

$$S = [Sij]' \; i, j \in (1,2,3, \dots, n) \quad (5)$$

$$D = \sum_{j=1}^{n} S_{ij} \qquad R = \sum_{j=1}^{n} S_{ij} \quad (6)$$

Step 5 - Impact Diagram Map

The impact diagram is drawn using a threshold value determined by the sum and subtraction calculated from the total impact matrix. The impact diagram includes criteria created by adding the horizontal portion of the coordinate plane and criteria created by subtracting the vertical portion. The threshold value is determined by experts or taken as an average. This step is critical for achieving an effective analysis. To ensure accurate and accurate analysis, the graph will be created and interpreted by examining the D+R and D-R values.

2.3. Improvement Phase

In the final phase, solution proposals were developed based on the cause–effect relationships identified in the DEMATEL analysis. The improvement strategies targeted the top five causes of turnover—specifically inadequate wages, unfair management, unbalanced workload, poor managerial communication, and lack of belonging—by introducing measurable, fair, and transparent corrective actions.

3. APPLICATION AND FINDINGS

3.1. Problem Definition

The empirical analysis was conducted within a large-scale industrial enterprise engaged in the production of cardboard, paper, boxes, and related products, operating across seven sub-factories with approximately 3,000 employees. The research primarily focused on identifying the underlying factors influencing the turnover of *highly productive and skilled personnel*—a group that provides substantial added value to the company. The purpose, in this study, was to reduce voluntary turnover, retain experienced employees, and improve organizational efficiency in a competitive manufacturing environment. A sample of 75 employees who resigned from the company was selected, representing various operational departments. Analysis of the demographic characteristics of this sample (such as age, education level, and years of experience) revealed that approximately 50% of the employees were graduates of vocational high schools and approximately 30% had 5-10 years of work experience.

3.2. Importance of the Study

Certain costs of leaving a job can be incurred by businesses. These costs can be categorized into two categories: direct and indirect costs. Actions such as searching for suitable personnel for an existing position and providing training to ensure they attain the necessary competencies are defined as direct costs. The resulting loss of motivation from the distrust that results from the departure of an employee's teammates is defined as an indirect cost.

If businesses hire less qualified personnel to replace experienced employees who are prone to leaving their jobs, obtaining the necessary training to improve their skills will require both time and expense. This time will also incur costs. When businesses lose qualified personnel, they also lose their market advantage. In a sustainable competitive market, a qualified workforce dominates the market. However, a negative impact on competitiveness will create serious problems for the business [32]. The impression a company leaves on a departing employee is also crucial. A departing employee's negative comments about the company will also impact their immediate and distant surroundings. This negative interaction will affect existing employees within the company. These negative thoughts will even influence the perspectives of new hires [33]. These factors can also disrupt peace within the company and reduce motivation. These declines will lead to inefficiency [34]. Leaving a job can also lead to disappointment. Trying to fill vacant positions with existing employees can also lead to disappointment. Increased workload among employees and failure to meet demand can lead to frustration. In the case of external recruitment, the new employee's adjustment to the job and the progression of the orientation process can lead to uncertainties. These uncertainties can also affect the level of harmony between the new employee, the company, and team members. All of these processes can negatively impact intra-team/inter-team communication and workplace behavior, disrupting harmony within the company. These processes affect suppliers and customers externally, as well as within the company. A negative impact negatively impacts supplier and customer satisfaction. In this way, businesses can experience fluctuations in their market power. This study is considered crucial for eliminating all the negative impacts mentioned.

3.3. Methodology of the Study

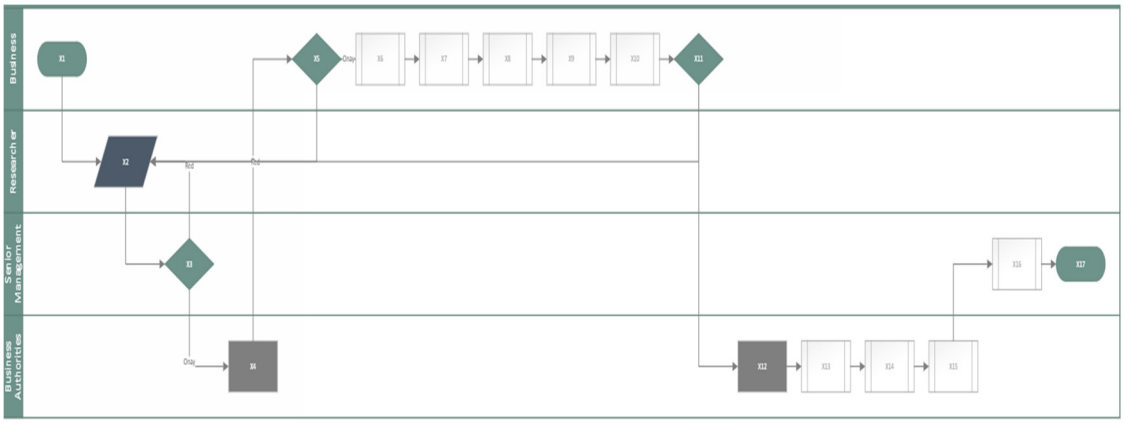


Figure 1. Flow chart of the study

Turnovers are complex patterns. To make this complex structure more understandable, it is necessary to work cyclically. To better understand this complex structure, the flowchart of the study is shown in Figure 1. Examining Figure 1, it was created as the first step, as the problem would be identified within the company. After determining that the core problem was turnover, research was conducted on the solution steps. While creating this diagram, the literature review was kept constantly updated, and each step was reconnected to the literature. As new ideas emerged, the literature was enriched, completing the fishbone diagram. To select the method to be applied as the solution step, a new literature search was conducted. The most appropriate analysis to resolve the complex structure was selected and implemented. Before initiating the improvement work, the literature search was revisited, and the most appropriate improvement work was carried out. Table 2 provides explanations of the codes used in the flowchart.

Table 2. Flowchart terms

Identifying the problem	X1	Mapping the influence diagram	X10
Conducting a literature review	X2	Creating weight rankings	X11
Election of officials to participate in fishbone	X3	Improvement work	X12
Creating the fishbone	X4	Grouping of positions in the business	X13
DEMATEL application	X5	Creating the improvement table	X14
Direct relationship matrix calculation	X6	Determination of improvement calculation criteria	X15
Normalized matrix calculation	X7	Making evaluations	X16
Total relationship matrix	X8	Application to business	X17
Determination the cause-effect criteria	X9		

3.4. Fishbone Method

In the first phase of the implementation, the Fishbone method was used to identify numerous possible reasons for leaving. A brainstorming session with experienced individuals resulted in the formation of ideas about the reasons for leaving. The main arrow of the fishbone diagram is defined as the analysis of the departures. The fishbone diagram was created to capture all possible reasons for leaving (Figure 2).

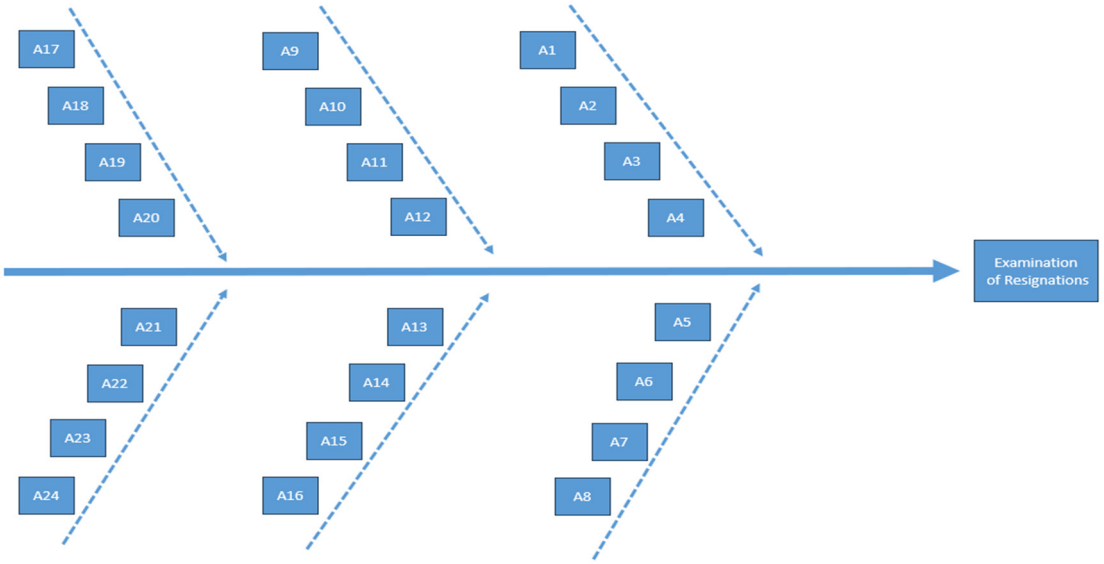


Figure 2. Fishbone diagram for job terminations

Table 3. Fishbone diagram codes

Inadequate wages	A1	Workload	A13
Inadequacy of benefits	A2	Lack of appreciation	A14
Inadequate working hours	A3	Career Opportunities	A15
Non-ergonomic working conditions	A4	Unauthorized Responsibility for the Work Performed	A16
Lack of interdepartmental collaboration	A5	Inadequate Educational Opportunities	A17
Intra-departmental collaboration	A6	Employees at the company are motivated by revenge	A18
Lack of balanced work distribution	A7	Inadequate grievance policy	A19
Unfair management	A8	Insufficient sense of belonging	A20
Contact the administrator	A9	Not allowed to work elsewhere at the company	A21
Failure to set correct goals	A10	Desires to start their own business	A22
Performance evaluation system	A11	Military service, desires to date EYT (people who cannot retire because they do not meet the age requirement)	A23
Bonus system	A12	Resignation due to marriage	A24

A 20-person team consisting of human resources managers, production managers, factory managers, some members of the executive committee, some members of the board of directors, and some employees who were able to gather field observations developed the fishbone diagram. The fishbone representation of job departures is coded. These coding are presented in Table 3. The reasons for these departures are those encountered or likely to be encountered by company officials.

3.5. DEMATEL Method

The first step in applying the DEMATEL method, the direct relationship matrix, was created by considering the arithmetic mean of the data obtained from 75 employees who were planning or inclined to leave their jobs (Figure 3). The DEMATEL analysis was conducted by constructing the direct-relation matrix, normalized direct-relation matrix, and total relation matrix based on expert evaluations. Subsequently, the prominence (D+R) and relation (D−R) values of each criterion were calculated to determine their relative importance and cause–effect relationships. The results revealed that Insufficient Wages was the most influential turnover factor, followed by Unfair Management, Lack of Balanced Work Distribution, Communication with the Manager, and Insufficient Sense of Belonging. These five criteria exhibited the highest priority among all evaluated factors and were therefore identified as the primary drivers of employee turnover. Furthermore, the cause–effect analysis and impact map (Figure 4) demonstrated that turnover factors are interrelated rather than independent, highlighting the necessity of addressing the most influential factors first. Accordingly, the improvement strategies proposed in this study were developed by prioritizing these critical factors to achieve the greatest reduction in employee turnover.

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21	A22	A23	A24	Row Total
A1	0,000	2,273	2,364	2,455	2,364	2,636	2,455	3,091	2,636	2,727	2,545	2,364	2,909	2,182	2,636	2,455	2,545	2,545	2,091	2,364	2,364	2,636	2,273	2,273	57,182
A2	2,909	0,000	2,455	1,909	1,727	2,091	2,182	2,727	2,818	2,636	2,455	2,455	2,909	2,727	2,455	2,455	2,455	2,364	2,545	2,455	2,273	1,818	1,909	1,818	54,545
A3	2,818	2,545	0,000	2,636	3,000	2,818	2,727	2,727	2,727	2,909	2,455	2,364	2,727	2,455	2,545	2,364	2,273	1,818	2,364	2,273	2,273	2,000	2,000	1,727	56,545
A4	2,636	2,455	3,000	0,000	2,273	2,364	2,545	2,364	2,545	3,091	2,727	2,727	2,636	2,636	2,636	2,818	2,182	2,182	2,727	2,455	2,364	1,909	1,727	1,727	56,727
A5	2,000	2,091	2,364	2,364	0,000	2,818	2,364	2,364	2,818	2,182	2,727	2,545	2,000	2,182	2,455	2,182	2,273	2,364	2,182	2,545	2,091	2,182	2,273	2,000	53,364
A6	1,909	1,818	1,818	2,000	2,727	0,000	2,364	2,182	2,636	2,455	3,000	2,636	2,182	1,909	2,455	2,364	2,091	2,091	1,818	1,818	2,000	1,636	1,636	1,818	49,364
A7	2,455	2,545	2,455	2,545	2,727	2,636	0,000	2,818	2,455	2,545	2,000	1,909	2,273	2,636	2,455	2,455	2,727	2,727	2,182	2,636	2,182	2,455	2,273	2,091	56,182
A8	2,818	2,636	2,545	2,455	2,364	2,273	2,455	0,000	2,455	2,636	2,091	2,000	2,636	2,818	2,455	2,636	2,545	2,636	2,636	2,455	2,455	2,455	2,273	2,364	57,091
A9	2,636	2,455	2,455	2,818	2,818	2,818	2,545	2,364	0,000	2,182	2,636	2,182	2,273	2,091	2,545	2,364	1,909	2,000	2,000	2,000	1,727	2,000	2,000	1,818	52,636
A10	2,636	2,636	2,091	2,364	2,091	2,273	2,455	2,636	2,455	0,000	2,545	2,000	2,364	2,455	2,364	2,545	2,364	2,636	2,182	2,636	1,909	1,909	1,909	2,000	53,455
A11	2,364	2,182	2,182	2,182	2,818	2,909	2,273	2,182	3,000	2,091	0,000	2,909	2,545	2,273	2,636	2,364	2,182	2,091	2,273	2,182	2,091	2,000	1,727	1,636	53,091
A12	2,273	2,182	2,091	2,182	2,818	2,909	2,182	2,273	2,727	2,182	2,727	0,000	2,545	2,364	2,727	2,273	2,273	2,545	2,182	2,455	2,091	1,909	1,818	1,455	53,182
A13	2,273	2,182	2,273	2,091	2,364	2,455	2,636	2,182	2,455	2,364	2,273	2,364	0,000	2,455	2,818	2,455	2,091	1,909	2,182	2,455	2,364	2,000	1,818	1,909	52,364
A14	2,818	2,727	2,455	2,545	2,364	2,636	2,636	2,636	2,455	2,364	2,273	2,091	2,455	0,000	2,182	2,364	2,091	2,182	2,455	2,636	2,545	2,182	2,091	2,000	55,182
A15	2,182	2,182	2,182	2,364	3,091	3,091	2,364	2,364	3,364	2,273	3,000	2,818	2,545	2,273	0,000	2,273	2,273	2,273	2,091	2,182	2,091	2,273	1,909	1,727	55,182
A16	2,545	2,545	2,455	2,364	2,455	2,364	2,364	2,636	2,909	2,364	2,455	2,545	2,818	2,273	2,545	0,000	2,273	2,182	2,182	2,455	2,182	1,909	1,909	1,909	54,636
A17	2,818	2,727	2,455	2,545	2,455	2,364	2,545	2,545	2,636	2,636	2,455	2,273	2,455	2,636	2,091	2,364	0,000	2,182	2,455	2,455	2,273	2,545	2,364	2,364	56,636
A18	2,909	3,000	2,727	2,727	2,273	2,364	2,636	2,364	2,455	2,455	2,727	2,455	2,818	2,727	2,182	2,636	2,727	0,000	2,273	2,455	2,000	2,091	2,000	2,000	57,000
A19	2,818	2,818	2,636	2,545	2,273	2,364	2,727	2,909	2,545	2,727	2,364	2,182	2,455	2,727	2,273	2,636	2,545	2,455	0,000	2,455	2,091	2,455	2,364	2,364	57,727
A20	2,909	2,727	2,636	2,636	2,364	2,455	2,818	2,455	2,455	2,727	2,455	2,455	2,727	2,909	2,545	2,455	2,182	2,455	2,636	0,000	2,455	2,364	2,273	2,273	58,364
A21	2,727	2,545	2,545	2,545	2,455	2,455	2,727	2,455	2,364	2,545	2,182	2,455	2,455	2,727	2,364	2,000	2,091	2,000	1,909	2,182	0,000	2,000	2,091	2,091	53,909
A22	2,818	2,545	2,455	2,455	2,273	2,455	2,727	2,636	2,455	2,909	2,455	2,273	2,727	2,818	2,364	2,364	2,364	2,364	2,455	2,364	2,545	0,000	2,000	2,000	56,818
A23	3,000	2,818	2,636	2,455	2,273	2,273	2,818	2,727	2,727	2,727	2,636	2,364	2,818	2,727	2,545	2,273	2,545	2,364	2,455	2,545	2,364	2,364	0,000	2,364	58,818
A24	3,000	2,818	2,455	2,636	2,364	2,182	2,909	2,727	2,545	2,727	2,455	2,545	2,818	2,636	2,545	2,364	2,545	2,364	2,364	2,364	2,182	2,182	2,091	0,000	57,818
TOTAL COLUMN	60,273	57,455	55,727	55,818	56,727	58,000	58,455	58,364	60,636	58,455	57,636	54,909	59,091	57,636	56,818	55,455	53,545	52,727	52,636	54,818	50,909	49,273	46,727	45,727	

Figure 3. Direct relationship matrix

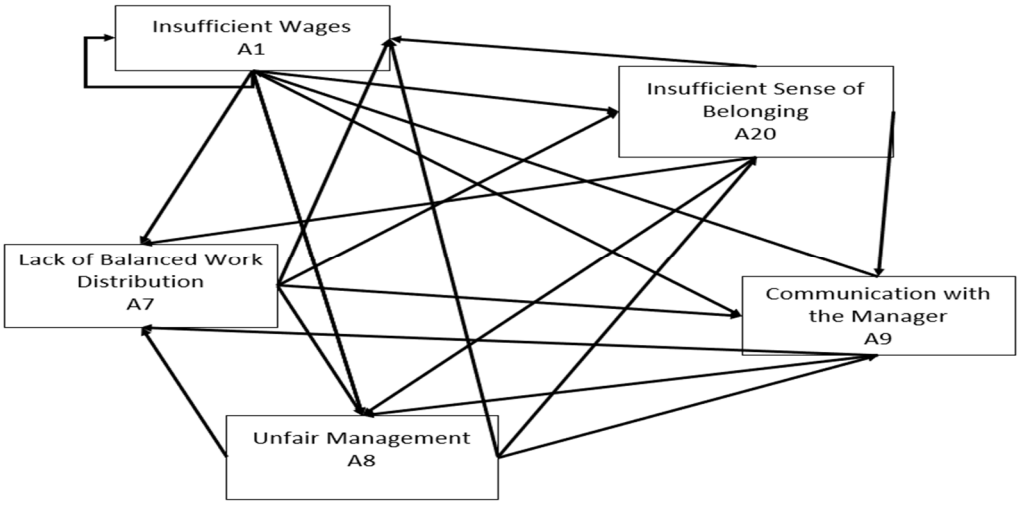


Figure 4. Mapping the influence diagram

4. IMPROVEMENT WORKS

The factors most heavily contributing to turnover were identified using the DEMATEL method and were listed as follows: inadequate pay, unfair management, unbalanced work distribution, communication with the manager, and a lack of sense of belonging. The improvement project aimed to address the first five criteria listed above. The steps of the improvement project are as follows:

Step 1: All positions within the company were individually evaluated, and a grouping system was implemented. This led to the decision to evaluate the positions in two groups. The first group comprised employees with less experience, lower qualifications, and less ability to learn and develop. The second group was determined to include employees capable of performing more critical and value-added tasks. The improvement groupings thus established are shown in Table 4.

Table 4. Improvement grouping

Position	Qualification group
Purification team leader	2
Coil cutting operator	2
Warehouse team leader	2
Electric-press operator	2
Electrical maintenance team leader	2
Forklift operator	2
Dough preparation operator	2
Scrap expert	2
Scrap field supervisor	2
Construction technician	2
Production team leader	2
Quality control team leader	2
Weighbridge reporting leader	2
Boiler team leader	2
Boiler operator	2
Control room operator	2
Drying press operator	2
Mechanical maintenance team leader	2
Pulper operator	2
Excavator operator	2
Shift supervisor	2
Purification personnel	1
Coil cutting personnel	1
Warehouse staff	1
Electrical maintenance personnel	1
Dough preparation personnel	1
Scrap personnel	1
Firefighters	1
Quality control personnel	1
Door control personnel	1
Boiler staff	1
Chemical preparation personnel	1
Drying press personnel	1
Mechanical maintenance personnel	1
Pulper staff	1
Hygiene personnel	1
Documentation staff	1
Packaging staff	1

Step 2: The goal is to create a structure based on the groups identified in the previous step. This will allow for the alignment and priorities between tasks. Positions divided into two will be integrated into different systems to identify unique tasks. Improvement gap tables have been created to identify unique tasks. Groups will be included

in an extra category for tasks performed within them. Personnel assuming the roles of Team Leader and Supervisor will be evaluated under Category E for that day.

Table 5. Improvement difference table (1st group)

Registration number	Name surname	Position	C	B	A	E	C day	B day	A day	E day	Total
			150	250	300	450					0
			150	250	300	450					0
			150	250	300	450					0
			150	250	300	450					0
			150	250	300	450					0

Table 6. Improvement difference table (2nd group)

Registration number	Name surname	Position	C	B	A	E	C day	B day	A day	E day	Total
			200	300	350	475					0
			200	300	350	475					0
			200	300	350	475					0
			200	300	350	475					0
			200	300	350	475					0

Administrator Approval

Positions designated as Group 1 and Group 2 will receive a bonus for improvement equal to the number of days they worked for value-added work in the current month. This will minimize the inadequate wages, which are the first in the weighting of terminations revealed by the DEMATEL method. Because improvement wages will be calculated based on the number of days the employee worked for value-added work under fair management and will be processed using system data on the digital platform, the compensation system is aligned with fair management. Groups 1 and 2 were determined based on the importance of the work performed. Groups were compensated within each group. In this way, compensation will be based on the importance of the work performed, ensuring a balanced work distribution (Table 5, Table 6). Step 3: It should be clearly determined which category the employees divided into groups will be included in the improvement program. Performance calculation criteria have been established to ensure the system is managed fairly. Performance calculation criteria are evaluated separately for line performance and individual performance, and then combined to form an overall assessment. This evaluation will be wage-based, aiming to minimize manual intervention in the compensation to ensure a fair structure. Therefore, employees will receive improvements based on the value-added work they perform within their group's category. The 20-person team formed to create the fishbone diagram determined the individual and line performance breakdowns, too. Table 7 was created for this purpose.

Table 7. Improvement calculation criteria

Performance Calculation Criteria		
Personal performance	**Line performance**	**Result**
A	A	**A**
A	B	**A**
A	C	**B**
B	A	**A**
B	B	**B**
B	C	**C**
C	A	**B**
C	B	**C**
C	C	**C**

The production line performance evaluation was based on eight key performance criteria determined by the company. These criteria and their corresponding weights were established according to the organization's performance assessment system. Productivity (15%), PTS Entry Rate (15%), Quality Product Rate (15%), and GMP Score (15%) were assigned the highest weights, reflecting their critical role in production efficiency and quality assurance. OEE (Overall Equipment Effectiveness) (10%), Internal Customer Complaint (10%), Number of Cards (Yellow/Red/White) (10%), and Work Accident Rate (10%) each accounted for 10% of the total

performance score. The overall line performance score was calculated by combining the weighted contributions of these eight criteria, resulting in a total performance value used for evaluating production line performance. The criteria determined in line performance are explained as follows:

- ✓ Productivity: Planned to be calculated as man-hours per ton.
- ✓ OEE: Planned to be calculated as (Net Productivity + Waste Production) / Time Set for Order Completion.
- ✓ Quality Product: Planned to be calculated as 1- (Waste / Gross Production).
- ✓ Availability: Planned to be calculated as (Actual Working Time + Capacity Loss Time) / Time Set for Order Completion.
- ✓ PTS (product and tracking system): Planned to check specifications. For example, moisture checks should be performed 10 times a day, with checks every 30 minutes.
- ✓ Internal Customer Complaints: Planned to be collected as errors identified by personnel within the line.
- ✓ Quality Product Rate: This is the rate of products that meet the specified quality standards.
- ✓ GMP (Good manufacturing practices): This will be determined as inspection outputs.
- ✓ Number of cards: A yellow card indicates near misses, a white card indicates malfunctions that can be resolved within the day, and a red card indicates tasks that the maintenance team has planned and resolved.
- ✓ The occupational accident rate is defined as the rate of workplace accidents occurring in the factory.
- ✓ Line performance: The current employee's contribution to the day, along with the contributions of other team members, will be automatically entered into the system to create a total value. Automatically capturing this value is a step toward establishing a fair system. This will ensure that all employees on that line receive the same value without discrimination. This aims to foster a sense of belonging and foster team spirit within the team. If the total value generated from the team's data is between 0 and 50, it will be rated C, between 50 and 75, B, and between 75 and 100, A.

Personal performance was evaluated using eight criteria established by the company as part of its employee performance assessment system. The criteria and their corresponding weights were determined according to the organization's internal evaluation framework. Contact with the First Manager (15%), Health Reports Received (15%), Unannounced Absence from Work (15%), and Warning/Defense/Discipline (15%) were assigned the highest weights, reflecting their significant impact on individual performance evaluation. Communication with Colleagues (10%), Unpaid Leave (10%), Compliance with Occupational Health and Safety Rules (10%), and Job Tracking (10%) each accounted for 10% of the total performance score. The overall personal performance score was calculated by combining the weighted contributions of these eight criteria and was subsequently used as one of the inputs in the analysis.

The criteria are defined in personal performance as follows:

- ✓ Communication with the Immediate Manager: This is the value that the immediate superior in the employee's hierarchy will take the initiative to communicate with the current employee.
- ✓ Communication with Colleagues: This is the value that the immediate superior in the employee's hierarchy will take the initiative to evaluate the current employee's compatibility with their field colleagues.
- ✓ Reports Received and Unpaid Leave: This is the value created today to ensure the job continuity of the current employee and enhance their sense of belonging.
- ✓ Unannounced Absence from Work: This is the value developed to increase the awareness of responsibility of the current employee and to enhance job continuity.
- ✓ Warning/Defense/Discipline: This is the value created today to ensure that the current employee works in compliance with the company's rules and regulations with other employees and their managers.
- ✓ Occupational Health and Safety Rules: This is the value created to ensure that the current employee complies with the occupational health and safety rules within the workplace.
- ✓ Work Tracking: This value is created to ensure that current employees keep track of their assigned daily tasks and work to be done.
- ✓ Reports Received, Unpaid Leave Rate, Unannounced Absence, Warning/Defense/Discipline, Occupational Health and Safety Rules, and Work Tracking will be automatically entered into the system. This data will be specific to the employee and will be automatically retrieved from the system. In the Communication with the Immediate Manager and Communication with Colleagues categories, the immediate manager will take the initiative to assign a value between 1 and 100. The system will convert the given value into a percentage. The purpose of creating these values is to foster a sense of belonging among employees, managers, and the company. The total of the values will be included in the calculation.

The sum of the total values will result in a personal performance score. This total value will be categorized as C if it falls between 0 and 50, B if it falls between 50 and 75, and A if it falls between 75 and 100.

This improvement initiative will reduce the turnover of high-value-added employees. This method was developed by combining inadequate pay, the most significant reason for turnover, with other sub-categories. Each month, employees will receive their improvement pay in the category based on the criteria they worked on each day. In determining this improvement pay, the calculation criteria based on line performance and individual performance were developed, taking into account management's fairness. Thus, if production volume, in other words, the line's performance, is high, employees on that line will be fairly graded. Because a large portion of the data will be automatically extracted from the system, employees with similar jobs and similar qualifications will receive improvement fairly, without manual intervention. High improvement rates will put employees ahead in future promotions. In the adjustment made to the balanced job distribution process, employees were grouped according to the difficulty of their tasks. The compensation structures of this grouping system, designated as Group 1 and Group 2, are also different. Employees will be assigned to the group based on their workload and will receive a recovery allowance based on their workload. To strengthen communication with management, a personal performance assessment process has been incorporated. This creates a framework that prioritizes not only line performance but also individual performance when determining performance criteria. It is planned that employee appointments will be made based on the tangible value of qualified work days in the recovery allowance. This will increase employee recognition and foster a sense of belonging. Suggestions for other reasons for leaving the job are provided, as shown in Table 8.

Table 8. Improvement suggestions

Reasons for leaving a job	**Suggestions**
Inadequate wages	Improvement work has been undertaken. The work is planned to be fee-based.
Unfair management	Improvement work has been carried out. Improvement data should be in a digital environment, and manual intervention is planned to be minimal.
Lack of balanced work distribution	Improvement efforts have been implemented. Categories have been created based on the difficulty of the work area and groupings have been made based on the distribution of work performed. The goal is to measure employees performing similar tasks digitally and at the same level.
Contact the administrator	Improvement efforts have been undertaken. A value has been added to individual performance to measure managers and teammates. This will strengthen communication.
Insufficient sense of belonging	Improvement work has been undertaken. While personal performance criteria were being established, the goal was to develop a sense of belonging.
Lack of appreciation	It is suggested that assignments and task updates should be planned based on the 6-month – 1-year – 2-year study data of the improvement work results.
Non-ergonomic working conditions	It is recommended that a detailed analysis be made of the air conditioning of the work areas.
Inadequate working hours	It is suggested that work that exceeds working hours should be eliminated as a necessity, and should be composed of volunteers, and have the same amount of work as the number of volunteers.
Failure to set correct goals	It was suggested that the target values be lowered and set at achievable levels. This way, staff would experience the satisfaction of achieving the goal and would work with greater determination in the next goal-setting period.
Career opportunities	It has been suggested that staff be allowed to change units or transfer from one department to another of their choice.
Inadequacy of benefits	Administrative leave of 6 days for the death of a parent or sibling has been recommended. 5 days of companion leave have been recommended for first-degree hospitalizations. Administrative leave of 2 days for electricity, water, natural gas, and transportation has been recommended for personnel moving houses who update their residence permits.
Workload	The number of personnel should be increased, and unit hour calculations should be updated.
Performance evaluation system	Performance evaluation criteria should be updated.
Inadequate complaint policy	An online complaint platform should be created so that staff can easily submit their complaints anonymously.
Collaboration between departments	To increase collaboration between departments, common goals should be established. It is recommended that departments collaborate with each other on the same goal.
Inadequate educational opportunities	Training programs should be defined for personnel based on training periods. These training programs should be aimed at staff development.

Table 8. *Continued*

Reasons for leaving a job	Suggestions
Unauthorized responsibility for the work performed	It has been suggested that responsible positions should be responsible for the task given.
Employees in the business purpose revenge	Common areas within the business should be determined, and social activities should be planned.
Bonus system	It is proposed to regulate the bonus system.
Intra-departmental collaboration	It was suggested that common goals be determined within the department.

5. DISCUSSION

The findings of this study are largely consistent with the existing literature on employee turnover, particularly in labor-intensive manufacturing environments. According to the DEMATEL analysis, inadequate wages emerged as the most influential factor affecting turnover intentions among blue-collar employees. This finding supports the arguments presented by Clark [35], who emphasized that compensation structures constitute one of the major determinants of employee resignation behavior. Similarly, Bellon [11] highlighted that the salary offered during the recruitment process has a significant influence on future turnover decisions, arguing that accurate wage determination at the hiring stage can reduce employee resignation rates. The present study confirms these conclusions by demonstrating that wage dissatisfaction remains the dominant driver of turnover among experienced manufacturing workers. Furthermore, unfair management practices were identified as another critical factor influencing employee turnover. This result is consistent with the findings of Burgess et al. [36], who argued that fairness in managerial practices and employee relations significantly affects workforce stability. Similarly, Böckerman et al. [37], through a probit model analysis, emphasized the importance of perceived managerial justice in reducing turnover tendencies. Yang et al. [38] also associated unfair management practices with career dissatisfaction and employee resignation behavior, while Katsieka et al. [10] incorporated fair management structures into a nomological network model explaining turnover intentions. These studies support the present research findings, which indicate that employees are highly sensitive to fairness, transparency, and equal treatment within organizational processes. Another important finding of the study is the strong effect of unbalanced workload distribution, poor communication with supervisors, and insufficient sense of belonging on turnover intentions. Khalid et al. [22] emphasized that balanced workload distribution positively affects job satisfaction and reduces turnover intentions, while Eka et al. [23] demonstrated through regression analysis that workload balance significantly influences employee satisfaction in SMEs. In manufacturing organizations, employees exposed to excessive or unfair workloads may perceive organizational inequality, which eventually increases resignation tendencies. In addition, communication with supervisors was identified as a significant turnover determinant in this study. Delfgaauw [39] stated that employees seek continuous managerial communication beginning from the recruitment process and that weak communication negatively affects organizational attachment. Likewise, Alao and Adeyemo [8] included communication capability among the critical decision rules affecting turnover prediction, while Sharmila et al. [27] confirmed the importance of manager–employee communication in the garment industry. Finally, insufficient sense of belonging emerged as another influential factor contributing to turnover behavior. Presbitero et al. [13] demonstrated through structural equation modeling that employees who share similar organizational values exhibit lower turnover intentions. Fletcher et al. [40] further emphasized that emotional conditions and burnout directly affect turnover behavior and suggested that strengthening employees' sense of belonging can improve workforce retention. In this context, the present study contributes to the literature by not only identifying the causal relationships among turnover factors through the DEMATEL method but also proposing practical improvement strategies focused on fair compensation, balanced workload distribution, managerial communication, and organizational belonging in manufacturing.

6. CONCLUSIONS

This study investigated the reasons behind employee turnover among blue-collar workers in a large-scale manufacturing company by employing the DEMATEL method. Unlike conventional turnover studies that primarily focus on descriptive or correlational relationships, this research revealed the causal structure and interaction intensity among 24 different turnover criteria. The analysis demonstrated that employee turnover is not driven by a single factor, rather, it emerges from the combined influence of organizational, managerial, and

individual conditions. The DEMATEL findings showed that inadequate wages constitute the most influential determinant of turnover, followed respectively by unfair management practices, unbalanced workload distribution, ineffective communication with supervisors, and a weak sense of belonging.

Based on these findings, the study proposed a set of practical improvement strategies. First, wage structures should be reviewed according to job difficulty, skill level, and market conditions in order to establish a fair and transparent compensation system. Second, management practices should be redesigned to increase justice, participation, and communication between supervisors and employees. Third, workload distribution should be balanced through systematic job analysis and staffing adjustments. Finally, organizational commitment should be strengthened by improving recognition systems, creating clearer career paths, and enhancing employees' sense of belonging through participative and supportive workplace practices. From a theoretical perspective, the study contributes to the employee turnover literature by demonstrating the applicability of DEMATEL in identifying the causal relationships among turnover factors in the manufacturing sector. From a managerial perspective, the findings provide a decision-support framework for practitioners seeking to reduce turnover among skilled and experienced employees.

Despite these contributions, the study has certain limitations. Since this study was conducted in a single manufacturing company with a sample of 75 former employees, the findings may have limited generalizability. Future studies are encouraged to validate the proposed framework using larger samples from multiple organizations and different industrial sectors, thereby improving the external validity of the results.

The empirical application was conducted in a single manufacturing company and relied on the evaluations of 75 employees who had left the organization. Therefore, the findings may not be generalized to all sectors or organizational contexts. Future studies may expand the sample size, compare different industries, or integrate DEMATEL with other multi-criteria decision-making methods such as ANP, AHP, or TOPSIS. In addition, future research may investigate the long-term effectiveness of the proposed improvement strategies after implementation. In conclusion, reducing employee turnover in manufacturing organizations requires a proactive and systematic approach. Organizations that establish fair compensation systems, strengthen managerial practices, distribute workloads equitably, and foster a stronger sense of belonging are more likely to retain their qualified workforce and sustain their competitive advantage.

Beyond identifying the factors leading to employee turnover, the proposed approach demonstrates the potential of integrating data-driven decision-making into human resource management. By systematically evaluating employee- and production-related performance indicators together with the DEMATEL methodology, the proposed framework represents a practical example of a smart human resource management system. Such digitalized evaluation models can support organizations in identifying turnover risks, improving employee retention strategies, and making more objective HR decisions. This approach may be particularly valuable for small and medium-sized enterprises (SMEs), where effective utilization of limited human resources is critical for achieving sustainable organizational performance and competitiveness.

7. REFERENCES

1. Öz,T. & Kuvvetli, Y. (2022). A decision model for examining the impact of Industry 4.0 on the human resources departments of iron-steel production companies. *Cukurova University Journal of the Faculty of Engineering, 37*(4), 127-1142.
2. Gün, S. (2023). İşten ayrılış mülakatı uygulamalarının işletmelerin sürdürebilirliği üzerindeki etkileri. *Yalova Sosyal Bilimler Dergisi, 13*(1), 27-39.
3. McDonnell, A., Gunnigle, P., Lavelle, J. & Lamare, R. (2016). Beyond managerial talent: 'Key group' identification and differential compensation practices in multinational companies. *The International Journal of Human Resource Management, 27*(12), 1-20.
4. Perez, M. (2008). Turnover intent. *Master's thesis.* University of Zurich, Human Resource Management.
5. Cho, S., Johanson, M.M. & Guchait, P. (2009). Employees intent to leave: A comparison of determinants of intent to leave versus intent to stay. *International Journal of Hospitality Management, 28*(3), 374-381.
6. Giffen, R. (2015). Organizational culture and personality type: relationship with person-organization fit and turnover intention. *PhD thesis.* Iowa State University.
7. Jantan, H., Hamdan, A.R. & Othman, Z.A. (2011). Towards applying data mining techniques for talent management. *International Conference on Computer Engineering and Applications*, 476-481.

8. Alao, D. & Adeyemo, A.B. (2013). Analyzing employee attrition using decision tree algorithms. *Computing Information Systems Development Informatics, 4*(1), 17-28.
9. Park, T.Y. & Shaw, J.D. (2013). Turnover rates and organizational performance: A meta-analysis. *Journal of Applied Psychology, 98*(2), 268-309.
10. Katsieka, E., Theodosiou, M. & Morgan, R.E. (2015). Why people quit: Explaining employee turnover intentions among export sales managers. *International Business Review, 24*(3), 367-379.
11. Bellon, M. (2016). *The characteristics of worker flows by firm growth: empirical evidence from a matched firm-worker dataset from France.* Columbia University. https://matthieubellon.com/docs/WorkerFlowsFirmGrowth.pdf
12. Punnoose, R.O. & Ajit, P. (2016). Prediction of employee turnover in organizations using machine learning algorithms: a case for extreme gradient boosting. *International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence, 5*(9), 22-26.
13. Presbitero, A., Roxas, B. & Chadee, D. (2016). Looking beyond HRM practices in enhancing employee retention in BPOs: focus on employee–organization value fit. *The International Journal of Human Resource Management, 27*(6), 635-652.
14. Jadhav, R.M. (2017). exit interviews- a unique chance to analyze the opinions of departing employees. *Splint International Journal of Professionals, 4*(6), 40-43.
15. Rubenstein, A.L., Eberly, M.B., Lee, T.W. & Mitchell, T.R. (2017). Surveying the forest: A meta-analysis, moderator investigation, and future-oriented discussion of the antecedents of voluntary employee turnover. *Personnel Psychology, 70*(3), 567-611.
16. Sabbagha, M.D.S., Ledimo, O. & Martins, N. (2018). Predicting staff retention from employee motivation and job satisfaction. *Journal of Psychology in Africa, 28*(2), 136-140.
17. Aliyu, O.A. & Nyadzayo, M.W. (2018). Reducing employee turnover intention: a customer relationship management perspective. *Journal of Strategic Marketing, 26*(3), 241-257.
18. PérezCampdesuñer, R., DeMiguelGuzmán, M., SánchezRodríguez, A., GarcíaVidal, G. & MartínezVivar, R. (2018). Exploring neural networks in the analysis of variables that affect the employee turnover in the organization. *International Journal of Engineering Business Management, 10*, 1-11.
19. Bhuva, K. & Srivastava, K. (2018). Comparative study of the machine learning techniques for predicting the employee attrition. *International Journal of Research and Analytical Reviews, 5*(3), 568-577.
20. Stamolampros, P., Korfiatis N., Chalvatzis, K. & Buhalis, D. (2019). Job satisfaction and employee turnover determinants in high contact services: Insights from employees' online reviews. *Tourism Management, 75*, 130-147.
21. Michael, M., Ramos, H.M. & Badri, S.K.Z. (2020). Determining nonfamily employees' job satisfaction and turnover intentions: the roles of job autonomy and work passion. *Journal of Family Business Management*, 2043-6238.
22. Khalid, M.A., Ahmad, M.A. & Mohammed, A.H. (2023). Factors affecting the job satisfaction of construction engineers: evidence from Jordan. *International Journal of Construction Management, 23*(2), 319-328.
23. Eka, P., Adawiyah, W.R. & Wulandari, S.Z. (2024). Does workplace spirituality predict turnover intention in small- and medium-sized enterprises (SMEs). *Evidence-based HRM: a Global Forum for Empirical Scholarship, 12*(3), 643-665.
24. Bolt, E.E.T., Winterton, J. & Cafferkey, K. (2022). A century of labor turnover research: A systematic literature review. *International Journal of Management Reviews, 24*(4), 555-576.
25. Khahan, N. (2023). The moderating effects of positive thinking on the relationship between job stress and turnover intention. *Evidence-based HRM: a Global Forum for Empirical Scholarship, 12*(3), 531-548.
26. Rizki, F., Siti, N. & Arif, R.H. (2024). Relationships between demographic factors, job satisfaction, and intention to leave among women employees in Indonesia. *Problems and Perspectives in Management, 22*(1), 1-12.
27. Sharmila, D.R., Asokan, V., Rajermani, T. & Kumarashvari, S. (2024). Measuring the factors influencing job satisfaction in the garment industry: Bangladesh perspectives. *International Journal of Management and Sustainability, 13*(1), 104-117.
28. Wong, Y.F., Wong, C.H. & Sudhakar, M. (2024). Relationship between job satisfaction and voluntary turnover intention in the manufacturing industry for sustainable growth: A systematic review. *International Journal of Advanced and Applied Sciences, 11*(7), 192-198.

29. Kumaş, Z. ve Baykal Duru, P. (2023). Bir konfeksiyon işletmesinin dikim bölümünde istatistiksel proses kontrol tekniklerinin uygulanması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38*(1), 211-224.

30. Tzeng, C., Gwo-Hshiung, H., Chiang, C. & Li, W. (2007). Evaluating intertwined effects in e-learning programs: a novel hybrid mcdm model based on factor analysis and DEMATEL. *Expert Systems with Application, 32*, 1028-1044.

31. Kabak, M. ve Cinar, Y. (2023). *Çok kriterli karar verme yöntemleri.* Nobel Akademik Yayıncılık, 2. Baskı.

32. Yavan, O. (2017). Conceptual assessment of turnover tendency in organizational psychology. *Kirikkale University Journal of Social Sciences, 7*(1), 57-72.

33. Poyraz, K. & Kama, B. (2008). Investigating the effects of perceived job security on job satisfaction, organizational commitment and turnover intention. *Suleyman Demirel University Journal of Faculty of Economics and Administrative Sciences, 13*(2), 143-164.

34. Hausknecht, J.P. & Trevor, C.O. (2011). Collective turnover at the group, unit, and organizational levels: evidence, issues, and implications. *Journal of Management, 37*(1), 352-388.

35. Clark, A.E. (2001). What really matters in a job? Hedonic measurement using quit data. *Labour Economics, 8*(2), 223-242.

36. Burgess, S., Lane, J. & Stevens, D. (2000). Job flows, worker flows and churning. *Journal of Labor Economics, 18*, 473-502.

37. Böckerman, P. & Ilmakunnas, P., (2009). Job disamenities, job satisfaction, quit intensions and actual separations: putting the pieces together. *Industrial Relations, 48*, 73-96.

38. Yang, J., Wan, C.S. & Fu, Y.J. (2012). Qualitative examination of employee turnover and retention strategies in international tourist hotels in Taiwan. *International Journal of Hospitality Management, 31*, 837-848.

39. Delfgaauw, J. (2007). Where to go? Workers reasons to quit and intra- vs. interindustry job mobility. *Applied Economics, 39*(16), 2057-2067.

40. Fletcher, L., Alfes, K. & Robinson, D. (2018). The relationship between perceived training and development and employee retention: the mediating role of work attitudes. *The International Journal of Human Resource Management, 29*(18), 2701-2728.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

PID Position Control of a Rotary Pneumatic Actuator with Directional Control Valve

Hamide ASLAN [1,a], **Mehmet İlteriş SARIGEÇİLİ** [1,b]

[1]*Çukurova University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Adana, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0009-0006-6205-9341; [b]**ORCID**: 0000-0002-9969-2005*

Article Info

Received : 02.04.2026
Accepted : 03.08.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1921197

Corresponding Author

Hamide ASLAN
hamideaslan795@gmail.com

Keywords

Pneumatic semi-rotary cylinder
PID position control
System identification
Black-box modeling

***How to cite:** ASLAN, H., SARIGEÇİLİ, M.İ., (2026). PID Position Control of a Rotary Pneumatic Actuator with Directional Control Valve. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 579-591.*

ABSTRACT

In this study, a PID controller has been developed for the position control of a pneumatic semi-rotary cylinder. At first, the system dynamics have been modeled using experimental input and output data by an AutoRegressive with Exogenous Input (ARX) model. Then, a PID controller has been designed in MATLAB/Simulink for that model, and the PID parameters have been determined using Auto-Tuning. The valve dead zone range has been determined from the simulation results in MATLAB/Simulink and then integrated into the experimental system. The PID control experiments showed that the valve was fully closed at different control signals for counterclockwise and clockwise rotation directions as 5.1V and 5V, respectively. Therefore, two PID controllers have been designed. The PID experiment results for clockwise rotation yielded settling time of 1.26 s, steady-state error of 0.597°, and overshoot of 0.75%, while for counterclockwise rotation, the settling time was found as 2.77s, steady-state error as -1.037°, and overshoot as -1.30%. Hence, the performance of the PID controller has been successfully shown in both directions.

Yön Kontrol Valfi ile Bir Döner Pnömatik Aktüatörün PID Konum Kontrolü

Makale Bilgileri

Geliş : 02.04.2026
Kabul : 03.08.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1921197

Sorumlu Yazar

Hamide ASLAN
hamideaslan795@gmail.com

Anahtar Kelimeler

Pnömatik yarı-döner silindir
PID konum kontrolü
Sistem tanımlama
Kara kutu modelleme

***Atıf şekli:** ASLAN, H., SARIGEÇİLİ, M.İ., (2026). Yön Kontrol Valfi ile Bir Döner Pnömatik Aktüatörün PID Konum Kontrolü. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 579-591.*

ÖZ

Bu çalışmada, pnömatik yarı döner silindirin pozisyon kontrolü için bir PID kontrolcüsü geliştirilmiştir. İlk olarak, sistem dinamikleri, deneysel giriş ve çıkış verileri kullanılarak Dış Girişli Otoregresif (ARX) modeli ile modellenmiştir. Daha sonra, bu model için MATLAB/Simulink'te bir PID kontrolcüsü tasarlanmış ve PID parametreleri Otomatik-Ayarlama kullanılarak belirlenmiştir. Valf ölü bölge aralığı, MATLAB/Simulink'teki simülasyon sonuçlarından belirlenmiş ve daha sonra deneysel sisteme entegre edilmiştir. PID kontrol deneyleri, valfin saat yönünün tersine ve saat yönündeki dönüş yönlerinde sırasıyla 5,1V ve 5V gibi farklı kontrol sinyallerinde tamamen kapalı olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, iki PID kontrolcüsü tasarlanmıştır. Saat yönünde dönüş için yapılan PID deney sonuçları, 1,26 s'lik yerleşme süresi, 0,597°'lik kararlı durum hatası ve %0,75'lik aşırı salınım gösterirken, saat yönünün tersine dönüş için yerleşme süresi 2,77 s, kararlı durum hatası -1,037° ve aşırı salınım -%1,30 olarak bulunmuştur. Bu nedenle, PID kontrol cihazının performansı her iki yönde de başarıyla gösterilmiştir.

1. INTRODUCTION

Pneumatic actuators are a type of actuator that convert energy (in the form of compressed air) into mechanical motion. These actuators are widely used in sectors where automatic control is required, such as robotics, automotive, and manufacturing [1]. Pneumatic actuators are known for their high power-to-weight ratio, fast response, and ability to operate in high-temperature or radioactive environments [2]. In medical and rehabilitation robotics, pneumatic actuators are particularly advantageous due to their inherent structural compliance and back-drivability, which guarantee safe human-robot physical interaction during joint therapy.

Electric motors are used as actuators in many industrial applications. The reason for that is they are easy to control, but they have disadvantages such as being heavy, having a low power-to-weight ratio, and requiring high current. Hydraulic actuators, on the other hand, require hydraulic oil. A pump is also needed for this hydraulic oil to circulate in the lines. In the case of any leakage, the environment becomes polluted.

Pneumatic actuator systems, on the other hand, exhibit various nonlinear characteristics. Factors such as air compressibility, friction, valve dead zone, and air leakage make the system dynamics highly nonlinear [3], [4]. These nonlinearities make pneumatic actuators difficult to model and control, particularly in high-precision position control applications [5]. Conventional linear control methods often fail to provide satisfactory performance under parameter variations and load disturbances. Therefore, various nonlinear and hybrid control approaches have been extensively investigated to improve control performance. Nonlinear methods such as sliding mode control (SMC), backstepping control, and nonlinear ARX (NARX)-based strategies have demonstrated robust trajectory tracking by compensating for valve dead zones and air compressibility [6,7]. Furthermore, hybrid control schemes combining classical controllers with intelligent algorithms, such as fuzzy-PID, adaptive neuro-fuzzy inference systems (ANFIS), and neural-network-augmented controllers, have been developed to achieve adaptive gain adjustment and smoother motion response [1,8]. Consequently, accurate dynamic modeling of pneumatic systems has become a critical prerequisite for designing high-performance controllers [2]. Despite these advances, classical controllers such as PID, fuzzy-PID, and sliding mode control remain widely used in pneumatic actuator applications because of their simplicity, robustness, and practical implementation advantages [9].

In control systems engineering design, each system needs to be modeled in the form of a mathematical representation that describes the behavior of the system. This can be achieved using theoretical mathematical analysis or system identification techniques [10]. Deriving the mathematical representation of the pneumatic semi-rotary cylinder is limited because there are many unknown parameters to be considered in the system and the nonlinear characteristics of pneumatic actuators. Therefore, the system identification approach was chosen to model the pneumatic semi-rotary cylinder.

In system identification methods, various parametric model structures are used to represent system behavior. Among the most commonly used model structures in the literature are AutoRegressive with Exogenous Input (ARX), AutoRegressive Moving Average with Exogenous Input (ARMAX), Output-Error (OE), and Box-Jenkins (BJ) models [4]. These models enable obtaining the mathematical model of the system based on input-output data. Previous studies have shown that a 3rd-order ARX model structure provides effective results in modeling pneumatic systems [3].

In the literature, Lababidi et al. [2] performed system identification of a linear pneumatic actuator using the ARX model and then designed a PID position controller in MATLAB/Simulink using this model. Sulaiman et al. [3] performed system identification for the Intelligent Pneumatic Actuator (IPA) system using ARX and NARX models. Osman et al. [11] also performed system identification using the ARX model for an IPA system. Then, using this model, they designed a PI position controller in MATLAB/Simulink. In another study, Faudzi et al. [5] performed system identification for the IPA system using the ARMAX model and then designed a PI position controller in MATLAB/Simulink using this model.

When the studies in the literature are examined, there are many studies on system modeling and position control of pneumatic actuator systems, especially in IPA systems. However, studies on system identification and control of pneumatic semi-rotary cylinders are very limited compared to linear pneumatic actuators and IPA systems. In addition, experimental position controller studies carried out using system identification models are not studied well.

In this study, the mathematical model of the behavior of a pneumatic semi-rotary cylinder has been developed using system identification methods. Using this model, a PID position controller has been designed in MATLAB/Simulink, and the designed PID controller has been integrated into the real system and experiments have been carried out. As a result of the experiments, the PID position controller was able to successfully perform position control.

2. EXPERIMENTAL DESIGN SETUP

The experimental setup used in this study is shown in Figure 1. The experimental setup is a pneumatically driven wrist/forearm rehabilitation robot proposed by Dağdelen et al. [12]. This experimental setup consists of a pneumatic semi-rotary cylinder, data acquisition card (DAQ card), rotary encoder, proportional directional control valve (DCV), and proportional pressure regulator valve (PRV). For wrist/forearm rehabilitation applications, maintaining precise angular position tracking and smooth dynamic response is essential to align with anatomical motion limits (e.g., flexion/extension or pronation/supination). Uncontrolled motion or overshoot in pneumatic drives could cause discomfort or injury to the patient. Therefore, designing a robust position controller for the pneumatic semi-rotary actuator directly determines the safety, motion compliance, and therapeutic efficacy of the rehabilitation robot.

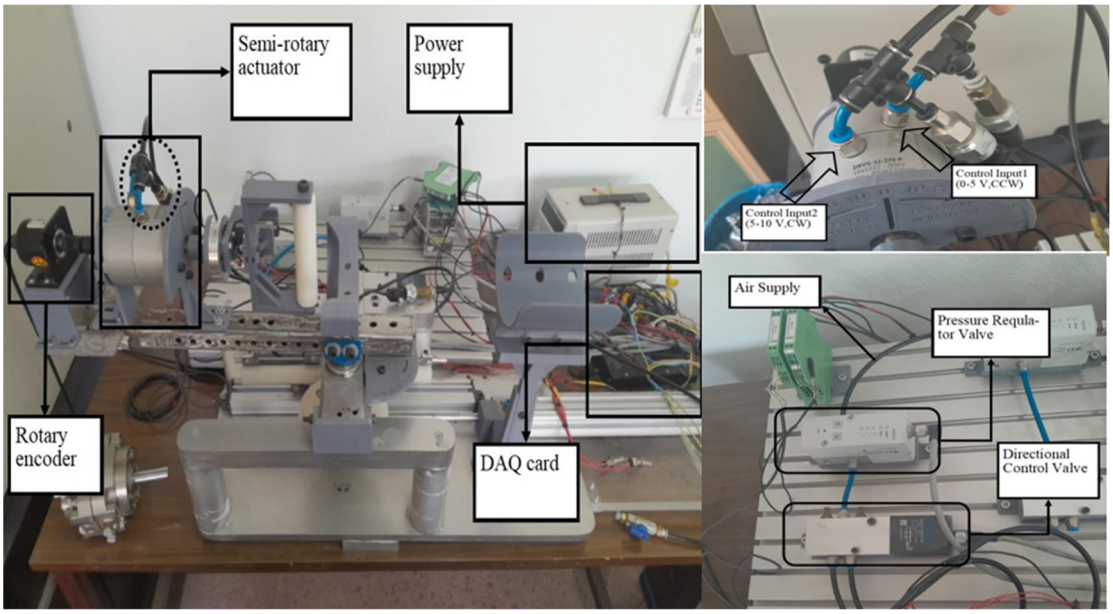


Figure 1. The experimental setup for PID control of pneumatic semi-rotary actuator

The proportional PRV is the FESTO VPPM-6L-L-1-G18-0L10H-V1P model. This proportional PRV provides a pressure supply between 0-10 bar corresponding to a control signal of 0-10 V DC. This pressure is then directed to the proportional DCV. The proportional DCV is the FESTO MPYE-5-1/8-HF-010-B valve, which is a 5/3 closed-center type valve. The pneumatic semi-rotary cylinder used in the system is the FESTO DRVS-32-270-P model. This cylinder has an operating range of 0°-270° and a working pressure range of 2-8 bar. Depending on the control voltage applied to the DCV input, the amount of air flow directed to the cylinder and the rotation direction of the cylinder are determined. The air flow corresponding to the signal sent between 0V-5V causes the cylinder to rotate counterclockwise, while the air flow corresponding to the signal sent between 5V-10V causes the cylinder to rotate clockwise. At 5V, the cylinder is at the midpoint and closed. Therefore, since there is no air flow, no motion can be achieved in the cylinder. The cylinder moves angularly depending on the supplied air flow.

The encoder ATEK ARC-S-50-1024-TTL-3-3M-A-8-C was used to measure the angular motion of the cylinder caused by pressure changes. This sensor is of incremental type and operates with an optical measurement principle. Since it has an optical measurement principle, it produces the angular position information of the cylinder with high resolution. All sensor measurements and control signals in the experimental setup are processed using the Quanser Q8 USB data acquisition card. This DAQ card provides 16-bit resolution with 8 analog inputs, 8 analog outputs, 8 digital inputs, and 8 digital outputs. This data

acquisition card operates integrated with MATLAB/Simulink. In this way, control signals can be applied in real time via the Simulink interface, and the position data obtained from the encoder can be fed back to the system in real time.

The flow diagram of the experimental setup is shown in Figure 2. The measured values from the angular encoder are transferred to MATLAB Simulink via the DAQ card. They are processed in the control algorithm, and the required control signals are sent to the PRV and the DCV. In this way, the adjusted pressure is directed to the relevant chamber of the pneumatic cylinder through the DCV, and rotational motion is achieved.

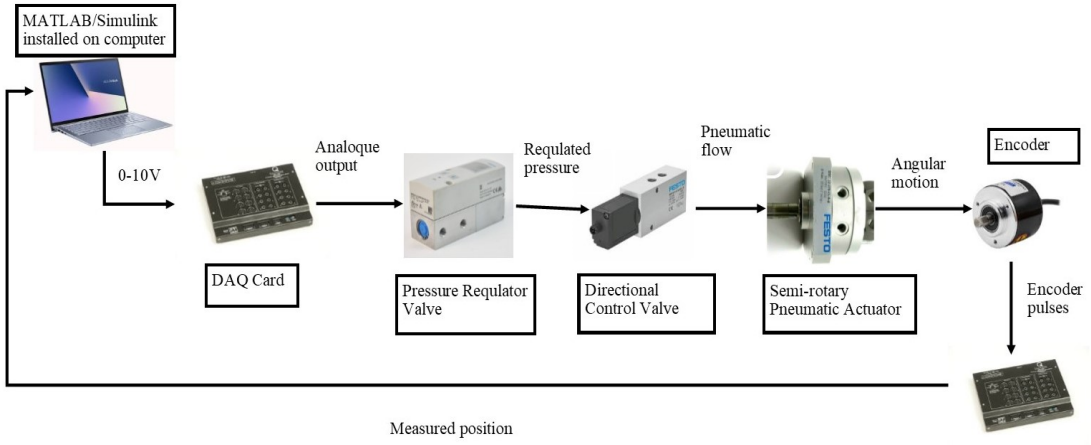


Figure 2. Signal flow of the experimental pneumatic actuator system

3. SYSTEM IDENTIFICATION

The aim of this study is to develop a PID position controller for a pneumatic semi-rotary cylinder. The mathematical model of the pneumatic system is developed from system identification methods. System identification methods are divided into three types [13]: white-box, gray-box, and black-box. In white-box models, all physical structures and parameters of the system are known. In gray-box models, some of the physical structures and parameters are known. However, in black-box models, no information about the physical structure of the system is required. The mathematical model of the system is obtained using only input and output data. Due to the complex and nonlinear nature of pneumatic systems, black-box modeling is generally used in these systems. In this study, black-box modeling was used to obtain the mathematical model of the pneumatic semi-rotary cylinder.

In order to model the dynamic behavior of pneumatic actuator systems, different black-box model structures are used in the literature. Among these model structures, ARX, ARMAX, Box-Jenkins, Output-Error, and Hammerstein models are widely used [4]. However, the selection of the model structure is very important for the physical representation of the system and the accurate estimation of parameters. Therefore, the correct model structure must be selected. In the literature, the ARX model structure is frequently used in pneumatic actuators because it provides sufficient model accuracy [2-4, 11]. For example, in a study on system identification and position control of pneumatic actuator systems, it was stated that the ARX model successfully modeled the system dynamics [2]. In another study, both ARX and nonlinear ARX (NARX) models were used in experiments conducted on an intelligent pneumatic actuator (IPA) system. Both models were able to model the system with an accuracy above 90% [3]. In another intelligent pneumatic actuator (IPA) system study [11], the ARX model was used to identify the system, and this model accurately represented the system. Based on these studies in the literature, the ARX model was preferred in this study for system identification and obtaining the mathematical model of the pneumatic semi-rotary cylinder.

After selecting the model to be used, the next step is to determine the order of the selected model. Studies in the literature have confirmed that higher-order models may produce unstable outputs [8, 14-16]. The ARX model is essentially limited to only 2nd- and 3rd-order models. The 2nd- order ARX model and the 3rd-order ARX model have different structures. Lababidi et al. [2] applied a 3rd-order ARX model to model the linear pneumatic actuator they had. This model estimated the mathematical model of the system with

an accuracy greater than 90%. Similarly, in the study conducted for the intelligent pneumatic actuator [3], 3rd-order model structures were used for both ARX and NARX models. In another intelligent pneumatic actuator (IPA) study [10], the model structure is again a 3rd-order ARX model. In addition to these studies, according to the research conducted by Osman et al. [11], the 3rd-order model represents the closest model to the real plant. For these reasons, a 3rd-order ARX model has been used in this study. This ARX model can be expressed with single-input and single-output signals. The ARX model is as follows;

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \ldots + a_{\{n_a\}} y(k-n_a) = b_1 u(k-n_k) + \ldots + b_{\{n_b\}} u(k-n_k-n_b+1) + e(k) \quad (1)$$

Here, $y(k)$ is the output at time k, $u(k)$ is the input at time k, and $e(k)$ is the signal error at time k. n_a is the number of poles, n_b is the number of zeros, and n_k is the dead time in the system.

The number of poles n_a represents the system dynamics affecting the angular position of the cylinder. These parameters include pressure change, friction, and valve delay. If the number of poles is less than 3, the system response cannot be fully estimated; if it is greater than 3, unstable outputs are produced.

The number of zeros n_b captures the effect of the control signal between the valve and the cylinder. In order to correctly model the output response to the input signal in the model, 3 zeros are used.

The dead time n_k represents the delays observed in the experimental data. These delays represent the response time of the valve, overcoming friction effects, and the delay caused by the air pressure reaching the cylinder. It is selected as 1 in the system.

After determining the model structure to be used in system identification (SI), the next step is to collect experimental data for this model structure. The steps of the SI are listed below:

1- Obtaining input and output data from real-time experiments
2- Model selection and estimation
3- Model validation

For system identification studies of pneumatic actuator systems, the selection of the input signal affects the accuracy of the model and the success of control design. In the literature, ramp, sinusoidal, pseudo-random binary sequence (PRBS), and step signals have been used for system identification [3-5]. In the literature, especially for IPA systems, step signals have been preferred in order to accurately represent the nonlinear and delayed dynamics of the system [2-5, 11]. The step signal enables the system to transition between different operating points in a short time and reveals the nonlinear behaviors of the system such as valve dynamics, air compressibility, and friction effects. In this way, an accurate mathematical model of the system is obtained. In this study, a step signal has been used since it is one of the most commonly used input signals for SI. The step signal can be generated by operations such as power on/off and valve on/off [11]. The input signals applied to the valve are as shown in Table 1.

The step signals applied to the valve were defined with a duration of 0.35 seconds. Accordingly, the 0V control voltage applied to the directional control valve for 0.35 seconds caused the pneumatic semi-rotary cylinder to rotate counterclockwise with the help of the compressed air directed from the valve. Then, the 10V control voltage applied for 0.35 seconds caused the compressed air directed from the valve to rotate the cylinder clockwise. Finally, the 5V control voltage was applied for 0.35 seconds, and since no air flow was provided to the pneumatic semi-rotary cylinder, the cylinder remained stationary. The control signals (u1) applied to the system and the measured angular positions (y1) obtained from the system are shown in Figure 3.

Table 1. The cylinder movement based on valves ON/OFF

Control voltage	Valve position	Cylinder motion
0V	Fully open (Control input1)	CCW rotation
5V	Center position	No motion
10V	Fully open (Control input2)	CW rotation

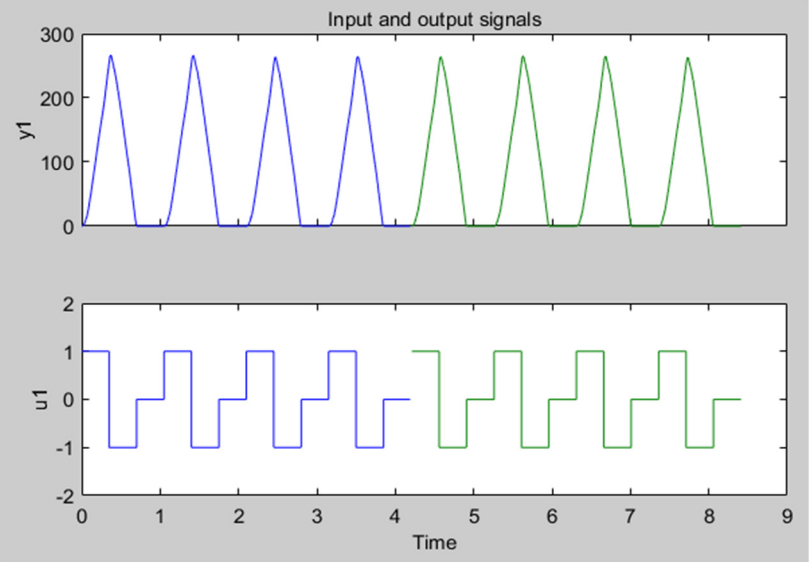


Figure 3. Step input control signals (u1) applied to the valve and the corresponding measured angular position outputs (y1) collected for system identification

Using these step signals, the experiment was performed in the experimental setup (Figure 1). From this real-time experiment, 840 input data points generated from the continuous step input signals and 840 output data points from the position values measured by the encoder were collected. These data were collected with a sampling time of 0.01 s. The graph of 840 input and output data is shown in Figure 3.

In order to perform system identification more accurately, the input signals were normalized as -1, 0, and +1 corresponding to 10V, 5V, 0V control voltages, respectively. The main reason for normalizing the input signals used during the system identification process as -1, 0, and +1 is to increase the numerical stability of the system identification algorithms and to ensure more accurate estimation of model parameters. In the experimental system, the 0V control voltage applied to the valve causes the pneumatic semi-rotary cylinder to move counterclockwise. As a result of this motion, the encoder provides output data increasing from 0°. Therefore, the input corresponding to 0V is defined as +1. The 5V control voltage causes no air flow from the valve, resulting in no motion of the pneumatic semi-rotary cylinder. Therefore, the encoder continues to output the last angle value until the control voltage signal changes. For this reason, the input corresponding to 5V is defined as 0. Finally, when a 10V control voltage is applied to the valve, the air flow provided by the valve causes the pneumatic semi-rotary cylinder to rotate clockwise. Due to this, the encoder provides decreasing values toward 0° as output data, so the input corresponding to 10V is defined as -1. Thus, a certain mathematical consistency between the input and output data of the system is ensured.

These collected data should be divided into two parts: the first dataset for training and the second dataset for model validation. If the entire dataset is used for only training, the obtained model may overfit the training data, and this reduces the generalization capability of the model. Therefore, the first 420 samples of the data obtained from the experiment were used for training, and the last 420 samples were reserved for validation.

After selecting the appropriate model, model estimation and validation processes are carried out. Three different model performance criteria commonly used in the literature were used to evaluate the model performance. In this study, Best Fit% was used to demonstrate the accuracy of the model. According to Ljung [17], if the best fit percentage is 90% or above, the model is accepted. In addition, the commonly used performance criteria in the literature for model acceptance or rejection are Akaike's Final Prediction Error (FPE) [17] and Akaike's Information Criterion (AIC) [3].

These performance criteria used to quantitatively evaluate model accuracy are mathematically expressed as follows:

$$Best\ Fit = 100\left[1 - \left(\frac{norm(y-\hat{y})}{norm(y-\bar{y})}\right)\right]\% \quad (2)$$

Here;
y = output of the real value,
ŷ = output predicted by the model,
ȳ = mean value of the output.

Another criterion used for model validation is Akaike's Final Prediction Error (FPE) as defined in the equation set of Eq. (3). A smaller FPE value indicates a better model [3].

$$\text{FPE} = \frac{V\left(1+\frac{n_a}{N}\right)}{\left(1-\frac{n_a}{N}\right)}$$
$$V = \frac{e^T(k)e(k)}{N} \quad (3)$$
$$\mathbf{e(k)} = [e_k, e_{(k-1),\ldots} e_{(k-N)}]^T$$

$e(k)$ represents the model prediction error. n_a represents the number of model parameters, and N represents the total number of samples. e^T represents the transpose of the error vector.

Another criterion used for model validation is Akaike's Information Criterion (AIC) as given in Eq. (4). A smaller AIC value indicates a better model [3].

$$\text{AIC} = \log[V(1 + 2\frac{n_a}{N})] \quad (4)$$

Therefore, in the system identification process, different model structures should be compared and the most appropriate model should be selected according to the above model structures.

4. RESULTS AND DISCUSSION

In this section, the ARX parameters obtained as a result of system identification, model validation results, and the performance of the designed PID controller in both simulation and the real system are presented.

The system identification process was carried out using the MATLAB System Identification Toolbox. First, system identification was applied to the 3rd-order ARX model structure using the training dataset. Then, the applied model was validated using the second dataset, which is the validation data. As a result of the analyses performed in the MATLAB System Identification Toolbox interface, it was found that the model that best represents the mathematical model of the pneumatic semi-rotary cylinder is a linear ARX model with the structure $n_a = 3$, $n_b = 3$, and $n_k = 1$ (Figure 4). This model is also expressed as 331ARX. While selecting this model, model performances were determined according to Best Fit%, FPE, and AIC criteria. These values that determine the model selection are given in Table 2.

Table 2. The performances of linear 331ARX

Best fit	91.44%
FPE	0.6733
AIC	-0.3955
MSE	0.6451

It was observed that the output of the 3rd-order ARX model matches the real system output by 91.44% (Figure 4). The 8.56% loss is considered to be mainly due to factors such as valve dead zone, friction effects, etc. in the pneumatic valve. In addition, as stated in the literature [18], friction forces in pneumatic systems have complex structures including static, Coulomb, and Stribeck effects.

The discrete transfer function obtained for the linear 331ARX model is given in the following equation set:

$$\text{A}(z^{-1}) = 1 - 2.135z^{-1} + 1.459z^{-2} - 0.3234\text{z}^{-3}$$
$$\text{B}(z^{-1}) = 1.969z^{-1} + 0.04219z^{-2} - 0.5322\text{z}^{-3} \quad (5)$$
$$G(z) = \frac{\text{B}(z^{-1})}{\text{A}(z^{-1})} = \frac{1.969z^{-1} + 0.04219z^{-2} - 0.5322\text{z}^{-3}}{1 - 2.135z^{-1} + 1.459z^{-2} - 0.3234\text{z}^{-3}}$$

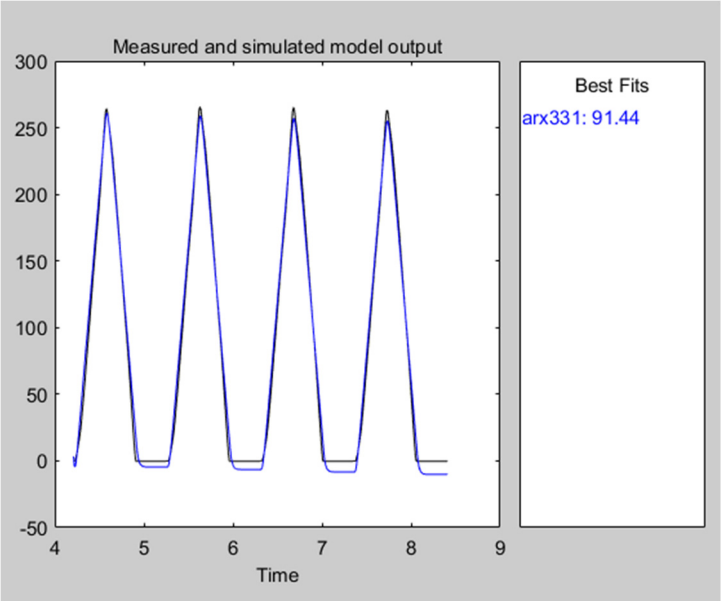


Figure 4. Comparison between measured real system output and simulated 331ARX model output.

The identified parameters of the 331ARX model reflect the dominant dynamic characteristics of the pneumatic semi-rotary cylinder system. The denominator coefficients ($a_1 = -2.135$, $a_2 = 1.459$, $a_3 = -0.3234$) define the system poles, representing the combined effects of air compressibility, mechanical inertia, and viscous friction that govern the system's transient energy storage and dissipation. The dynamic response speed is heavily dictated by the dominant pole location derived from $A(z^{-1})$. Conversely, the numerator parameters ($b_1 = 1.969$, $b_2 = 0.04219$, $b_3 = -0.5322$) capture the high-frequency control input transmission from the valve openings to torque generation. The magnitude of b_1 highlights the strong initial acceleration response upon applying control voltage, whereas b_3 reflects the structural time-lag associated with pressure buildup inside the cylinder chambers.

The schematic diagram of the PID position controller is shown in Figure 5. As seen from the schematic diagram, it consists of a closed-loop structure. The designed PID controller is limited between an upper limit of +1 and a lower limit of -1 according to the input signal used in system identification. This PID limitation is necessary for system stability and for adapting the control signal generated by the PID to the physical system.

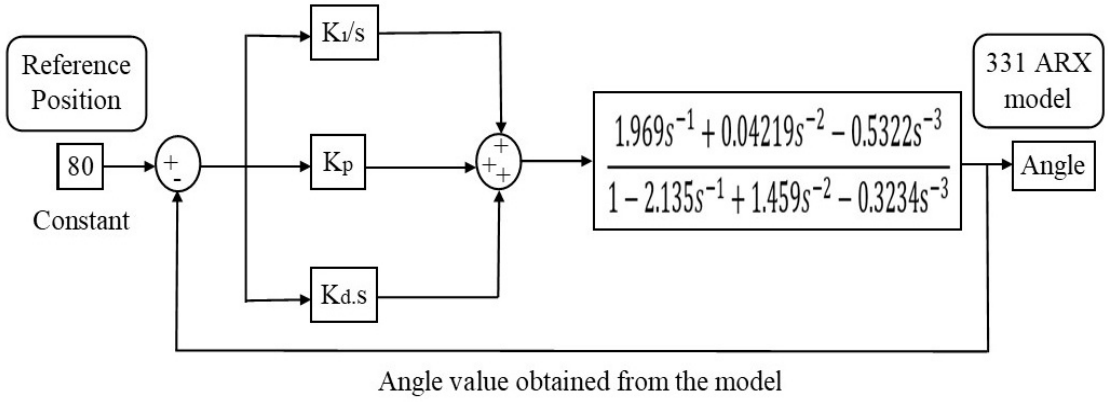


Figure 5. Block diagram of the PID position control system designed in MATLAB/Simulink environment

Using the 331ARX model obtained from system identification, PID position control was performed in the MATLAB/Simulink environment (Figure 6). The parameters of the PID position controller were determined using the Auto-Tuning method. The proportional, integral, and derivative gains of the PID were found to be as follows: $K_p = 0.0012267$; $K_i = 0.00072637$; and $K_d = 6.11541 \times 10^{-6}$.

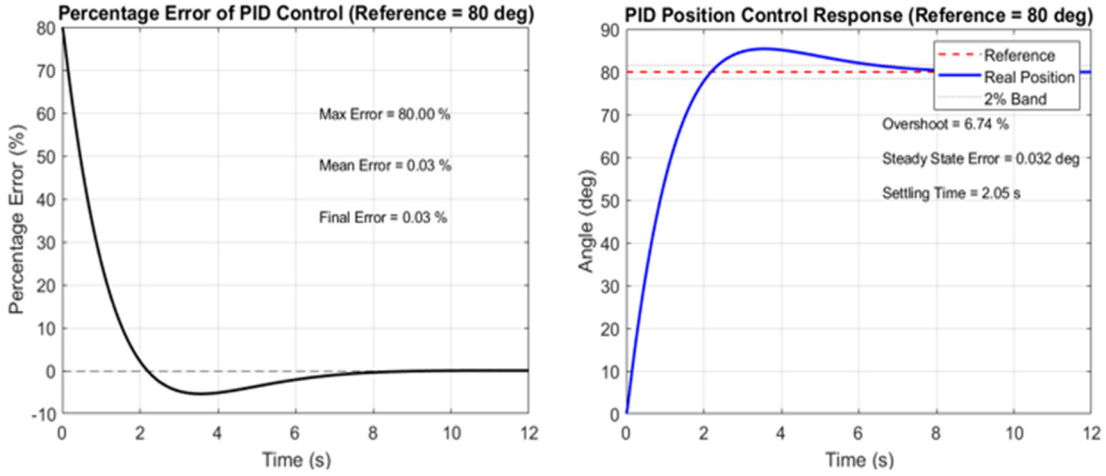


Figure 6. Simulated PID position control response and percentage error for 80° reference position.

The error signal is obtained by comparing the reference position with the position value obtained from the 331ARX model. This error signal is applied to the PID controller to generate the control signal. For the reference position of 80°, the behavior of the PID position controller is presented in Figure 6. According to the PID results, the settling time is found as 2.05 s, the steady-state error as 0.032°, and the overshoot as 6.74%. The reason for the high overshoot is that although the obtained ARX model successfully represents the general dynamic behavior of the system, factors such as air compressibility, valve dynamics, and friction effects lead to nonlinear characteristics. Therefore, models obtained by linear system identification methods cannot represent all nonlinear effects. This situation causes overshoot in the system.

After determining the PID parameter values in the Simulink environment, it is necessary to convert the PID output into a signal that the proportional directional control valve can be operated. This is achieved by the following equation, which maps the PID output such that +1 corresponds to 0V control voltage, -1 corresponds to 10V control voltage, and 0 corresponds to 5V control voltage:

$$V = -5u + 5 \tag{6}$$

In this equation, u is the output signal of the PID, and V is the control voltage sent to the proportional directional control valve. This equation is placed at the PID output in the simulation.

The system developed in the Simulink environment (Figure 6) was designed to examine the control signals that the PID output sends to the proportional DCV. After the system reaches the reference position, the control signal generated by the PID controller corresponding to steady-state errors was further analyzed. Theoretically, when the error value approaches 0, the valve should receive 5V, but when the simulation value was examined, it was observed that even though the error value is 0.03%, the valve did not receive 5V. In this case, it was determined that the control signal produced by the PID controller was 0.04. Therefore, values between -0.04 and +0.04 produced by the PID controller are accepted as 0 using a dead-zone command in the simulation, and it is ensured that the proportional DCV receives 5V (Figure 7).

After determining the dead-zone range, this range was integrated into the real system. As a result of the experiments performed in the system, it was observed that the closing position of the valve in two directions was not exactly the same. It was found that the valve closes at 5.1V when rotating counterclockwise and at 5V when rotating clockwise. This situation can be explained by valve asymmetry, which may result from manufacturing tolerances in the internal mechanism of the valve, spool positioning precision, and pneumatic flow characteristics. In addition, as stated in the literature, directional control valves exhibit different flow characteristics during filling and exhausting conditions and show nonlinear behavior, especially at small valve openings [19]. Therefore, two separate PID position controllers were designed as shown in Figure 8 and Figure 9.

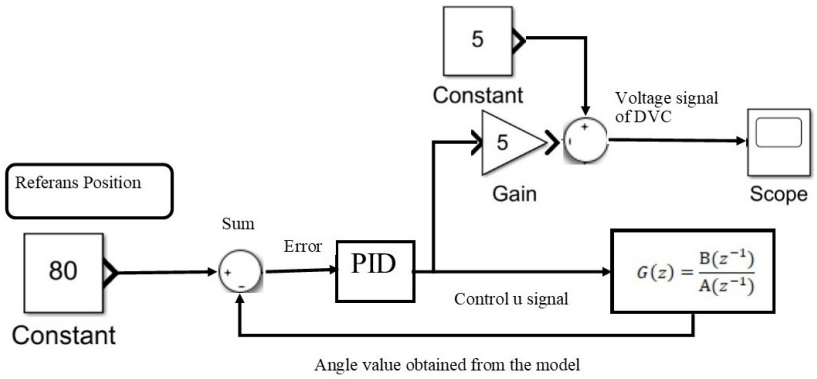


Figure 7. Simulink model used to determine the value dead-zone range

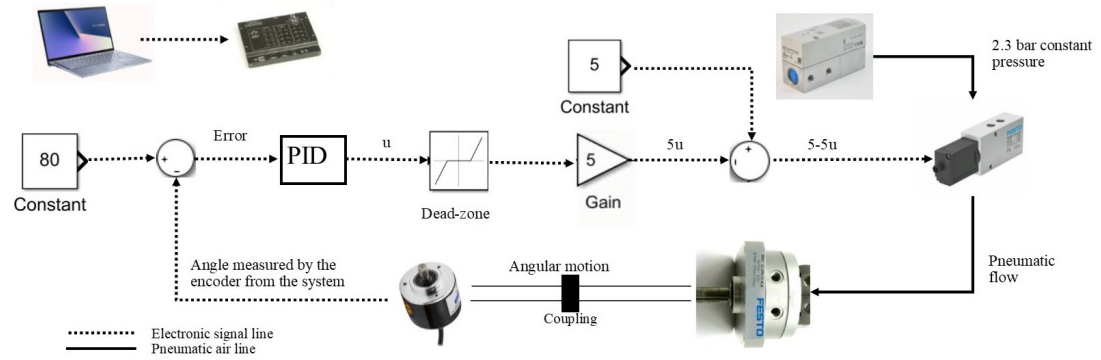


Figure 8. Block diagram of the experimental setup used for CCW position control

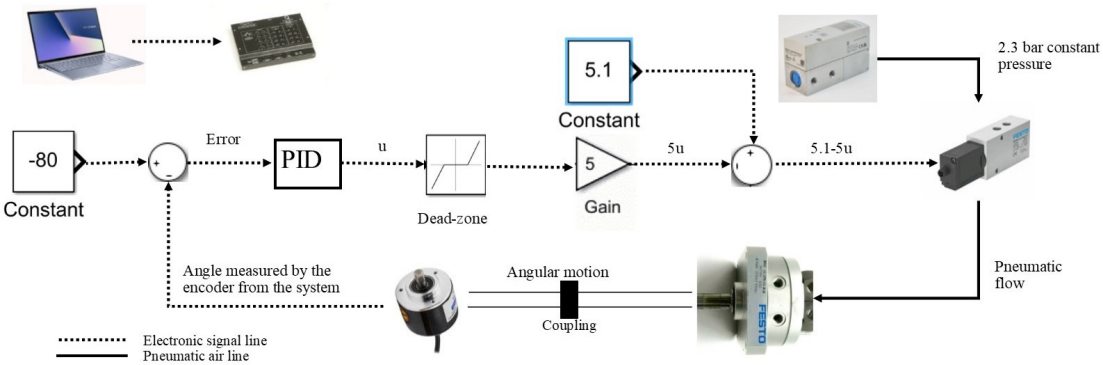


Figure 9. Block diagram of the experimental setup used for CW position control

The designed PID position controllers were tested in the real system to reach 80° angular position in two directions, CCW (Figure 10) and CW (Figure 11). The performance characteristics of the PID outputs for the two rotation directions of CCW and CW are tabulated in Table 3. From these results, it is shown that the designed PID controller provides acceptable position control of the pneumatic semi-rotary cylinder in both directions.

It is observed that the overshoot values from the simulation and the real experiment differ for both directions of rotation. The overshoot in simulation yielded 6.74% (Figure 6) for both directions whereas the overshoot values in CW and CCW rotation obtained from the real system are as 0.75% and 1.30% (Table 3), respectively. The main reason for this is the input signals used for the SI model. The input signals were arranged as step inputs with a duration of 0.35 seconds. This short-duration signal sent to the valve causes the system to continue moving in the same direction for a short time due to valve dynamics and velocity effects when switching from 0V to 10V. This effect is observed as overshoot in the model. In the real-time control application, the valve is driven by a continuous control signal from the PID controller instead of step inputs. Therefore, sudden direction changes are eliminated and the overshoot decreases.

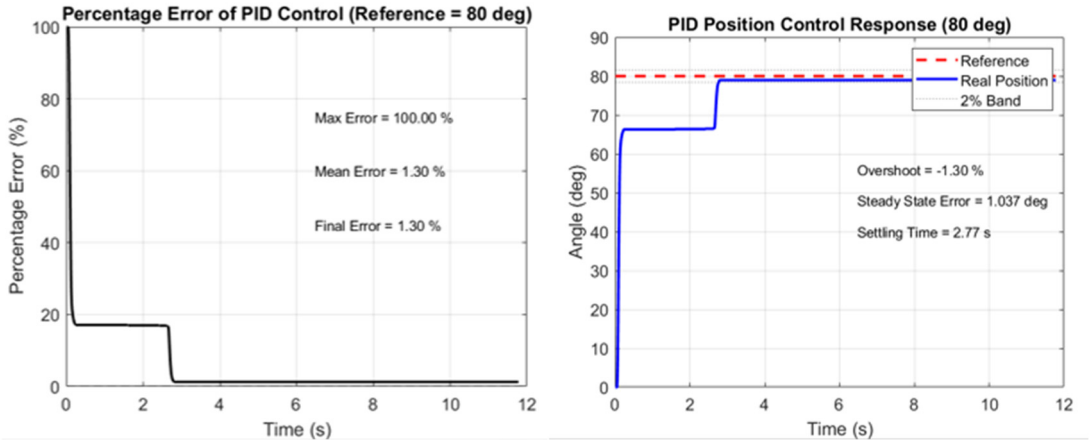


Figure 10. Real-time experimental PID position response and percentage error in the CCW direction.

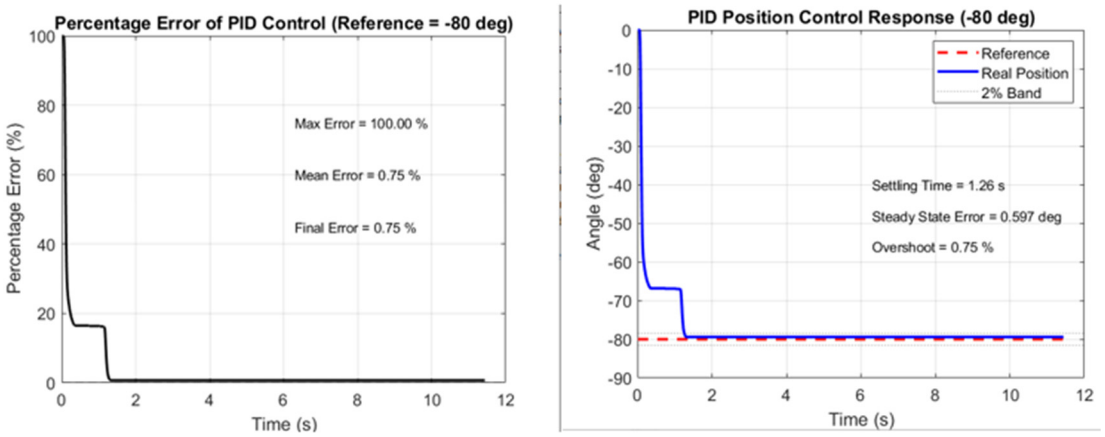


Figure 11. Real-time experimental PID position response and percentage error in the CW direction.

Table 3. The performance characteristics of the PID outputs

	CCW	CW
Overshoot (%)	-1.30	0.75
Steady-state error (°)	1.037	0.597
Settling time (s)	2.77	1.26

5. CONCLUSIONS

In this study, system identification and PID position control of a pneumatic semi-rotary cylinder were performed. First, the mathematical model of the system was obtained using experimental data. This mathematical model is the 331ARX model. The accuracy of this model was evaluated with training and validation data, and the fit percentage was found to be 91.44%.

Using the obtained model, a PID controller was designed in the MATLAB/Simulink environment. The parameters of this PID were determined using the Auto-Tuning method, and the PID output signal was designed to be between +1 and -1. This PID controller was tested in the simulation environment and it was observed that it successfully performed position control. Then, the output signal of the PID controller was converted into a signal that can drive the proportional directional control valve. After this conversion, the dead zone of the valve was determined from the experiments and used in the experiments conducted on the real system.

In the experiments conducted on the real system, it was observed that the valve was fully closed at 5.1V when rotating CCW direction and at 5V when rotating CW direction. Therefore, two PID position

controllers were designed. The results obtained from the real system experiments showed that the PID position controller successfully performed position control in both directions.

In future studies, nonlinear modeling and advanced control methods can be investigated in order to better represent the nonlinear effects present in pneumatic systems.

Although the identified 331ARX model achieved a high model fit accuracy of 91.44% and enabled acceptable real-time position control, this study has a few inherent limitations. First, since the ARX structure is inherently linear, it cannot fully capture severe nonlinear dynamic effects, such as asymmetry in valve closing positions, stick-slip dry friction, and air compressibility variations under dynamic payload changes. Second, the fixed-gain PID parameters tuned via Auto-Tuning may exhibit degraded performance if external load disturbances are applied to the rehabilitation system.

To address these limitations, future research will focus on developing dynamic nonlinear modeling techniques (e.g., Nonlinear ARX / NARX or Hammerstein-Wiener models) to capture structural system nonlinearities more precisely. Furthermore, implementing advanced adaptive control strategies — such as adaptive PID tuning, gain scheduling, and sliding mode control (SMC) — will be investigated to maintain robust trajectory tracking performance under payload variations and disturbances during rehabilitation exercises.

6. REFERENCES

1. Hikmat, O.F., Elnimair, M.O. & Osman, K. (2014). PI adaptive neuro-fuzzy and receding horizon position control for intelligent pneumatic actuator. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, *67*(3), 17-24.
2. Lababidi, S.I., Sahlan, S., Muftah, M.N., Faudzi, A.A.M. & Ali, F. (2023). System identification and position control of pneumatic actuator. In *2023 IEEE 9th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA),* 176-181, IEEE.
3. Sulaiman, S.F., Rahmat, M.F., Faudzi, A.A.M. & Osman, K. (2016). Linear and nonlinear ARX model for intelligent pneumatic actuator systems. *Jurnal Teknologi*, *78*(6), 21-8.
4. Muftah, M.N., Xuan, W.L. & Faudzi, A.A.M. (2021). ARX, ARMAX, Box-Jenkins, Output-Error, and Hammerstein models for modeling intelligent pneumatic actuator (IPA) system. *Journal of Integrated and Advanced Engineering (JIAE)*, *1*(2), 81-88.
5. Faudzi, A.A.M., bin Osman, K., Rahmat, M.F., Mustafa, N.M.D., Azman, M.A. & Suzumori, K. (2012). Controller design for simulation control of intelligent pneumatic actuators (IPA) system. *Procedia Engineering*, *41*, 593-599.
6. Richer, E. & Hurmuzlu, Y. (2000). A high performance pneumatic force actuator system: Part II—Nonlinear controller design. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 122(3), 426-434.
7. Bone, G.M. & Ning, S. (2007). Experimental comparison of position tracking control algorithms for pneumatic cylinder actuators. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 12(5), 557-561.
8. Aschemann, H. & Schindele, D. (2008). Sliding-mode control of a high-speed linear axis driven by pneumatic muscle actuators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(11), 3855-3864.
9. Bağlar, E.T. & Baysal, C.V. (2020). An experimental evaluation of control modes for pneumatic artificial muscles using fast on/off valves. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *35*(2), 401-412.
10. Rahmat, M.F., Sunar, N.H., Salim, S.N.S., Abidin, M.S.Z., Fauzi, A.M. & Ismail, Z.H. (2011). Review on modeling and controller design in pneumatic actuator control system. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, *4*(4), 630-661.
11. Osman, K., Rahmat, M.F., Mustafa, N.M.D., Azman, M.A. & Suzumori, K. (2012). System identification model for an Intelligent Pneumatic Actuator (IPA) system. In *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems,* 628-633, IEEE.
12. Dagdelen, M. & Sarigecili, M.I. (2016). Development of a conceptual model for wrist/forearm rehabilitation robot with two degrees of freedom. In *International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region,* 523-530, Cham: Springer International Publishing.
13. Ljung, L. (2010). Perspectives on system identification. *Annual Reviews in Control*, *34*(1), 1-12.
14. Djamah, T., Mansouri, R., Djennoune, S. & Bettayeb, M. (2008). Optimal low order model identification of fractional dynamic systems. *Applied Mathematics and Computation*, *206*(2), 543-554.

15. He, X. & De Roeck, G. (1997). System identification of mechanical structures by a high-order multivariate autoregressive model. *Computers & Structures*, *64*(1-4), 341-351.
16. Kosmatopoulos, E.B., Polycarpou, M.M., Christodoulou, M.A. & Ioannou, P.A. (1995). High-order neural network structures for identification of dynamical systems. *IEEE Transactions on Neural Networks*, *6*(2), 422-431.
17. Ljung, L. (2015). *System identification toolboxTM user's guide.* MathWorks Co. Ltd.
18. Dağdelen, M. & Sarıgeçili, M.İ. (2019). Development of a test apparatus for estimation of friction parameters at linear pneumatic cylinders. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *34*(3), 131-142.
19. Dağdelen, M., Sarigeçili, M.İ. & Özbek, N.S. (2023). A new compressible flow model for pneumatic directional control valves. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, *237*(2), 179-195.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

CH Sınıfı Kilin Yüksek Fırın Cürufu ve Nano-SiO_2 ile Stabilizasyonunda Zamana Bağlı Dayanım Gelişimi

Firdevs UYSAL [1,a], **Esra TATLIOĞLU** [1,b], **Resul MUT** [1,c]

[1]*Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Niğde, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0003-0944-0638; [b]**ORCID**: 0000-0002-5396-1361; [c]**ORCID**: 0009-0008-7274-0514*

Makale Bilgileri
Geliş : 01.03.2026
Kabul : 11.08.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1900353

Sorumlu Yazar
Firdevs UYSAL
firdevsuysal@ohu.edu.tr

Anahtar Kelimeler
Nano-SiO_2
Serbest basınç dayanımı
Yüksek fırın cürufu
Yüksek plastisiteli kil
Zemin stabilizasyonu

***Atıf şekli:** UYSAL, F., TATLIOĞLU, E., MUT R., (2026). CH Sınıfı Kilin Yüksek Fırın Cürufu ve Nano-SiO_2 ile Stabilizasyonunda Zamana Bağlı Dayanım Gelişimi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 593-603.*

ÖZ

Bu çalışma, laboratuvar koşullarında yapay olarak üretilen yüksek plastisiteli kil (CH) zeminin stabilizasyonunda yüksek fırın cürufu (YFC), Nano-SiO_2 (NS) ve bu katkıların birlikte kullanımının (YFC+NS) serbest basınç dayanımı üzerindeki zamana bağlı etkilerini incelemektedir. Bu amaçla yapay zemine %10, %20, %30 ve %40 YFC, tek başına %1.5 NS ve her YFC oranıyla birlikte %1.5 NS ilave edilerek toplam on farklı karışım hazırlanmıştır. Numuneler 0, 7, 30 ve 60 gün süreyle kür edilmiş ve serbest basınç dayanımları belirlenmiştir. Sonuçlar, YFC katkısının tüm oran ve kür sürelerinde dayanımı artırdığını göstermiştir. En yüksek dayanım değeri 60 günlük kür sonunda %40 YFC içeren karışımda elde edilmiş ve aynı kür süresindeki referans numuneye göre yaklaşık %142 oranında artış sağlamıştır. NS tek başına dayanımı artırmasına rağmen etkisi YFC'ye kıyasla daha sınırlı kalmıştır. YFC+NS karışımlarında dayanım gelişimi kür süresi ve katkı oranına bağlı olarak değişmiş, yüksek YFC içeriklerinde NS ilavesinin ilave dayanım kazancı sağlamadığı belirlenmiştir.

Time-Dependent Strength Development of CH Clay Stabilized with Ground Granulated Blast Furnace Slag and Nano-SiO_2

Article Info
Received : 01.03.2026
Accepted : 11.08.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1900353

Corresponding Author
Firdevs UYSAL
firdevsuysal@ohu.edu.tr

Keywords
Ground granulated blast furnace slag
High-plasticity clay
Nano-SiO_2
Soil stabilization
Unconfined compressive strength

***How to cite:** UYSAL, F., TATLIOĞLU, E., MUT R., (2026). Time-Dependent Strength Development of CH Clay Stabilized with Ground Granulated Blast Furnace Slag and Nano-SiO_2. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 593-603.*

ABSTRACT

This study investigates the time-dependent effects of ground granulated blast furnace slag (GGBFS), nano-silica (NS), and their combined use (GGBFS+NS) on the unconfined compressive strength (UCS) of an artificially prepared high-plasticity clay (CH). A total of ten mixtures were prepared by incorporating 10%, 20%, 30%, and 40% GGBFS, 1.5% NS alone, and 1.5% NS combined with each GGBFS content into the artificial soil. The specimens were cured for 0, 7, 30, and 60 days, after which UCS tests were conducted. The results showed that GGBFS significantly improved the UCS at all contents and curing periods. The highest strength was obtained in the mixture containing 40% GGBFS after 60 days of curing, exhibiting an approximately 142% increase compared with the reference specimen at the same curing age. Although NS used alone enhanced the strength of the soil, its contribution was more limited than that of GGBFS. In the GGBFS+NS mixtures, strength development varied depending on curing duration and additive content. However, it was determined that NS did not provide an additional strength gain at high GGBFS contents.

1. GİRİŞ

Yüksek plastisiteli kil (CH) zeminler yüksek boşluk oranları, yetersiz kayma dayanımı özellikleri ve belirgin şişme potansiyelleri nedeniyle inşaat mühendisliği uygulamalarında sorun teşkil edebilir [1]. Bu zeminler hem inşaat aşamasında hem de yapıların hizmet ömrü boyunca taşıma gücü yetersizliği, oturma ve şişme gibi çeşitli sorunlara neden olabilir. Mühendislik açısından dikkat edilmesi gereken bu tür zeminleri iyileştirmek için ön yükleme, kompaksiyon, kimyasal stabilizasyon ve zemin değiştirme gibi çeşitli zemin iyileştirme teknikleri geliştirilmiştir [2-5] Bu tekniklerin seçimi ve uygulanabilirliği büyük ölçüde zemin koşulları ve proje gereksinimlerine bağlıdır [6].

Zemin iyileştirme yöntemlerinden, zemin stabilizasyonu uzun yıllardır kullanılan ve yeni nesil malzemeler ile gelişime açık bir yöntemdir. Yöntem, zemine çimento esaslı bağlayıcı malzemelerin eklenmesiyle zeminin mekanik ve hidrolik özelliklerinin sistematik olarak iyileştirilmesi esasına dayanır. Çoğu zaman uygun maliyetli bir zemin iyileştirme tekniği olan stabilizasyon, çeşitli inşaat mühendisliği uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [7]. Çimento ile zemin stabilizasyonu uzun süredir uygulanan bir yöntemdir. Geçmişten günümüze yürütülen çok sayıda çalışmada, zemin özelliklerini iyileştirmede çimentonun etkinliği araştırılmıştır [8-12] Yumuşak zeminlerin lif ve çimento katkılarıyla stabilizasyonuna yönelik çalışmalar, çimento ilavesinin karışım mukavemetini artırırken davranışı gevrekleştirdiğini, lif kullanımının ise mikro çatlakları sınırlayarak sünekliği artırdığını göstermektedir [13,14]. Çimentoya benzer şekilde kireç de zemin stabilizasyonunda mekanik özelliklerin iyileştirmesi amacıyla kullanılmaktadır [15-17]. Bununla birlikte, çimento ve kireç gibi kalsiyum bazlı stabilizatörlerin kullanımı, yüksek enerji gereksinimi ve CO_2 emisyonları nedeniyle ekonomik ve çevresel açıdan dezavantajlar oluşturmaktadır [18]. Bu durum, çimento ve kireç gibi geleneksel bağlayıcıların karbon ayak izinin azaltılmasını ve çevre dostu alternatif stabilizatörlerin kullanımını önemli hale getirmiştir [19]. Bu kapsamda çeşitli endüstriyel yan ürünler ve atıklar sürdürülebilir zemin iyileştirme uygulamaları açısından çevre dostu bağlayıcılar olarak değerlendirilmektedir. Demir üretiminin yan ürünü olan yüksek fırın cürufu (YFC), içeriğindeki silika ve alümina nedeniyle puzolanik özelliklere sahiptir [20]. Puzolanik malzemeler alkali bir ortamda çimento benzeri yapılar oluştururlar. Bu nedenle, YFC zemin stabilizasyonunda çimento ikamesi olarak kullanılabilir [21-24]. Son yıllarda literatürde, YFC'nin zemin stabilizasyonunda puzolanik malzeme olarak etkisini araştıran çalışmalar bulunmaktadır [25,26].

Günümüzde, nanomalzemeler bir çok alanda olduğu gibi inşaat mühendisliğinin çeşitli alanlarında da önem kazanmıştır. Nano katkıların zemin stabilizasyonunda kullanımı, özellikle mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde dikkat çekmektedir [27]. Nano-SiO_2 (NS), nano katkılar arasında en yaygın kullanılanlardan biri olup, zemine ilavesiyle gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sonucunda zeminin bileşiminde ve mikro yapısında önemli değişikliklere yol açmaktadır [28].

Zemin stabilizasyonunda kullanılan bağlayıcılar tek başına kullanılabileceği gibi farklı bağlacılar ile birlikte de uygulanabilir [29,30]. Bu tür kullanımlarda katkı malzemelerinin birlikte oluşturduğu etkinin her bir malzemenin ayrı ayrı kullanımına kıyasla daha fazla etki sağlayıp sağlamadığı durumu araştırılmaktadır. Bu çalışmada, NS'nin YFC ile birlikte kullanılmasıyla malzemelerin olası etkileşimlerinin sağlanması ve daha yoğun bir mikro yapı sayesinde stabilize zeminin zamana bağlı dayanım performansının arttırılması hedeflenmiştir. NS ve YFC katkılarının zemin stabilizasyonundaki bireysel etkileri literatürde yaygın olarak araştırılmış olmasına rağmen, bu katkıların yüksek plastisiteli killerde birlikte kullanımının zamana bağlı dayanım gelişimi üzerindeki etkileri henüz yeterince açıklığa kavuşturulamamış olup, bu durum konuya ilişkin önemli bir araştırma boşluğunun varlığına işaret etmektedir. Literatürde zemin stabilizasyonuna yönelik yapılan çalışmalar incelendiğinde, YFC'nin genellikle kireç, uçucu kül ve zeytin külü gibi katkı malzemeleriyle birlikte kullanıldığı görülmektedir [31-33] Buna karşılık, yüksek reaktiviteye sahip yeni nesil bir nano katkı malzemesi olan NS'nin YFC ile birlikte kullanımını inceleyen çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu konuda gerçekleştirilen az sayıdaki çalışmadan biri olan Uysal ve Yılmaz [34], CH sınıfı killerin YFC ve NS ile stabilizasyonunda konsolidasyon davranışı, sıkışabilirlik ve şişme özelliklerini incelemiş ve hibrit katkı kullanımının hacimsel stabiliteyi iyileştirdiğini göstermiştir. Bununla birlikte, literatürdeki çalışmaların çoğunlukla 28 günlük kür süreleriyle sınırlı kaldığı ve benzer stabilizasyon sistemlerinde uzun dönem mukavemet gelişimi ile dayanım kazanım mekanizmalarına ilişkin bilgilerin halen yetersiz olduğu görülmektedir [35]. Ayrıca, literatürdeki araştırmalar ağırlıklı olarak düşük plastisiteli killer veya killi kum zeminler üzerine yoğunlaşmış olup en problemli zemin gruplarından biri olan CH sınıfı killerin stabilizasyonu ise nispeten daha az araştırılmıştır. Bu nedenle, yüksek plastisiteli CH sınıfı killerde YFC ve NS katkılarının tekil ve

birlikte kullanımının farklı kür sürelerindeki dayanım performansının araştırılması, mevcut literatürdeki bilgi eksikliğinin giderilmesi açısından önem taşımaktadır. Bu çalışmada, laboratuvar ortamında yapay olarak oluşturulan yüksek plastisiteli kil zeminde YFC, NS ve YFC+NS katkılarının serbest basınç dayanımı üzerindeki zamana bağlı etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Yapay zemine (YZ) %10, %20, %30 ve %40 oranlarında YFC, yalnızca NS ve ayrıca tüm YFC oranları ile birlikte %1.5 NS ilave edilerek toplam on farklı karışım hazırlanmıştır. Tüm karışımlar 0, 7, 30 ve 60 günlük küre bırakılarak kür sonrasındaki dayanımları tespit edilmiştir. YFC ve NS katkılarının ayrı ayrı kullanılması durumunda tüm karışımlar ve kür sürelerinde dayanımların belirgin şekilde arttığı görülmüştür. Bununla birlikte, YFC ve NS'nin birlikte kullanımında, incelenen tüm karışım oranları ve kür süreleri boyunca elde edilen ek dayanım kazancının sınırlı kaldığı belirlenmiştir.

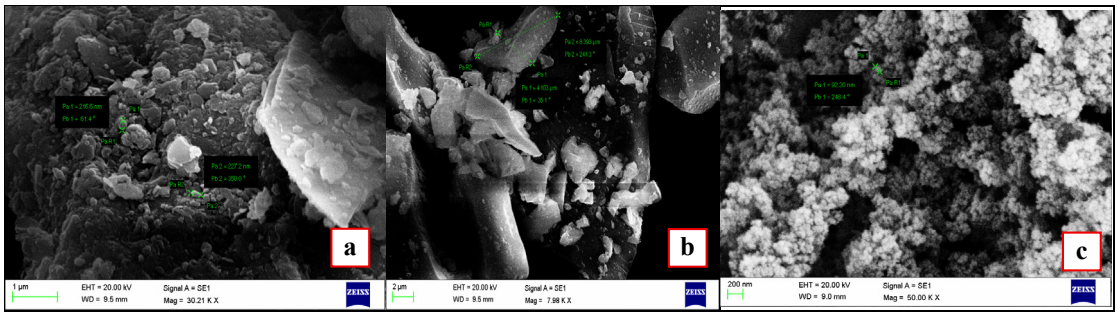
2. MALZEME ÖZELLİKLERİ VE YÖNTEM

2.1. Malzeme Özellikleri

Deneysel çalışmalarda homojen ve tutarlı özelliklerde numune elde etmek amacıyla, laboratuvar koşullarında USCS'ye göre yüksek plastisiteli kil (CH) olarak sınıflandırılan yapay zemin (YZ) oluşturulmuştur. Bu amaçla ticari olarak temin edilen Na-bentonit (%25) ve kaolen (%75) homojen biçimde karıştırılmıştır. Bu karıştırma oranları istenen özelliklere sahip zemini oluşturmak için çeşitli denemeler sonucunda belirlenmiştir. Yapay zemin kullanımı, doğal zeminlerde görülebilen mineralojik yapı, organik madde içeriği ve gözenek suyu kimyasından kaynaklanan değişkenlikleri en aza indirerek katkı malzemelerinin etkilerinin kontrollü ve tekrarlanabilir koşullar altında değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. TS1900-1 [36]' e göre YZ'nin plastik limiti %24.11, likit limiti %106.5 olarak tespit edilmiştir. Bu değerlere göre plastisite indisi değeri 82.39 olarak hesaplanmıştır. Çalışmada, yüksek özgül yüzeyi ve mikro yapısal iyileştirme etkisinden faydalanmak için NS stabilizatör olarak tek başına ve YFC ile birlikte kullanılmıştır. YFC, İskenderun'da bulunan Çimsa Beton Tesislerinden temin edilmiştir (Şekil 1). YZ, YFC ve NS'nin deneyler öncesindeki mikro yapısını, dane görüntüsünü ve boşluk yapısını tespit etmek için SEM (Taramalı Elektron mikroskobu) analizleri yapılmıştır (Şekil 2). Malzemelerin birim hacim ağırlıklarının tespiti için ise piknometre deneyleri yapılarak YZ ve YFC'nin birim hacim ağırlıkları sırası ile 25.18 kN/m^3 ve 27.96 kN/m^3 olarak tespit edilmiştir.

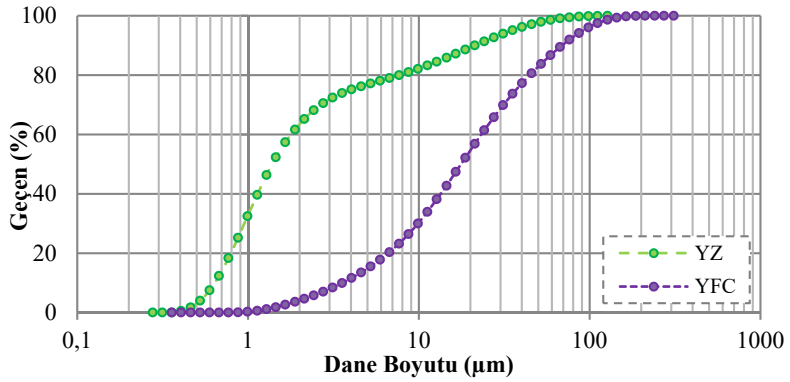


Şekil 1. YZ bileşenleri ve YFC'nin görüntüsü

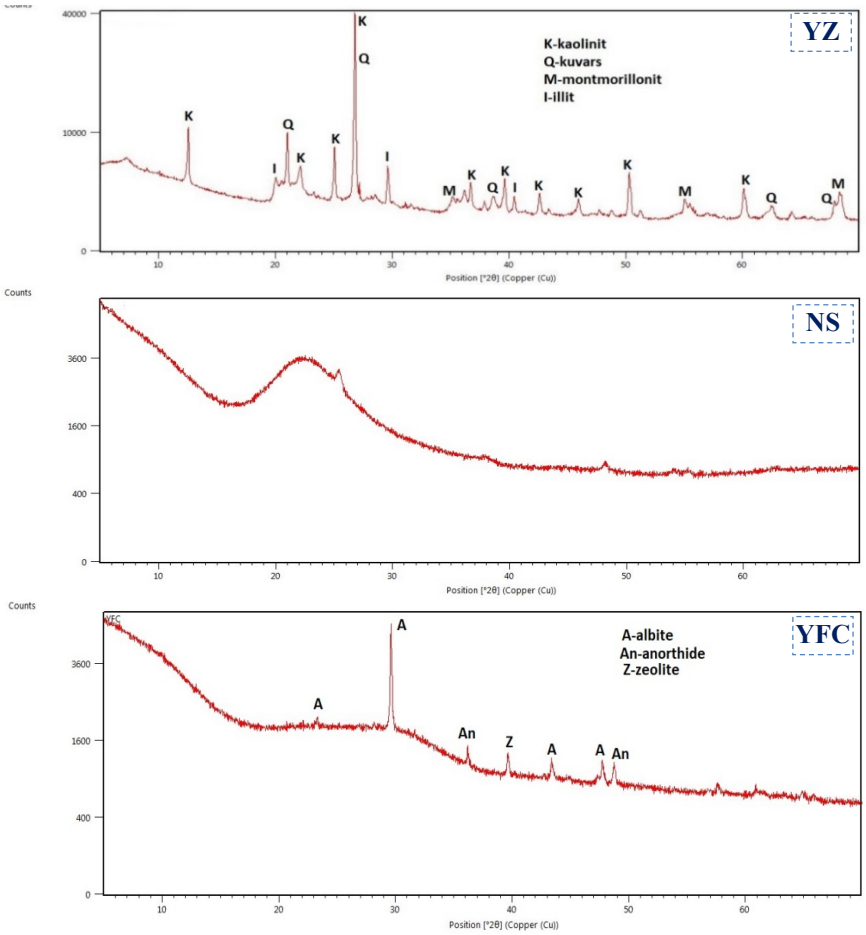


Şekil 2. YZ (a), YFC (b) ve NS (c)'nin deney öncesi SEM görüntüleri

YZ ve YFC'nin dane dağılımını belirlemek için lazer kırınım, malzemelerin kimyasal bileşimini tespit etmek için ise XRF (X-Ray Fluorescence) analizleri yapılmıştır (Şekil 3, Çizelge 1). YZ, YFC ve NS'nin deney öncesindeki kristal faz bileşenleri ve mineralojik özelliklerini belirlemek amacıyla XRD (X ışınları kırınımı) analizleri yapılmıştır (Şekil 4). XRD analizi sonucunda YZ'nin kaolenit (K), kuvars (Q), montmorillonit (M) ve illit (I) minerallerince yoğun içeriğe sahip olduğu görülmüş ve bu mineral bileşimlerinin yüksek plastisiteli kil özelliklerine sahip olduğu deneyler yapılmadan önce doğrulanmıştır. NS deseni tipik bir form vererek geniş amorf bir kubbe göstermiş ve kristal faz piklerini çok az sayıda içermiştir. YFC'de ise albite (A), anortit (An) ve zeolit türü fazların (Z) az belirgin pikleri izlenmektedir. XRD grafiği, YFC'nin geniş bir amorf kubbe sergileyerek önemli ölçüde cam fazı içerdiğini ve puzolanik reaksiyonlar için reaktivitesinin yüksek olduğunu vermektedir. Bu sonuçlar, YZ'nin zayıf zemini temsil etmesi için istenen özelliklere sahip olduğunu, YFC ile NS'nin de beklenen bağlayıcı reaksiyonlar için uygun fazlara sahip olduğunu vermektedir.



Şekil 3. YZ ve YFC'nin dane dağılım eğrileri



Şekil 4. YZ, NS ve YFC'nin XRD sonuçları

Çizelge 1. YZ, YZ bileşenleri ve YFC'nin kimyasal içeriği

İçerik	YZ (%)	Na-bentonit (%)	Kaolen (%)	YFC (%)
SiO_2	77.307	64.767	80.503	36.820
Al_2O_3	15.768	18.650	15.589	13.301
Fe_2O_3	1.530	4.759	0.685	0.740
CaO	2.565	4.202	1.826	38.834
MgO	0.919	2.350	0.311	5.636
K_2O	0.523	1.496	0.390	0.765
TiO_2	0.380	0.473	0.302	0.761
SO_3	0.112	0.063	0.134	0.586
Mn_3O_4	0.052	0.136	0.005	1.870
Na_2O	0.560	2.725	0.058	-
BaO	0.026	0.081	0.076	0.001
P_2O_5	0.220	0.153	0.090	0.009
SrO	0.038	0.104	0.023	0.018

2.2. Yöntem

Bu çalışmada, yüksek plastisiteli bir zeminde YFC, NS ve YFC+NS katkılarının dayanımdaki zamana bağlı etkileri araştırılmıştır. YFC katkılı (%10-40), NS katkılı (%1.5) ve YFC+NS katkılı olmak üzere on farklı karışım oluşturulmuştur (Çizelge 2). NS katkı oranı, literatürde yüksek plastisiteli zeminlerin stabilizasyonunda kullanılan ve etkili sonuçlar verdiği bildirilen %1.5 olarak seçilmiştir [37]. Oluşturulan karışımlardaki oranlar ağırlıkça yüzde değerlerine karşılık gelmekte olup, toplam karışım YZ ile %100 olacak şekilde düzenlenmiştir. Deneyler öncesinde deneylerde kullanılan malzemeler için SEM, XRD, XRF, Piknometre ve lazer kırınım analizleri yapılmıştır. Hazırlanan karışımlara ASTM D698-78A [38] standardına uygun olarak standart proktor deneyleri yapılmış ve karışımların optimum su muhtevası (w_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) değerleri tespit edilmiştir (Çizelge 3). Bu değerler, çalışmanın esas deneyi olan serbest basınç deney numuneleri hazırlamak için kullanılmıştır.

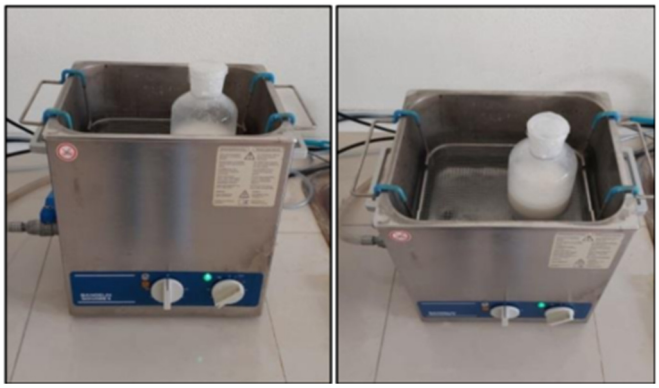
Çizelge 2. Deney karışımları ve kür süreleri

Karışım no	YFC (%)	NS (%)	Kür süresi (gün)
1	-	-	0, 7, 30, 60
2	10	-	0, 7, 30, 60
3	20	-	0, 7, 30, 60
4	30	-	0, 7, 30, 60
5	40	-	0, 7, 30, 60
6	-	1.5	0, 7, 30, 60
7	10	1.5	0, 7, 30, 60
8	20	1.5	0, 7, 30, 60
9	30	1.5	0, 7, 30, 60
10	40	1.5	0, 7, 30, 60

Serbest basınç deney numuneleri optimum su muhtevasında hazırlanarak maksimum yoğunlukta olacak şekilde hazırlanmıştır. Numuneler bu amaç için geliştirilmiş silindirik çelik numune hazırlama kalıplarında oluşturulmuştur (Şekil 5). NS'nin doğrudan zemine katılması durumunda zemin içinde homojen dağılması zorlaşacağından, NS'nin su içinde çözelti haline getirilerek zemine katılması tercih edilmiştir. Bu amaçla çözeltinin homojenliği ultrasonik banyo kullanarak sağlanmıştır (Şekil 6). Numunelerin Çizelge 2'de verilen 0, 7, 30 ve 60 günlük kür sürelerinde su kaybını önlemek ve sabit kür koşullarını sağlamak amacıyla numuneler kür süresince desikatörde bekletilmiştir (Şekil 7).



Şekil 5. Silindirik numune hazırlama aşamaları

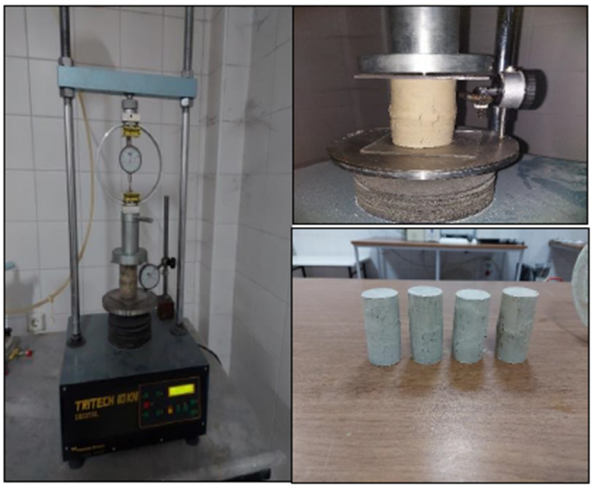


Şekil 6. NS süspansiyonunun ultrasonik banyoda oluşturulması



Şekil 7. Kür sürecince numunelerin saklandığı desikatör

Çizelge 2'de verilen karışımlar için ASTM D2166 [39] standardına uygun olarak serbest basınç deneyleri yapılmıştır (Şekil 8). Her bir karışım için dört adet deney numunesi hazırlanmıştır. Bu numunelerin 0, 7, 30 ve 60 günlük kür sonrası performansları değerlendirilmiştir. Bu kapsamda yapılan deneyler kontrollü olarak yürütülmüştür.



Şekil 8. Serbest basınç deney düzeneği ve numune görünümü

2.3. Ön Araştırmalar

Standart proktor deneyleri, serbest basınç deney numunelerini hazırlamak amacıyla yapıldığından öncelikle YFC ve NS'nin sıkışmaya etkisi değerlendirilmiştir (Çizelge 3). Elde edilen sonuçlara göre, YZ'ye artan oranlarda YFC eklendiği zaman w_{opt} değerleri düşerken, γ_{kmax} değerleri artmıştır. Bu durum, dane boyutu YZ'ye göre daha büyük olan YFC'nin zeminin su alma yeteneğini azaltması ve YFC'nin YZ'ye göre daha yüksek yoğunluğa sahip olması nedeniyle karışımın yoğunluğunun artırması şeklinde yorumlanabilir. YZ'ye %1.5 oranında NS eklendiği zaman NS'nin yüksek özgül yüzeyi nedeniyle zeminin ihtiyaç duyduğu su artarak w_{opt} değerleri artmıştır. Ayrıca, YZ'ye göre düşük yoğunluğa sahip NS, γ_{kmax} değerlerinin azalmasına neden olmuştur. YFC ve NS'nin birlikte kullanıldığı karışımlarda, NS'nin artan su ihtiyacı ve düşük yoğunluk etkisi ile YFC'nin sıkışmayı arttırıcı etkileri yalnızca YFC kullanılan veya NS içeren karışımlara göre birim hacim ağırlık değerlerinin orta düzeyde kalmasına neden olmuştur.

Çizelge 3. Deney karışımlarının standart proktor deney sonuçları

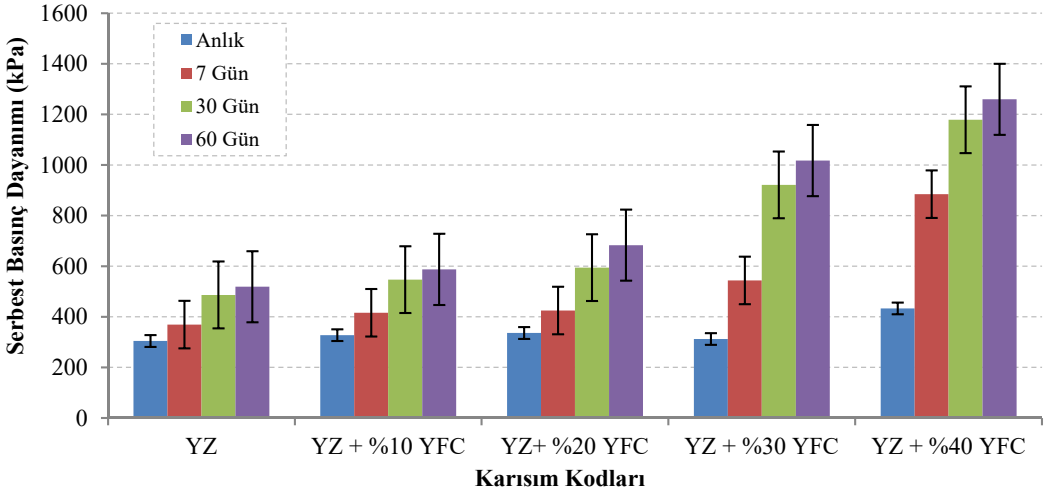
Karışım no	w_{opt} (%)	γ_{kmax} (kN/m^3)
1	23.78	15.79
2	22.62	15.89
3	22.26	15.99
4	21.44	16.68
5	20.80	16.78
6	26.38	14.96
7	25.72	15.22
8	25.02	15.37
9	24.07	15.78
10	23.81	15.91

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

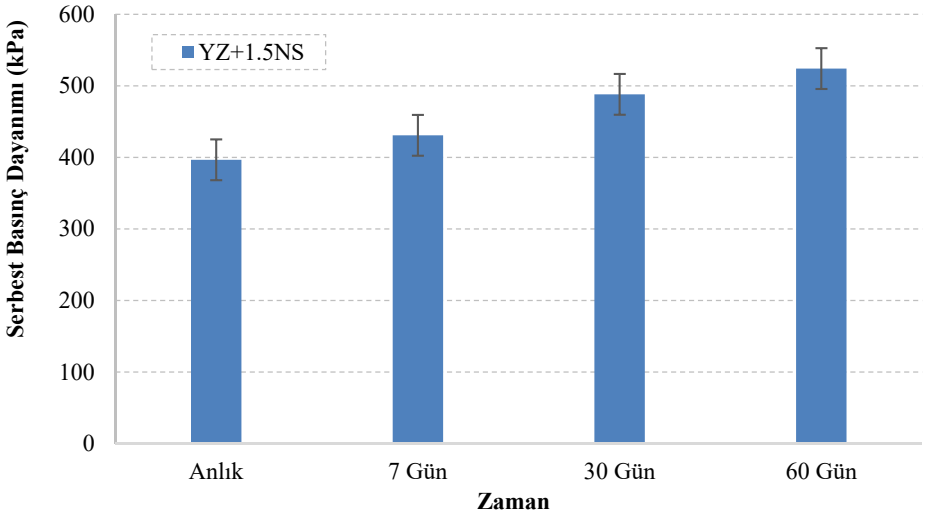
Deneysel programın başlangıcında, referans numune (YZ) için herhangi bir katkı ilavesi yapılmadan anlık dayanım değeri 304.36kPa olarak tespit edilmiştir. Deneylerin ilk serisinde YZ'ye %10, %20, %30 ve %40 oranlarında YFC eklenerek zamana bağlı dayanım değerleri tespit edilmiştir (Şekil 9). Her bir YFC oranının zamana bağlı etkisi incelendiğinde, kür süresi arttıkça dayanımın da arttığı görülmüştür. Özellikle 30 günlük kür ile dayanımdaki artış belirgindir. YFC oranları ve kür sürelerine göre en iyi performans 60 günlük kür sonrasında %40YFC'de görülmüştür. 60 günlük kür sonunda %40 YFC katkılı numunede yaklaşık 1260 kPa dayanım elde edilmiş olup, bu değer referans numunenin anlık dayanımına göre yaklaşık %314'lük bir artışa karşılık gelmektedir.

İkinci seri deneylerde YZ'ye sadece %1.5NS eklenerek zamana bağlı dayanım performansları araştırılmıştır (Şekil 10). Elde edilen sonuçlara göre %1.5NS oranında dayanımın zamana bağlı arttığı tespit edilmiştir. 60 günlük kür sonunda dayanım yaklaşık 525 kPa'ya ulaşmış ve referans numunenin anlık dayanımına göre

yaklaşık %73 oranında artış göstermiştir. Elde edilen sonuçlar sadece YFC katkısı ile elde edilen deneyler ile karşılaştırıldığında, özellikle uzun kürlerde (30 ve 60 gün) NS katkısının görece daha az etkili olduğu görülmüştür. Ancak, referans numuneye göre az miktarda NS katkısının dayanımda artışa neden olduğu belirlenmiştir.



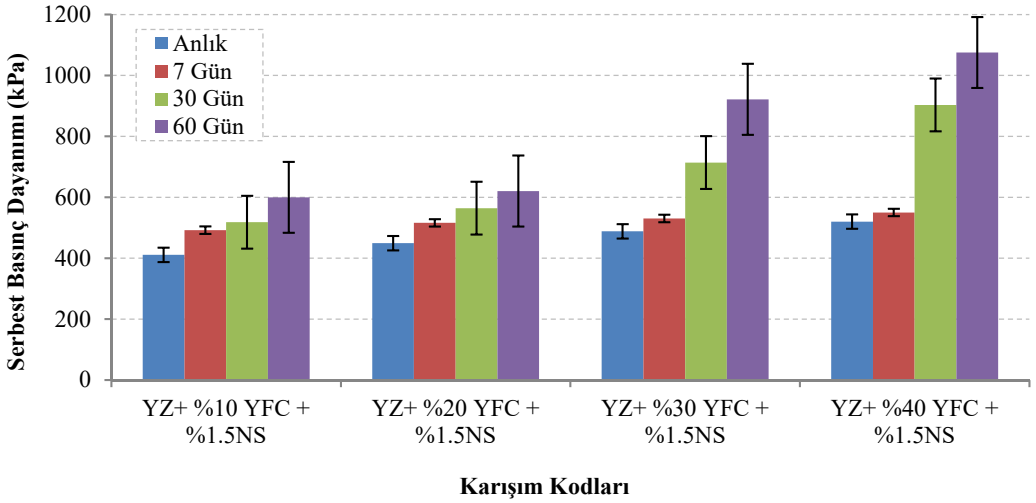
Şekil 9. Farklı YFC oranları ile dayanımın zamana bağlı değişimi



Şekil 10. %1.5NS ile dayanımın zamana bağlı değişimi

Son seri deneylerde %10-%40YFC oranları %1.5 NS katkısı ile birlikte kullanılarak dayanım değerlerinin 0, 7, 30 ve 60 günlük kürleri sonrasındaki değişimi değerlendirilmiştir (Şekil 11). Tüm karışım oranlarında zamana bağlı dayanımın arttığı görülmüştür. Anlık ve 7 günlük dayanım değerlerinde artış sınırlı iken, 30 ve 60 günlük değerde belirgin bir artış görülmektedir. Bu durum zeminde gerçekleşen reaksiyonların zamana bağlı olarak ilerlediğini göstermektedir. YFC+NS karışımları içerisinde en yüksek dayanım değeri 60 günlük kür sonunda %40YFC+%1.5NS karışımında yaklaşık 1075 kPa olarak elde edilmiş olup, bu değer referans numunenin anlık dayanımına göre yaklaşık %253'lük bir artışa karşılık gelmektedir. YFC ile NS'nin birlikte kullanımı ile sadece YFC kullanılan karışımların performansları karşılaştırıldığında %1.5NS katkısının tüm oranlar ve kürlerde dayanımı arttığı söylenemez. Düşük ve orta YFC oranlarında (%10-30), erken ve orta yaşlarda (0-30gün) NS içeren karışımların çoğu benzer ya da nispeten daha fazla dayanım sergilemiştir. Ancak %40 YFC içeriğinde ileri yaşlarda (60gün) NS ilavesi dayanımın düşmesine neden olmuştur. Bu durumun, NS'nin yüksek özgül yüzey alanına bağlı olarak karışımın su gereksinimini artırması ve bunun sonucunda işlenebilirlik ile kompaksiyon verimliliğinin değişmesiyle ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, hem YFC'nin hem de NS'nin dayanım gelişimine katkı sağladığı belirlenmiştir. Ancak iki malzemenin birlikte kullanımının tüm oran ve kür sürelerinde ek bir dayanım artışı sağlamadığı, etkinin belirli karışım oranları ve kür koşullarında daha belirgin hale geldiği görülmüştür. YFC dayanım artışında baskın bir rol oynarken, NS katkısının etkisi oran ve kür süresine bağlı olarak değişmektedir. Tüm deney sonuçları birlikte değerlendirildiğinde optimum karışımın %40YFC olduğu, bu karışımın hem en yüksek dayanım değerini sağlaması hem de YFC+NS karışımlarına kıyasla daha yüksek performans göstermesi nedeniyle en etkili stabilizasyon alternatifi olduğu belirlenmiştir.



Şekil 11. Farklı YFC oranları ve %1.5NS ile dayanımın zamana bağlı değişimi

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, yapay olarak oluşturulan CH sınıfı kil zemine dört farklı oranda (%10-40) YFC, %1.5 oranında NS ve tüm YFC oranları ile birlikte %1.5NS katkıları eklenerek serbest basınç dayanımının 0, 7, 30 ve 60 günlük kür süresi sonundaki değişimi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre YFC ve NS katkılarının tüm kür sürelerinde dayanımın arttırılmasına olumlu katkı sağladığı görülmüştür. Çalışma sonunda ulaşılan başlıca bulgular aşağıda özetlenmektedir.

- YFC, tüm oran ve kür sürelerinde serbest basınç dayanımını artırmıştır. Bu artış özellikle %30 ve %40 YFC içeren karışımların 30 ve 60 günlük dayanım artışında daha belirgindir. En yüksek dayanım değeri 60 günlük kür sonunda %40 YFC içeren karışımda elde edilmiş ve referans numunenin anlık dayanımına göre yaklaşık %314 oranında artış sağlamıştır. Bu durum YFC etkili bağlayıcıların zamanla daha etkili olduğunu göstermektedir.
- Yalnızca NS içeren karışımlarda ölçülen dayanım değerlerinin referans zemine kıyasla artmış olduğu, ancak bu artışın YFC katkısına göre nispeten daha sınırlı kaldığı belirlenmiştir. %1.5 NS katkılı numunelerde 60 günlük kür sonunda dayanım yaklaşık %73 oranında artmıştır.
- YFC ve NS'nin birlikte kullanıldığı karışımlarda dayanım gelişimi oran ve kür süresine bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Bazı karışım oranlarında ek dayanım artışı gözlenmiş olmakla birlikte, özellikle yüksek YFC içeriklerinde NS katkısının ek bir dayanım kazancı sağlamadığı durumlar tespit edilmiştir. YFC+NS karışımları içerisinde en yüksek dayanım değeri 60 günlük kür sonunda %40YFC+%1.5NS karışımında elde edilmiş ve referans numunenin anlık dayanımına göre yaklaşık %253 oranında artış sağlamıştır.
- NS katkısının sınırlı kaldığı durumların, NS'nin yüksek özgül yüzey alanına bağlı olarak karışımın su gereksinimini artırması ve kompaksiyon verimliliğini etkileyebilmesi ile ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir.
- Kür süresinin artması ile tüm karışımlarda dayanım artışı sağlanmıştır. En yüksek dayanım değerleri 60 günlük kür sonunda elde edilmiştir. Bu durum, reaksiyon ürünlerinin zamanla geliştiğini ve matris yapısının daha kompakt hale geldiğini göstermektedir.

Sonuçlar, yüksek plastisiteli kil zeminlerin stabilizasyonunda en uygun katkı oranının %40 YFC olduğunu ortaya koymuştur.

5. KAYNAKLAR

1. Matajinimvar, S., Choobbasti, A.J. & Soleimani Kutanaei, S. (2025). The effect of construction moisture content on the mechanical, shear and environmental characteristics of clay stabilized with cement and CS: A micro and macro study. *Case Studies in Construction Materials, 22*, e04818.

2. Barman, D., Dash, S.K. (2022). Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 14*, 1319-1342.

3. Furlan, A.P., Razakamanantsoa, A., Ranaivomanana, H., Levacher, D. & Katsumi, T. (2018). Shear strength performance of marine sediments stabilized using cement, lime and fly ash. *Construction and Building Materials, 184*, 454-463.

4. Li, J., Yang, K., Wang, Y., Chen, R. & Chen, Y. (2023). Centrifuge modeling of seismic response of slope on partially replaced soft soil ground. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 165*, 107669.

5. Morales, L., Romero, E., Jommi, C., Garzón, E. & Giménez, A. (2015). Feasibility of a soft biological improvement of natural soils used in compacted linear earth construction. *Acta Geotechnica, 10*, 157-171.

6. Liu, C., Zhang, Q., Zhao, C., Deng, L. & Fang, Q. (2023). Assessment of strength development of soil stabilized with cement and nano SiO_2. *Construction and Building Materials, 409*, 133889.

7. Li, N., Zhu, Q., Wang, W., Song, F., An, D. & Yan, H. (2019). Compression characteristics and microscopic mechanism of coastal soil modified with cement and fly ash. *Materials, 12*, 3182.

8. Horpibulsuk, S., Bergado, D.T. & Lorenzo, G.A. (2004). Compressibility of cement-admixed clays at high water content. *Géotechnique, 54*, 151-154.

9. Horpibulsuk, S., Miura, N. & Bergado, D.T. (2004). Undrained shear behavior of cement admixed clay at high water content. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130*, 1096-1105.

10. Chew, S.H., Kamruzzaman, A.H.M. & Lee, F.H. (2004). Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130*, 696-706.

11. Moses, G.G. & Rao, S.N. (2009). Strength behavior of cemented marine clay subjected to storm type loading. *Marine Georesources and Geotechnology, 27*, 1-16.

12. Xiao, H.W. & Lee, F.H. (2008). Curing time effect on behavior of cement treated marine clay. *World Academy of Science, Engineering and Technology, 43*, 144-151.

13. Consoli, N.C., Prietto, P.D.M. & Ulbrich, L.A. (1998). Influence of fiber and cement addition on behavior of sandy soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124*, 1211-1214.

14. Liu, C. & Starcher, R.D. (2012). Effects of curing conditions on unconfined compressive strength of cement- and cement-fiber-improved soft soils. *Journal of Materials in Civil Engineering, 25*, 1134-1141.

15. Afrin, H. (2017). A review on different types soil stabilization techniques. *International Journal of Transportation Engineering and Technology, 3*, 19-24.

16. Pongsivasathit, S., Horpibulsuk, S. & Piyaphipat, S. (2019). Assessment of mechanical properties of cement stabilized soils. *Case Studies in Construction Materials, 11*, e00301.

17. Bağrıaçık, B. (2017). Ulaşım yapıları temel/alt temel zeminlerinin kireçle stabilizasyonu. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 32*(1), 39-48.

18. Manaviparast, H., Cristelo, N., Pereira, E. & Miranda, T. (2025). A comprehensive review on clay soil stabilization using rice husk ash and lime sludge. *Applied Sciences, 15*(5), 2376.

19. Gupta, S. & Kumar, S. (2024). Mechanical and microstructural analysis of soft kaolin clay stabilized by GGBS and dolomite-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 421.

20. Sun, Z., Chen, W.B., Zhao, R.D., Shen, P., Yin, J.H. & Chen, Y.G. (2023). Effect of seawater on solidification/stabilisation treatment of marine soft soil slurry by lime-activated ISSA and GGBS. *Engineering Geology, 323*, 107216.

21. Taslimi Paein Afrakoti, M., Janalizadeh Choobbasti, A., Ghadakpour, M. & Soleimani Kutanaei, S. (2020). Investigation of the effect of the coal wastes on the mechanical properties of the cement-treated sandy soil. *Construction and Building Materials, 239*, 117848.

22. Kutanaei, S.S., Afrakoti, M.T.P. & Choobbasti, A.J. (2021). Effect of coal waste on grain failure of cement-stabilized sand due to compaction. *Arabian Journal of Geosciences*, 14.

23. Yoobanpot, N. & Jamsawang, P. (2014). Effect of cement replacement by rice husk ash on soft soil stabilization. *Kasetsart Journal* (*Natural Science), 48*(2), 323-332.

24. Laguna-Torres, C.A., González-López, J.R., Guerra-Cossío, M., Guerrero-Baca, L.F., Chávez-Guerrero, L., Figueroa-Torres, M.Z. & Zaldívar-Cadena, A.A. (2024). Effect of physical, chemical, and mineralogical properties for selection of soils stabilized by alkaline activation of a natural pozzolan for earth construction techniques such as compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 419.

25. Mohan, N.M., Reddy, G.S., Jyothirmayee, S., Reddy, B.L.N., Reddy, N.M. & Rafi, V. (2026). Investigation of the mechanical and microstructural properties of black cotton soil stabilized with industrial wastes. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 35*, 101756.

26. Soğancı, A.S., Yenginar, Y. & Orman, A. (2023). Geotechnical properties of clayey soils stabilized with marble dust and granulated blast furnace slag. *KSCE Journal of Civil Engineering, 27*, 4622-4634.

27. Kulkarni, P.P. & Mandal, J.N. (2022). Strength evaluation of soil stabilized with nano silica-cement mixes as road construction material. *Construction and Building Materials, 314*, 125363.

28. Kannan, G. & Sujatha, E.R. (2022). A review on the choice of nano-silica as soil stabilizer. *Silicon, 14*, 6477-6492.

29. Şengül, T. ve Vitoşoğlu, Y. (2023). *Geoteknik mühendisliğinde yenilikçi araştırmalar.* Özgür Yayınları, Gaziantep.

30. Diab, A.S., Allam, A.A., Rudayni, H.A., Abdelfadil, K.M., Arman, H., Al Zoubi, W. & Abukhadra, M.R. (2026). Clay nanostructures in geotechnical engineering: A critical review of mechanisms, performance, and sustainable soil stabilization. *Materials Today Sustainability*, 101284.

31. Bilici, H., Okur, D. V., Türköz, M. ve Savaş, H. (2020). Kil zeminin dayanımı üzerinde uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılarının etkisi ve karşılaştırmalı analizi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9*(2), 910-919.

32. Wan, Y., Liu, W., Liu, X., Mai, Q., Li, H., Zhao, P., Zhang, J. & Xu, S. (2026). Activation methods and performance of steel slag–granulated blast furnace slag cementitious materials: A review. *Case Studies in Construction Materials*, e05840.

33. Uysal, F., Yılmaz, V. ve Topçu, H.M. (2020). Farklı atık malzemeler ile stabilize edilmiş ince daneli zeminin mühendislik özellikleri. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *35*(1), 19-26.

34. Uysal, F. & Yılmaz, V. (2026). Synergistic effects of ground granulated blast furnace slag and nano-silica on the consolidation, compressibility and microstructural behavior of high plasticity clay. *Scientific Reports, 16*, 6548.

35. Yeşiltepe, Ö. (2026). Kumlu zemin stabilizasyonunda zeytin külü ve yüksek fırın cürufu kullanımı: Serbest basınç dayanımının deneysel ve makine öğrenmesi ile tahmini. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *16*, 1-9.

36. TS 1900-1. (2006). *İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri – Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini.* Türk Standartları Enstitüsü.

37. Ai, X., Luo, F., Ma, W., Qi, Y. & Zhu, Z. (2025). The study on the dynamic deformation characteristics of loess reinforced by nano-silica based on shakedown theory. *Construction and Building Materials*, *458*, 139546.

38. ASTM D698-78A. (2000). *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort* (12 400 Ft-Lbf/Ft³ 600 KN-m/M³).

39. ASTM D2166. (2016). *Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil.* ASTM International, West Conshohocken.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

Yerel Zemin Etkisinin Farklı Yaklaşımlarının Sismik Tehlike Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi: Sakarya Örneği

Elif TOPLU [1,a], **Osman KIRTEL** [1,b]

[1]*Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0001-8019-560X; [b]**ORCID**: 0000-0001-6451-0323*

Makale Bilgileri
Geliş : 14.05.2025
Kabul : 11.08.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665276

Sorumlu Yazar
Elif TOPLU
eliftoplu@subu.edu.tr

Anahtar Kelimeler
Deprem tehlikesi
Deprem spektrumu
Zemin büyütme faktörü
Deprem

***Atıf şekli:** TOPLU, E., KIRTEL, O., (2026). Yerel Zemin Etkisinin Farklı Yaklaşımlarının Sismik Tehlike Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi: Sakarya Örneği. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 605-622.*

ÖZ

Bu çalışmada, Sakarya ili için yerel zemin koşullarının olasılıksal sismik tehlike üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Analizlerde R-CRISIS 2015 yazılımı kullanılmış, sismik kaynak modeli olarak EMME2014, yer hareketi tahmin denklemi olarak ise NGA-West2 modelleri dikkate alınmıştır. İlk aşamada referans zemin koşulu (V_{s30}=760 m/s) için elde edilen sonuçlar TBDY 2018 tasarım spektrumları ile karşılaştırılmış, ardından ampirik zemin büyütme bağıntıları ve sahaya özgü ölçülmüş V_{s30} değerleri kullanılarak analizler tekrarlanmıştır. Sonuçlar, referans zemin koşulunda hesaplanan spektrumların TBDY 2018 ile genel olarak uyumlu olduğunu, ancak ampirik büyütme yöntemlerinin özellikle kısa periyot bölgesinde farklılıklar oluşturduğunu göstermiştir. Ölçülmüş V_{s30} değerlerinin kullanıldığı analizlerde, ZE sınıfı zeminlerde 1,0 s spektral ivme değerlerinde referans kaya koşuluna göre yaklaşık üç kata varan artışlar belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, doğrusal olmayan saha terimlerini kullanan güncel yer hareketi tahmin denklemlerinin yerel zemin etkisini ampirik büyütme yaklaşımlarına göre daha gerçekçi temsil edebildiğini ve sahaya özgü geoteknik verilerin deprem tehlikesi analizlerine dâhil edilmesinin önemini ortaya koymaktadır.

Evaluation of the Effects of Different Approaches to Local Site Effects on Seismic Hazard: A Case Study of Sakarya, Türkiye

Article Info
Received : 14.05.2025
Accepted : 11.08.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665276

Corresponding Author
Elif TOPLU
eliftoplu@subu.edu.tr

Keywords
Earthquake hazard
Earthquake spectrum
Soil amplification factor
Earthquake

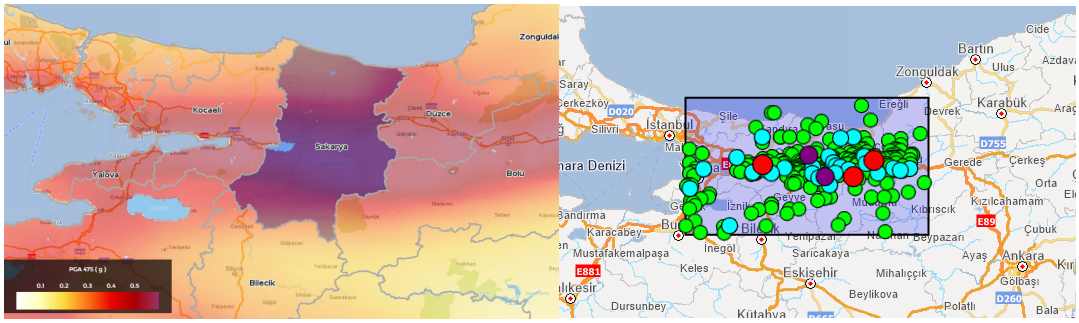
***How to cite:** TOPLU, E., KIRTEL, O., (2026). Evaluation of the Effects of Different Approaches to Local Site Effects on Seismic Hazard: A Case Study of Sakarya, Türkiye. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 605-622.*

ABSTRACT

In this study, the effect of local soil conditions on probabilistic seismic hazard was evaluated for Sakarya province. The R-CRISIS 2015 software was used for the analyses; the EMME2014 model served as the seismic source model, and NGA-West2 models were adopted as ground motion prediction equations. In the initial stage, results obtained for the reference soil condition (Vs30 = 760 m/s) were compared with the TBDY 2018 design spectra; subsequently, the analyses were repeated using empirical soil amplification correlations and site-specific measured Vs30 values. The results indicated that while the spectra calculated for reference soil conditions were generally consistent with TBDY 2018, the empirical amplification methods resulted in distinct spectral shapes, particularly in the short-period range. Analyses involving measured Vs30 values revealed increases of up to approximately three times the reference rock values for spectral accelerations at a period of 1.0 second on ZE-class soils. The comparisons demonstrated that modern ground motion prediction equations incorporating site terms provide a more comprehensive representation than empirical amplification methods alone, highlighting the importance of integrating site-specific geotechnical data into these analyses.

1. GİRİŞ

Sakarya ili, Marmara Bölgesi'nin Çatalca-Kocaeli yöresinde yer almakta olup, Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde bulunan, bol alüvyonlu ve tektonik kökenli bir ova yapısına sahiptir. Bu jeolojik özellikleri nedeniyle tarih boyunca birçok depreme maruz kalmış ve ciddi can ve mal kayıpları yaşamıştır [1]. Adapazarı Ovası'nda düşük kayma dalgası hızına sahip kalın alüvyon tabakalarının bulunması, yer hareketinin genliğini ve frekans içeriğini değiştirerek deprem talebinin mekânsal olarak farklılaşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle Sakarya'da deprem tehlikesinin değerlendirilmesinde yalnızca bölgesel sismik kaynakların değil, yerel zemin özelliklerinin de dikkate alınması büyük önem taşımaktadır [2]. Sakarya ili ve çevresinde 1900–2024 yılları arasında meydana gelen depremlere ilişkin veriler AFAD deprem kataloğundan alınmış ve görsel olarak sunulmuştur. Öte yandan, Türkiye'de Ulusal Deprem Araştırma Programı kapsamında, 2018 yılında AFAD tarafından Türkiye Deprem Tehlike Haritaları güncellenmiş ve bu süreçte olasılıksal yöntemler kullanılmaya başlanmıştır [3].



Şekil 1. AFAD deprem kataloğu [3]

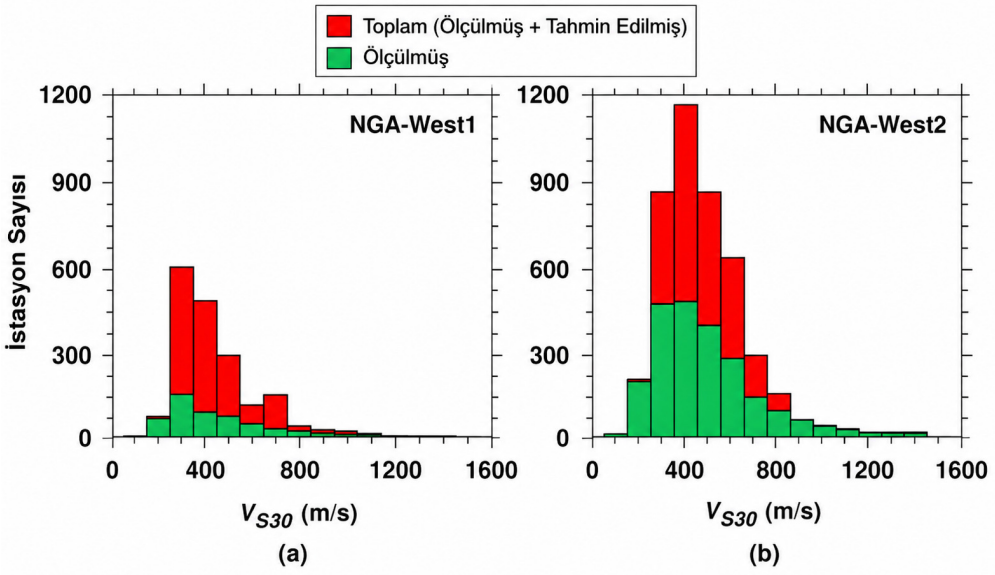
AFAD Türkiye Deprem Haritalarında referans zemin koşulu V_{S30}= 760 m/s kabul edilmekte ve zemin etkileri TBDY 2018 'de yerel zemin etki kat sayıları dikkate alınarak hesaba katılmaktadır. Yerel zemin etkileri ise Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde zemin sınıfına ve harita spektral ivme düzeyine bağlı olarak verilen yerel zemin etki katsayıları yardımıyla tasarım spektrumuna yansıtılmaktadır [4]. Bu yaklaşım mühendislik uygulamaları için pratik ve standartlaştırılmış bir çerçeve sağlamakla birlikte, aynı zemin sınıfında yer alan sahaların hız profili, tabaka kalınlığı, hakim periyodu ve doğrusal olmayan davranışı bakımından farklı özellikler gösterebilmesi nedeniyle yerel zemin etkisini belirli sınıflar üzerinden temsil etmektedir [5] .

Yerel zemin koşullarının kuvvetli yer hareketi üzerindeki etkisini temsil etmek amacıyla farklı ampirik ve yarı ampirik yaklaşımlar geliştirilmiştir. Joyner ve Fumal [6], ölçülen kayma dalgası hızları ile kuvvetli yer hareketlerinde gözlenen jeolojik saha etkileri arasında ampirik ilişkiler kurarak kayma dalgası hızına dayalı büyütme tahminlerinin temelini oluşturmuştur. Midorikawa [7], ortalama kayma dalgası hızını kullanarak yüzey zemin hareketi için bağıl büyütme katsayısı önermiş; Borcherdt ve arkadaşları [5] ise jeolojik birimlerin ve sığ tabakalardaki kayma dalgası hızlarının zemin büyütmesi üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu klasik bağıntılar, ayrıntılı dinamik zemin özelliklerinin bulunmadığı durumlarda zeminin üst kesimlerine ait ortalama kayma dalgası hızından hareketle yaklaşık bir büyütme katsayısı elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

Bununla birlikte, tek bir bağıl büyütme katsayısının bütün spektral periyotlara uygulanması, zemin davranışının frekansa ve yer hareketi şiddetine bağlı değişimini sınırlı biçimde temsil etmektedir. Yerel zemin büyütmesi yalnızca V_{S30} değerine değil; zemin tabakalarının kalınlığına, tabakalar arasındaki hız kontrastına, mühendislik ana kayasının derinliğine, hakim zemin periyoduna ve giriş yer hareketinin genliğine de bağlıdır [8]. Özellikle yumuşak zeminlerde güçlü yer hareketi altında kayma modülünün azalması ve sönümün artması nedeniyle zemin davranışı doğrusal olmaktan uzaklaşabilmektedir. Bu nedenle modern yer hareketi tahmin modellerinde saha etkileri, sabit bir büyütme katsayısı yerine periyoda, V_{S30} değerine ve referans kaya hareketinin şiddetine bağlı doğrusal ve doğrusal olmayan terimlerle ifade edilmektedir [9].

2013 yılında, Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (PEER), NGA-West1 [10] olarak adlandırılan aktif tektonik bölgelerdeki sığ kabuk depremleri için yeni nesil azalım ilişkileri geliştirmek

amacıyla büyük bir araştırma programı başlatmıştır. Proje, dünya çapında kaydedilen kapsamlı bir yer hareketi veri tabanı ve yatay yer hareketi için bir dizi yer hareketi tahmin denklemi elde edilmiş ve 2008 yılında sona ermiştir. Dünya çapında birçok araştırmacı, uygulayıcı ve kuruluş, araştırmadan sismik tasarım kodlarına, sahaya özel deprem tasarımı ve değerlendirmesine ve mali kayıp tahminine kadar geniş bir uygulama yelpazesi için NGA-West1 veri tabanını ve modellerini kullanmaktadır. NGA-West2 [11] projesi, orijinal NGA-West1 programında ele alınmayan bazı önemli yer hareketi sorunlarının giderilmesi ve NGA-West1 veri tabanının genişletilmesi amacıyla 2010 yılında başlamış ve 2014 yılında sona ermiştir. NGA-West2 kapsamında yer hareketinin yatay bileşeni için NGA-West1 yer hareketi tahmin denklemleri güncellenmiş, yer hareketi tahmin denklemleri tarafından tahmin edilen tepki spektrumlarının, referans %5 değeri dışındaki sönümleme değerlerine ölçeklendirmek için sönümleme modelleri geliştirilmiş, NGA-West2 yer hareketi tahmin denklemleri için epistemik belirsizlikler değerlendirilmiş, deneysel ve simülasyon tabanlı zemin büyütme modelleri için veri tabanı artırılmış [Şekil 2], ve NGA yer hareketi tahmin denklemleri ve standart yönetmeliklerde kullanılan zemin etki katsayıları arasındaki tutarsızlıkların giderilmesi amaçlanmıştır [11].



Şekil 2. (a) NGA-West1 ve (b) NGA-West2 veri tabanlarında V_{s30} dağılımı [11]

Yönetmelikler tarafından önerilen ve dünya çapında deprem yönetmeliklerinde benimsenen saha büyütme faktörlerini kullanmak mühendislik uygulamalarında yaygın bir uygulamadır. Ancak, deprem yönetmeliklerinden elde edilen saha faktörleri, NGA-West modellerinden elde edilen saha amplifikasyonları ile tamamen tutarlı değildir. Bu nedenle, NGA-West1 veya NGA-West2 yer hareketi tahmin denklemlerinin deprem yönetmeliğindeki zemin etki katsayıları ile kullanılması tamamen uygun değildir. Bu uyumsuzluğun nedeni esas olarak referans zemin hızındaki farklılıklardan ve zeminin doğrusal olmamasından kaynaklanmaktadır [12].

Son yıllarda yapılan çalışmalar da V_{s30}'un yerel zemin koşullarının temsilinde temel parametrelerden biri olmayı sürdürdüğünü, ancak tek başına bütün saha etkilerini açıklamakta yeterli olmayabileceğini göstermektedir. Mazanec ve arkadaşları [8], yoğun bir sismik gözlem ağı üzerinden V_{s30} ile gözlenen büyütme arasındaki ilişkiyi incelemiş ve V_{s30}'un genel eğilimi yansıtmasına karşın sahaya özgü büyütme farklılıklarının tamamını açıklayamadığını ortaya koymuştur. Darzi ve arkadaşları [13] ise yerel zemin büyütmesini frekansa bağlı olarak değerlendirmiş ve başka bölgelerden aktarılan genel V_{s30} veya jeoloji tabanlı modellerin yerel gözlemlerle aynı mekânsal ve frekanssal davranışı üretmeyebildiğini göstermiştir. Bu çalışmalar, saha etkilerinin tek bir sabit katsayı yerine frekans bağımlı ve yerel verilerle desteklenen modellerle ele alınmasının önemini ortaya koymaktadır.

Türkiye'deki güncel araştırmalar da sahaya özgü kayma dalgası hızı verilerinin bölgesel deprem tehlikesi çalışmalarındaki önemini vurgulamaktadır. İlhan ve arkadaşları [14], 6 Şubat 2023 Türkiye depremlerinden etkilenen bölgede ölçülen V_{s30} verilerine dayalı bir boyutlu hız modeli geliştirerek zemin koşullarının bölgesel yer hareketi modellemelerine aktarılmasını amaçlamıştır. Silahtar ve arkadaşlar [15] tarafından

Sakarya bölgesinde gerçekleştirilen çalışmada ise V_{s30}, yatay-düşey spektral oran yöntemiyle elde edilen hakim frekans ve büyütme değerleriyle birlikte değerlendirilmiştir. Çalışmada alüvyon alanlarda düşük frekanslı ve yüksek genlikli rezonans özellikleri belirlenmiş; Sakarya'daki yerel zemin davranışının yalnızca ortalama kayma dalgası hızıyla değil, rezonans ve yanal heterojenlik gibi dinamik parametrelerle birlikte incelenmesi gerektiği gösterilmiştir. Adapazarı özelinde gerçekleştirilen önceki çalışmalar da V_{s30}, zemin sınıfları ve gözlenen büyütme arasında önemli ilişkiler bulunduğunu göstermiştir. Özcep ve arkadaşları [16], Adapazarı'nda çok sayıda noktada gerçekleştirilen çok kanallı yüzey dalgası analizleriyle elde edilen kayma dalgası hızlarını saha büyütmesi ve farklı yönetmeliklerde tanımlanan zemin sınıflarıyla karşılaştırmıştır. Bu çalışma, Adapazarı gibi kalın alüvyon tabakalarının bulunduğu havzalarda aynı V_{s30} aralığında dahi saha tepkisinin değişebileceğini ve yerel ölçümlerin kullanılmasının önemini ortaya koyması bakımından mevcut araştırmanın bölgesel temelini desteklemektedir.

Güncel literatürün önemli bir bölümü yeni saha büyütme modellerinin geliştirilmesine, frekans bağımlı büyütme fonksiyonlarının belirlenmesine veya bir ve iki boyutlu doğrusal olmayan saha tepki analizlerine odaklanmaktadır. Buna karşılık mühendislik uygulamalarında, farklı yöntemlerin aynı saha için ne ölçüde farklı deprem talepleri ürettiği de önemli bir belirsizlik kaynağıdır. Çünkü klasik bağıl büyütme bağıntıları, yönetmelik tabanlı zemin etki katsayıları ve modern yer hareketi tahmin modellerinin saha terimleri; referans zemin tanımı, periyot bağımlılığı, yer hareketi şiddeti ve doğrusal olmayanlık bakımından birbirinden farklı kabullere dayanmaktadır. Sismik kaynak modeli, koordinatlar, aşılma olasılığı ve diğer tehlike bileşenleri birlikte değiştirildiğinde, sonuçlar arasındaki farkın ne kadarının doğrudan zemin etkisinin temsil biçiminden kaynaklandığını belirlemek güçleşmektedir.

Bu çalışmada incelenen Adapazarı-Çark Caddesi, Adapazarı-15 Temmuz Mahallesi, Adapazarı-Güllük, Erenler ve Serdivan noktaları, Sakarya ilinin yoğun nüfus ve yapılaşmaya sahip kentsel yerleşim alanlarını temsil etmeleri nedeniyle seçilmiştir. Ayrıca bu sahalarda farklı zemin sınıflarını temsil eden sahaya özgü V_{S30} değerlerinin bulunması, zemin etkisinin farklı yöntemlerle karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır. Böylece saha seçimi yalnızca farklı kayma dalgası hızı değerlerinin elde edilmesine değil, yöntemler arasında oluşabilecek farklılıkların yoğun kent dokusunda tasarım spektrumlarına ve mühendislik taleplerine etkisinin değerlendirilmesine dayanmaktadır.

Çalışmanın temel amacı, diğer sismik tehlike bileşenleri mümkün olduğunca sabit tutulurken, yerel zemin etkisinin farklı yaklaşımlarla temsil edilmesinin elde edilen tehlike ve tasarım spektrumları üzerindeki etkisini ortaya koymaktır. Bu kapsamda ilk olarak V_{s30}=760 m/s referans zemin koşulu için ASK14, BSSA14 ve CY14 yer hareketi tahmin modelleri kullanılarak olasılıksal sismik tehlike analizleri gerçekleştirilmiştir. Ardından Midorikawa, Joyner–Fumal ve Borcherdt tarafından önerilen kayma dalgası hızına bağlı klasik bağıl büyütme bağıntılarının etkisi incelenmiştir. Son aşamada, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde tanımlanan zemin etki katsayıları ile sahaya özgü V_{s30} değerlerini doğrudan kullanan ASK14 modelinin doğrusal ve doğrusal olmayan saha terimleri karşılaştırılmıştır. Böylece sabit ampirik büyütme, yönetmelik tabanlı periyot bağımlı büyütme ve modern yer hareketi tahmin modeli tabanlı saha etkisi temsillerinin aynı kentsel çalışma alanlarında ürettiği deprem talepleri ortak bir değerlendirme çerçevesinde nicel olarak incelenmiştir.

2. YÖNTEM

Bu çalışmada olasılıksal sismik tehlike analizleri, R-CRISIS 2015 [17] yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak Prof. Mario Ordaz tarafından geliştirilen bu yazılım, Cornell [18] tarafından önerilen olasılıksal sismik tehlike analizi (PSHA) yaklaşımını esas almakta olup, sismik kaynakların deprem üretme potansiyelini, deprem oluş sıklıklarını ve yer hareketi tahmin denklemlerini birlikte değerlendirerek belirli bir aşılma olasılığına karşılık gelen yer hareketi parametrelerini hesaplamaktadır. Yazılım, günümüzde birçok akademik ve mühendislik uygulamasında ve literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çalışmada sismik kaynak modeli olarak EMME2014 (Earthquake Model of the Middle East) [19] projesi kapsamında geliştirilen kaynak modeli kullanılmıştır. EMME2014, Türkiye'nin de içerisinde bulunduğu Orta Doğu bölgesi için geliştirilen bölgesel bir sismik tehlike modeli olup, aktif fay kaynakları, alan kaynakları, deprem katalogları ve sismotektonik parametreleri bütünleşik bir yapı içerisinde sunmaktadır. Sakarya ili ve çevresindeki sismik kaynaklar bu model esas alınarak R-CRISIS ortamında tanımlanmış ve olasılıksal tehlike hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

Yer hareketinin tahmininde, aktif sığ kabuk depremleri için geliştirilen NGA-West2 yer hareketi tahmin denklemlerinden Abrahamson ve arkadaşları (ASK14)[20], Boore ve arkadaşları (BSSA14)[21] ve Chiou ve Youngs (CY14)[22] modelleri kullanılmıştır. Analizlerin ilk aşamasında referans kaya koşulu V_{s30}=760 m/s olarak kabul edilmiş ve her bir yer hareketi tahmin denklemi için maksimum yer ivmesi (PGA) ile spektral ivme değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) kapsamında aynı koordinatlar için verilen tasarım spektrumları ile karşılaştırılmış ve yönetmelikle en uyumlu sonuçları veren yer hareketi tahmin denklemi belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında incelenen beş nokta, Sakarya ilinde farklı yerel zemin özelliklerini temsil eden ve geoteknik etüt raporlarından ölçülmüş V_{s30} değerlerine ulaşılabilen bölgeler arasından seçilmiştir. Nokta seçiminde farklı zemin sınıflarının temsil edilmesi ve yerel zemin etkisinin farklı zemin koşulları altında değerlendirilebilmesi amaçlanmıştır.

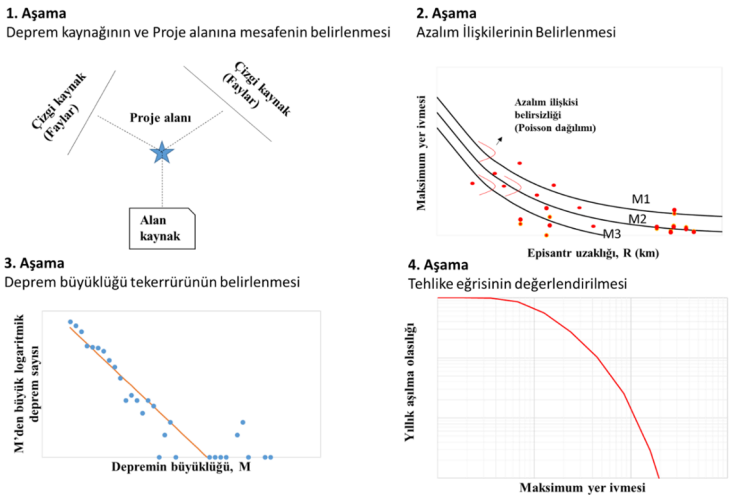
Sakarya ilinin önemli bir bölümünün ZC, ZD ve ZE zemin sınıflarında yer alması nedeniyle referans kaya koşulunda elde edilen tehlike değerlerinin doğrudan mühendislik tasarımında kullanılmasının yeterli olmayacağı değerlendirilmiştir. Bu nedenle çalışmanın ikinci aşamasında yerel zemin etkisi dikkate alınmıştır. İlk olarak, geoteknik raporlardan elde edilen ölçülmüş V_{s30} değerleri kullanılarak Midorikawa [7], Joyner ve Fumal [6] ile Borcherdt ve arkadaşları [5] tarafından önerilen ampirik zemin büyütme bağıntıları uygulanmış ve her bir çalışma noktası için bağıl zemin büyütme katsayıları hesaplanmıştır. Bu katsayılar kullanılarak referans kaya koşulunda elde edilen spektral ivmeler yüzey zemin koşullarına dönüştürülmüş ve ampirik büyütme yaklaşımlarının sonuçları karşılaştırılmıştır.

Son aşamada ise, referans zemin koşulunda TBDY 2018 ile en uyumlu sonuçları veren yer hareketi tahmin denklemi seçilerek analizler tekrar gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde, referans kaya hızı yerine her bir noktaya ait geoteknik raporlardan elde edilen gerçek V_{s30} değerleri doğrudan yer hareketi tahmin denkleminin saha parametresi olarak kullanılmıştır. Böylece yerel zemin etkisi, modern yer hareketi tahmin modelinin doğrusal ve doğrusal olmayan saha terimleri aracılığıyla değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak çalışmada yerel zemin etkisi üç farklı yaklaşımla incelenmiştir: (i) ampirik zemin büyütme bağıntıları, (ii) yer hareketi tahmin denklemlerinde doğrudan kullanılan ölçülmüş V_{s30} değerleri ve (iii) TBDY 2018'de tanımlanan zemin etki katsayıları. Elde edilen maksimum yer ivmesi ve spektral ivme değerleri karşılaştırılarak farklı zemin etkisi temsil yaklaşımlarının deprem tehlikesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

2.1. Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi

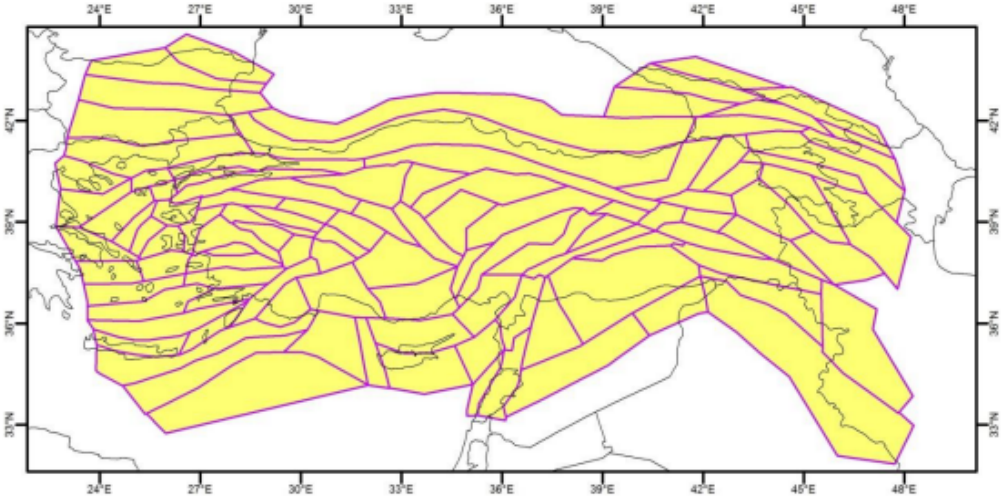
Ülkemizde yapılmış olan birçok olasılıksal sismik tehlike analizi çalışmaları bulunmaktadır [23-30]. Harman ve Küyük [28], Sakarya için olasılıksal sismik tehlike analizi yapmış ancak çalışmalarında zemin etkilerini dikkate almamıştır. Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi, deprem tekerrürünün ve birtakım belirsizliklerin dikkate alınarak hesap edilmesi şeklindedir (Şekil 3).



Şekil 3. Olasılıksal deprem tehlike analizi aşamaları

2.2. Kaynak Modeli

TBDY 2018 deprem haritalarının oluşturulmasında da olasılıksal sismik tehlike analizi yöntemi dikkate alınmıştır. Türkiye için Ulusal Deprem Araştırma Programı kapsamında fayların kırılma mekanizmalarına göre alansal deprem kaynakları ve parametreleri belirlenmiştir. Faylarda meydana gelen kırılmalar sonucunda meydana gelen yer değiştirmeler zemin çalışmaları veya GPS çalışmalarıyla belirlenebilmektedir. Türkiye için Ulusal Deprem Araştırma Programı kapsamında Türkiye ve çevresi için toplam 105 adet alansal deprem kaynağı belirlenmiştir (Şekil 4) [31].



Şekil 4. Türkiye için alansal kaynak modeli [31]

2.3. Deprem Tekerrürü ve Olasılığının Belirlenmesi

Ulusal Deprem Araştırma Programı kapsamında Türkiye için yürütülen olasılıksal deprem tehlike analizlerinde, diğer modellere kıyasla daha güvenli sonuçlar üretmesi nedeniyle Poisson olasılık modeli tercih edilmiştir [32]. Bu modele göre, her bir sismik olay birbirinden bağımsız olarak gerçekleşmektedir. Bu durum, aynı yer ve zamanda iki depremin meydana gelme olasılığının ihmal edilebilir seviyelere düşmesine neden olmaktadır. Böylece artçı ve öncü şoklar analiz dışı bırakılarak, belirsizliklerin azaltılması ve tehlike hesaplarının daha sağlıklı yürütülmesi mümkün hale gelmektedir.

$$P(N>1)=1-e^{\lambda t} \quad (1)$$

Eşitlik 1'de yer alan λ parametresi, belirli bir büyüklükteki depremin ortalama oluşma oranını temsil etmektedir. Eşitlik 2 ise, Gutenberg ve Richter (1954) tarafından önerilen ve depremlerin büyüklük-frekans ilişkisini logaritmik bir formda ifade eden bağıntıyı içermektedir. Bu ilişki, olasılıksal deprem tehlike analizlerinde yaygın olarak kullanılan temel modellerden biridir.

$$\text{Log } \lambda(M)= a- bM \quad (2)$$

λ(M) = birim zaman içinde magnitüd değeri M'ye eşit ya da M'den büyük ortalama deprem sayısı;
a ve b = ilgili bölge için saptanan regresyon katsayıları;
"a" değerleri, seçilen bölgenin büyüklüğü ve incelenen zaman aralığı ile ilişkilidir. "b" değerleri ise bölgenin tektonik yapısı ile ilişkilidir.

2.4. Azalım İlişkilerinin Seçilmesi

Sakarya ili, Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde konumlanmakta olup, bölge aktif tektonik özellikler göstermektedir. Türkiye'nin karmaşık tektonik yapısı göz önünde bulundurulduğunda, aktif sığ kabuk içi, dalma-batma zonu ve dalan levha içi depremler için geliştirilmiş yer hareketi tahmin modelleri (GMPE'ler) en uygun seçenekler arasında yer almaktadır. Ulusal Deprem Araştırma Programı (UDAP) kapsamında Türkiye tektoniğine uygun olarak geliştirilen güncel azalım ilişkileri (örneğin, ASK14, BSSA14, CB14 ve

CY14) analizlerde kullanılmak istenmiş; ancak bu modellerin çalışmada kullanılan yazılımda tanımlı olmaması nedeniyle, aynı araştırma grupları tarafından geliştirilen bir önceki versiyon denklemler (AS08, BA08, CB08 ve CY08) tercih edilmiştir (Çizelge 1). Bununla birlikte, bu çalışmada ASK14, BSSA14 ve CY14 modelleri R-CRISIS 2015 yazılımına tanımlanarak Sakarya ili için olasılıksal sismik tehlike analizi yapılmış ve sonuçlar TBDY 2018 ile karşılaştırılmıştır [31].

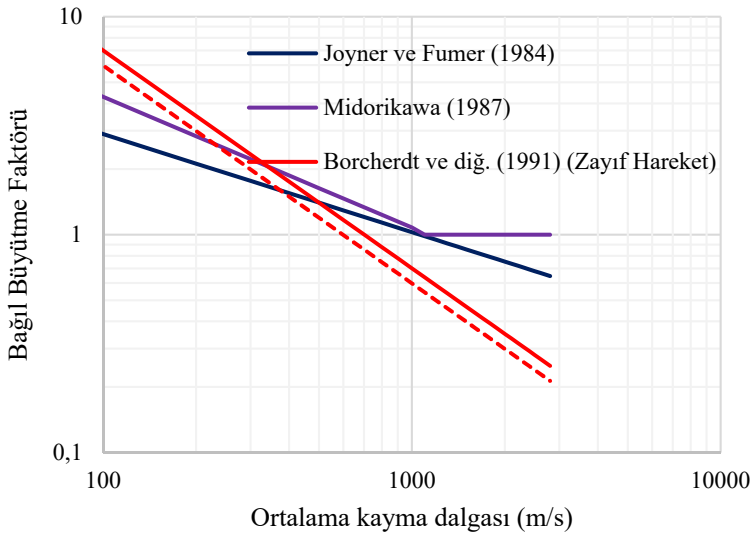
Çizelge 1. Türkiye için önerilen azalım ilişkileri [31]

Tahmin denklemi	Denklemin kısaltması	Ana bölgeler	Kayıt ve deprem sayısı	Mw aralığı	R tipi ve Rmax	Bileşenler	Periyod aralığı	Faylanma şekli	Zemin etkisi
Abrahomson, Silva Kamai	AS08	Batı Amerika ve Tayvan	2754,135	5.0-8.5	Rrup,200	PGA,PGV,PSA GMrotD50	0-10	S,N,R	V_{s30}
Boore ve Atkinson	BA08	Batı Amerika ve Tayvan	1574,58	5.0-8.0	Rrup,200	PGA,PGV,PSA GMrotD50	0-10	S,N,R	V_{s30}
Chou ve Youngs	CY08	Batı Amerika ve Tayvan	1950,125	4.0-8.5	Rrup,200	PGA,PGV,PSA GMrotD50	0-10	S,N,R	V_{s30}
Abrahomson, Silva ve Kamai	ASK14	Batı Amerika ve Tayvan	15750,326	3.0-8.5	Rrup,300	PGA,PGV,PSA GMrotD50	0-10	S,N,R	V_{s30}
Boore ve arkadaşları	BSSA14	Batı Amerika ve Tayvan	-	3-8.5	Rrup,300	PGA,PGV,PSA GMrotD50	0-10	S,N,R	V_{s30}
Chiou ve Youngs	CY14	Batı Amerika ve Tayvan	12444.300	3.5-8.5	Rrup,300	PGA,PGV,PSA GMrotD50	0-10	S,N,R	V_{s30}

**R: mesafe*
**Rmax: Maksimum mesafe*
**Rrup:Fay kırığına en yakın mesafe*
**GM: Yatay bilşenleri geometrik ortalaması*
**RotD50: Konumdan bağımsız ortalma yatay bileşen*
**S: Doğrultu atımlı fay*
**N:Normal fay*
**R:Ters fay*

2.5. Zemin Büyütme Etkisi

Yüzeye yakın tabakalarda Midorikawa [7], Joyner ve Fumal [6] ve Borcherdt ve arkadaşları [33] gibi araştırmacılar kayma dalgası hızı ile zemin büyütmesi arasında korelasyonlar geliştirmiştir (Şekil 5). Bu korelasyonlar Ortadoğu, Kaliforniya, Japonya ve Şili'de meydana gelmiş depremlerde yapılan gözlemlere göre ileri sürülmüştür.



Şekil 5. Ortalama kayma dalgası hızına bağlı bağıl büyütme faktörü [6,7,33]

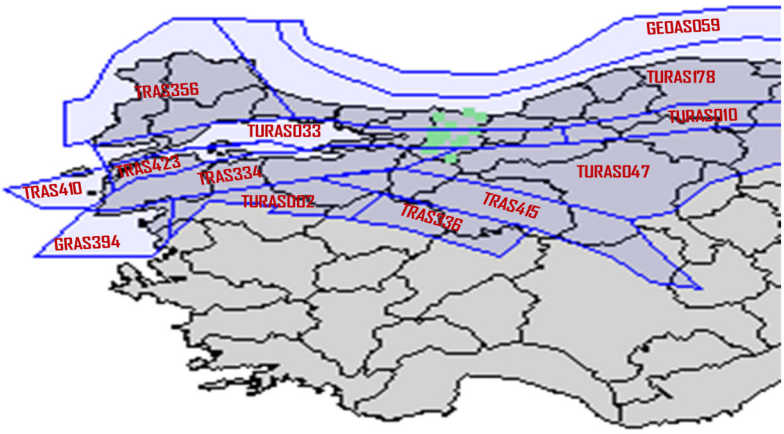
3. SAYISAL ÇALIŞMA

Sismik tehlike analizi yapılan beş farklı noktaya ait koordinatlar ile V_{S30} değerleri, ilgili sahalar için hazırlanmış yayımlanmamış geoteknik etüt raporlarından elde edilmiş olup Çizelge 2'de sunulmuştur. Zemin hâkim periyotları, geoteknik raporlarda yer alan tabaka kalınlığı ve kayma dalgası hızı değerleri kullanılarak çeyrek dalga boyu yaklaşımına göre hesaplanmıştır [34]. Bağıl büyütme katsayıları ise zemin hâkim periyotlarına karşılık gelen değerler esas alınarak Şekil 5'te verilen büyütme eğrilerinden belirlenmiştir. Sismik tehlike analizi yapılan 5 farklı noktanın koordinatları ve zemin raporlarından elde edilen V_{s30} hızları, zemin periyodları ve bağıl büyütme kat sayıları Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Tehlike analiz yapılan noktaların koordinatları özellikleri ve bağıl büyütme faktörleri

	Vs(30) [m/s]	Zemin sınıfı	Koordinatlar		T_{zemin}	Midorikawa [7]	Joyner ve Fumal [6]	Borcherdt ve arkadaşları [33]
Adapazarı-Çark Caddesi	148	ZE	40,77	30,39	0,810811	3,39	2,43	4,73
Adapazarı-15 Temmuz Mahallesi	535,4	ZC	40,87	30,31	0,224131	1,57	1,36	1,31
Adapazarı-Güllük	221,83	ZD	40,76	30,39	0,540955	2,66	2,02	3,15
Erenler	130	ZE	40,74	30,4	0,923077	3,66	2,57	5,38
Serdivan	312	ZD	40,74	30,34	0,384615	2,17	1,73	2,24

R-CRISIS 2015 yazılımında analizler 6 farklı aşamadan oluşmaktadır. Çalışılacak bölgenin şekil dosyasının oluşturulması, çalışılacak koordinatların şekil dosyası üzerine atanması, çalışma alanının koordinatlarının belirlenmesi ve gridlere ayrılması, kaynak belirlenmesi, azalım ilişkilerin belirlenmesi ve deprem tehlike parametrelerinin belirlenmesi şeklindedir. Analizlerde Şekil dosyasının hazırlanmasında QGIS [35] yazılımından faydalanılmıştır. Kaynaklar Alan kaynak olarak belirlenmiş ve Gutenber Richter ilişkilerinden faydalanılmıştır. Türkiye için uygun a ve b değerleri UDAP Türkiye Sismik Tehlike Haritasının Güncellenmesi proje raporunda yer almaktadır. Bu çalışma için Kuzeydoğu Anadolu Fayını kapsayan EMME 2014 [36] kaynak modeli hesaba katılmıştır (Şekil 6). Aktif sığ alansal kaynak alt derinlik sınırı da 20 km olarak hesaba katılmıştır [31].



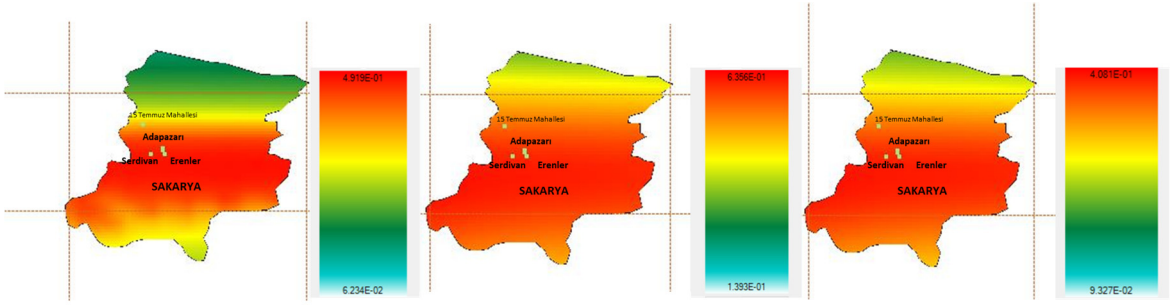
Şekil 6. Analizlerde kullanılan alan kaynak modeli

3.1. Sonuçlar

Analiz sonuçları 3 aşamadan oluşmaktadır. 1. Aşama, Referans zemin koşulunun dikkate alındığı ve 3 farklı yer hareketi tahmin denklemlerinin hesaplara dahil edildiği; 2. Aşama, 1. Aşamanın devamı niteliğinde bağıl büyütme faktörünün etkisinin dahil edildiği hesaplamaları içermektedir. 3. Aşama ise ASK14 (Abrahomson ve arkadaşları [20]) yer hareketi tahmin denklemi için zemin raporlarından elde edilen V_{s30} zemin hızlarının 5 nokta için ayrı ayrı hesap edilmesi şeklindedir.

3.2. Referans Zemin Koşulu İçin Analiz

Analizlerde BSSA14 (Boore ve arkadaşları [21]), ASK14 (Abrahomson ve arkadaşları [20]) ve CY14 (Chiou ve Youngs [22]) azalım ilişkilerine göre hesap yapılmıştır. Şekil 7'de Referans zemin koşulu için elde edilmiş olan sismik tehlike haritaları görülmektedir.



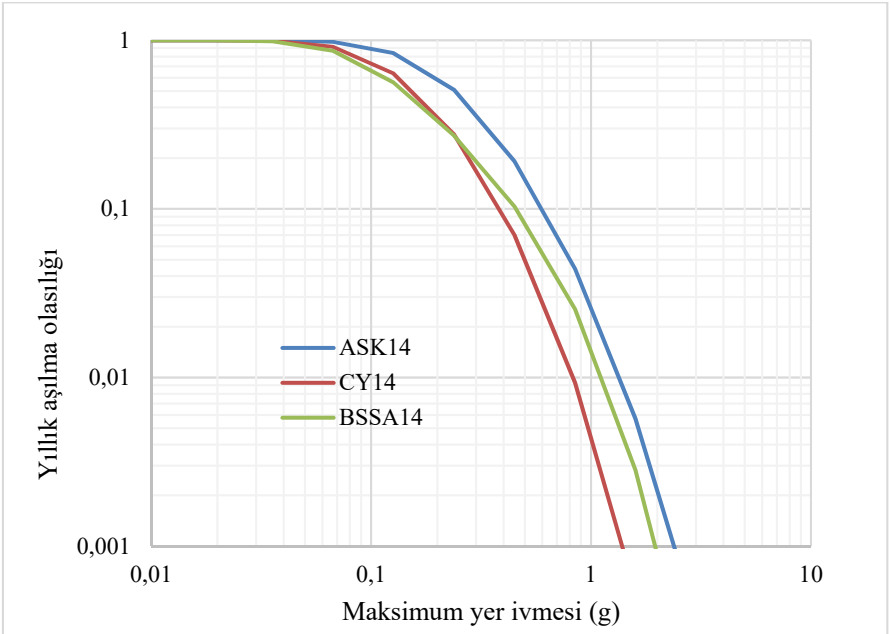
Şekil 7. Referans V_{s30} zemin koşulu için BSSA14, ASK14, CY14 tehlike haritaları

Çizelge 2'de ise Şekil 2'de haritalardan okunmuş maksimum yer ivme değerleri verilmiştir. En yüksek yer ivmesinin ASK14 modelinde oluştuğu görülmektedir.

Çizelge 2. Referans V_{s30} zemin koşulu için BSSA14, ASK14, CY14 maksimum yer ivmesi

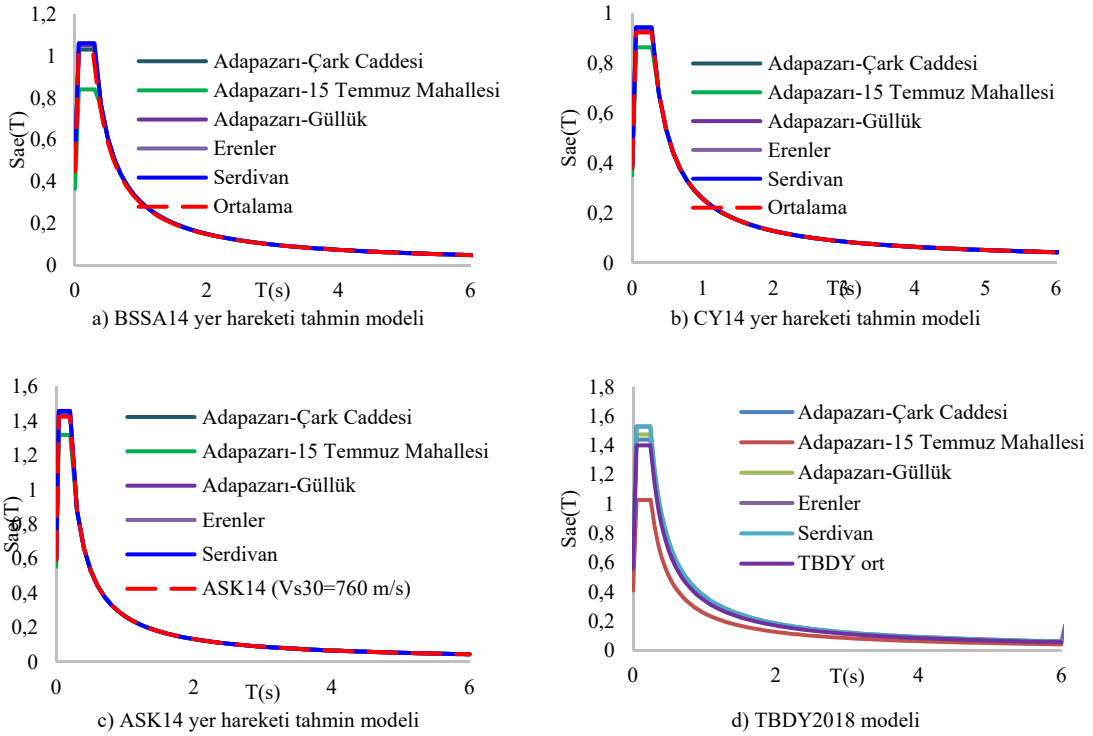
V_{s30}[m/s]	Zemin sınıfı	Yer hareketi tahmin denklemi modeli	PGA (g) (DD-2)
760	ZB	BSSA14	0,492
760	ZB	ASK14	0,636
760	ZB	CY14	0,408

Deprem tehlike haritası üzerinden Şekil 8'de belirtilen noktalar üzerinde PGA, S(0.2) ve S(1) değerleri okunabilmekte ve tehlike eğrileri elde edilebilmektedir. Şekil 8'de Tehlike haritaları üzerinde bulunan 5 noktanın (Boore ve arkadaşları [21]), ASK14 (Abrahomson ve arkadaşları [20]) ve CY14 (Chiou ve Youngs [22]) için ortalamaları hesap edilmiş ve sismik tehlike eğrileri oluşturulmuştur (Şekil 8). 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem için (DD-2) grafikten değerler okunabilmektedir.



Şekil 8. Referans V_{s30} zemin koşulu için BSSA14, ASK14, CY14 tehlike eğrileri

Tehlike haritaları üzerinde bulunan 5 nokta için elde edilen her bir PGA, S(0.2) ve S(1) değerleri TBDY2018'e uyarlanmıştır. (Boore ve arkadaşları [21]), ASK14 (Abrahomson ve arkadaşları [20]) ve CY14 (Chiou ve Youngs [22]) modelleri için referans zemin koşulu dikkate alınarak spektrum eğrileri oluşturulmuş ve ortalamaları hesap edilmiştir (Şekil 9).



a) BSSA14 yer hareketi tahmin modeli

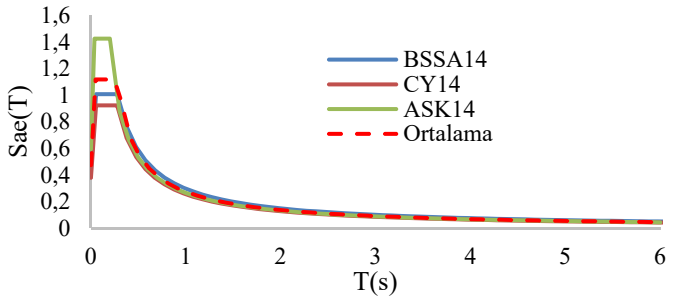
b) CY14 yer hareketi tahmin modeli

c) ASK14 yer hareketi tahmin modeli

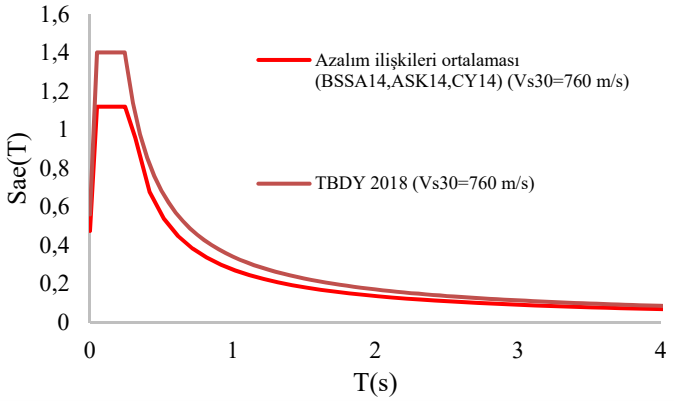
d) TBDY2018 modeli

Şekil 9. Referans V_{s30} zemin koşulu için elde edilmiş spektrum eğrilerinin karşılaştırılması

Referans zemin koşuluna göre Şekil 9'da elde edilmiş olan yer hareketi tahmin denklemlerinden elde edilmiş ortalama spektrum eğrileri Şekil 10'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



a) Yer hareketi tahmin denklemlerinden elde edilen ortalama spektrum eğrilerinin karşılaştırılması



b) Yer hareketi tahmin denklemlerinden elde edilen ortalama spektrum eğrilerinin TBDY 2018 ile karşılaştırılması

Şekil 10. Referans V_{s30} zemin koşulu için elde edilmiş ortalama spektrum eğrilerinin karşılaştırılması

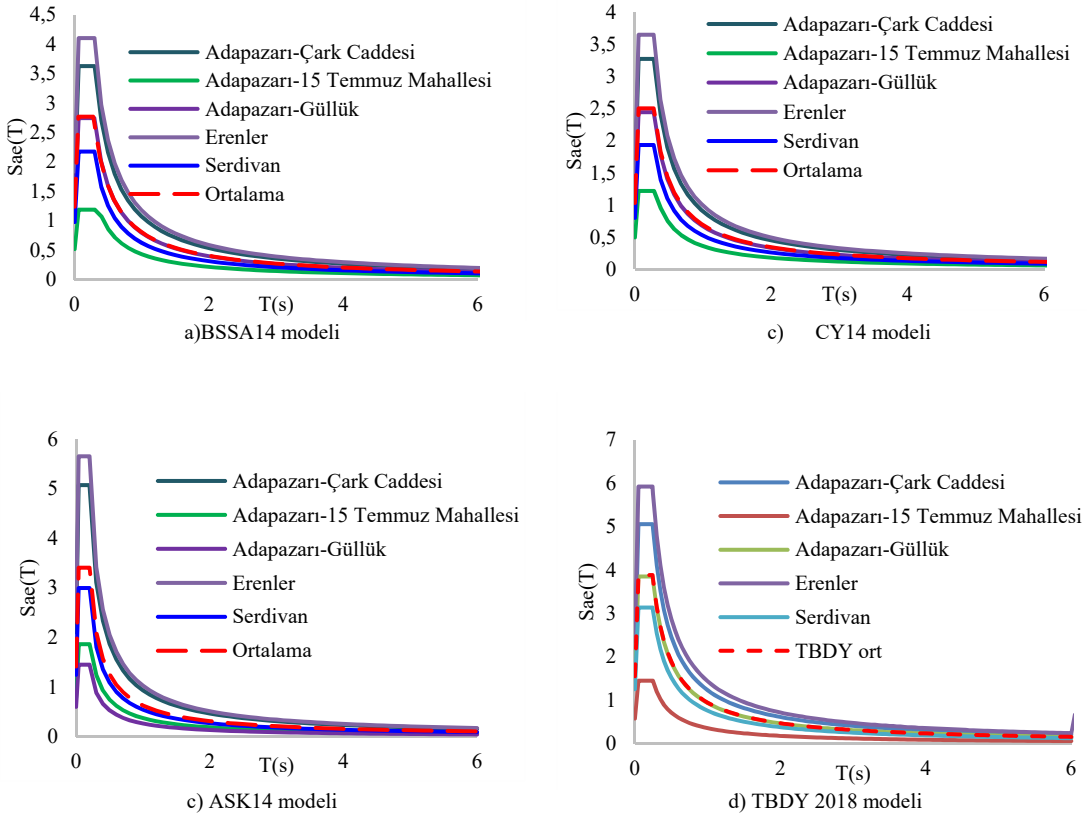
Şekil 10 incelendiğinde, TBDY 2018 tasarım spektrumu ile yer hareketi tahmin denklemlerinin ortalamasından elde edilen spektrum eğrilerinin genel eğilim bakımından birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Her iki eğri de kısa periyot bölgesinde maksimum spektral ivme değerlerine ulaşmakta, periyot arttıkça ise benzer şekilde azalmaktadır. Bu durum, seçilen NGA-West2 yer hareketi tahmin denklemlerinin referans kaya koşulunda Sakarya ili için yönetmelik spektrumunu genel olarak temsil edebildiğini göstermektedir.

Bununla birlikte, TBDY 2018 spektrumunun özellikle kısa periyot bölgesinde (yaklaşık 0,2–1,0 s aralığında) yer hareketi tahmin denklemleri ortalamasına göre bir miktar daha yüksek spektral ivme değerleri ürettiği görülmektedir. Bu farklılık, TBDY 2018'in tasarım açısından güvenliği esas alan yaklaşımı ile yer hareketi tahmin denklemlerinin olasılıksal ortalama davranışı temsil etmesinden kaynaklanabilir.

Orta ve uzun periyot bölgelerinde ise iki eğri arasındaki fark belirgin şekilde azalmakta ve spektrumların büyük ölçüde birbirine yaklaştığı görülmektedir. Bu sonuç, referans kaya koşulunda kullanılan yer hareketi tahmin denklemlerinin Sakarya ili için TBDY 2018 ile uyumlu bir tehlike seviyesi sunduğunu göstermektedir.

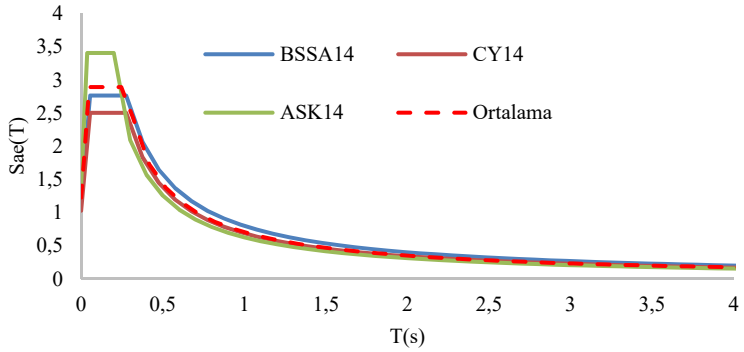
3.3. Bağıl Büyütme Faktörü

Bağıl büyütme faktörü olarak Çizelge 1'de yer alan Midorikawa [7], Joyner ve Fumal [6] ve Borcherdt ve arkadaşları [33] önerdiği bağıl büyütme bağıntılarından elde edilmiş olan kat sayıların ortalaması kullanılmıştır. Bağıl büyütme faktörü ile çarpılmış olan spektrum eğrileri Şekil 11'de verilmiştir.

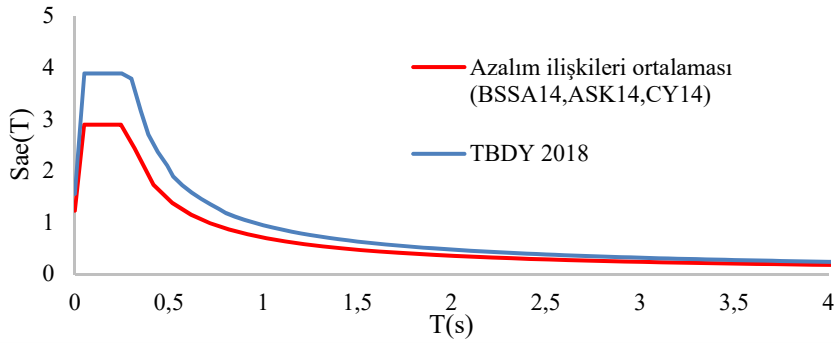


Şekil 11. Bağıl büyütme faktörü ile çarpılmış olan spektrum eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 11'de elde edilmiş olan yer hareketi tahmin denklemlerinden elde edilmiş ortalama spektrum eğrileri Şekil 12'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



a) Yer hareketi tahmin denklemlerinden elde edilen ortalama spektrum eğrilerinin karşılaştırılması



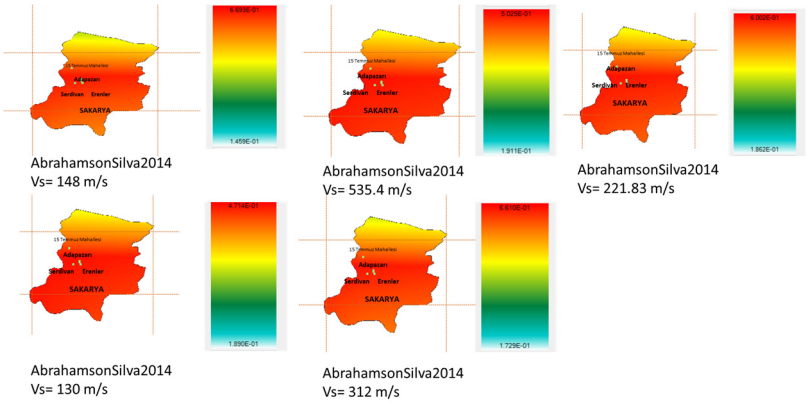
b) Yer hareketi tahmin denklemlerinden elde edilen ortalama spektrum eğrilerinin TBDY 2018 ile karşılaştırılması

Şekil 12. Bağıl büyütme faktörü ile çarpılmış olan ortalama spektrum eğrilerinin karşılaştırılması

Ampirik bağıl büyütme yöntemleri ile elde edilen spektrumların özellikle kısa periyot bölgesinde TBDY 2018 spektrumundan sapma göstermesi, yerel zemin etkisinin yalnızca sabit büyütme katsayıları ile temsil edilmesinin bazı durumlarda yetersiz kalabileceğini göstermektedir. Bu nedenle çalışmanın sonraki aşamasında, doğrusal olmayan saha terimlerini içeren yer hareketi tahmin denklemlerinde sahaya özgü ölçülmüş V_{S30} değerleri kullanılarak analizler tekrarlanmış ve yerel zemin etkisinin daha fiziksel temelli bir yaklaşımla değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

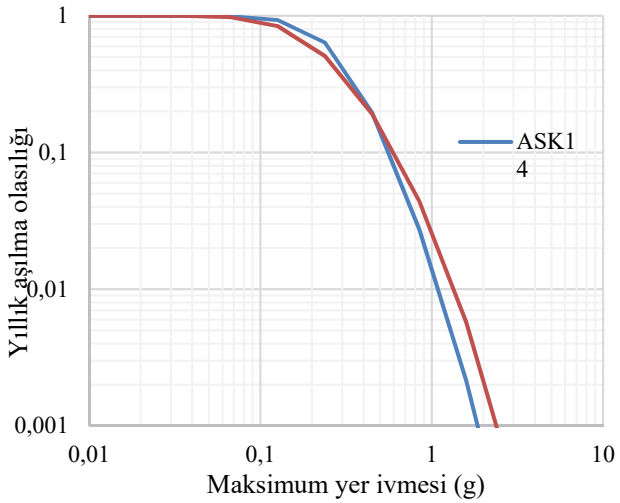
3.4. V_{s30} Hızına Göre Özel Çözüm

Yapılan hesaplamalar sonucunda 5 nokta için TBDY 2018'e en yakın sonuç veren model ASK14 olduğundan 5 farklı nokta için zemin raporundan elde edilen V_{s30} hızları için 5 farklı analiz gerçekleştirmiştir. Analizler sonucunda elde edilen sismik tehlike haritaları Şekil 13'te sunulmuş ve PGA, S(0.2) ve S(1) hızları 5 bölge için Çizelge 4'te verilmiştir.



Şekil 13. Ölçülmüş V_{s30} zemin hızının tanımlandığı sismik tehlike haritaları

Ölçülmüş V_{s30} zemin hızının ve referans zemin hızının tanımlandığı analiz sonucunda elde edilen sismik tehlike eğrileri Şekil 14'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Analizler sonucunda Referans zemin koşulunda DD-2 için daha yüksek yer ivmesi meydana gelmektedir.



Şekil 14. ASK14 modeli için tehlike eğrilerinin karşılaştırılması

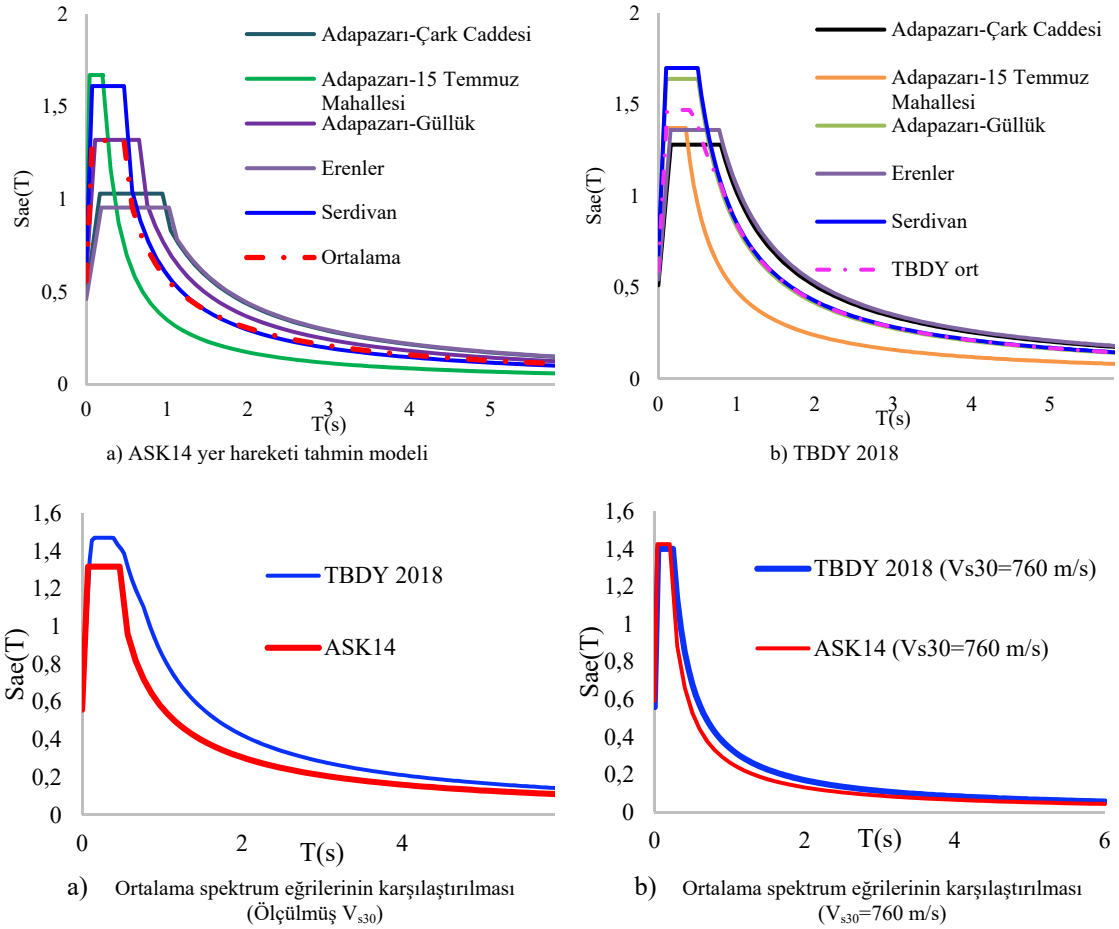
Referans zemin koşulu dikkate alındığında, ASK14 modeli için 5 farklı noktada okunan PGA S(0.2) ve S(1) değerleri Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Referans zemin koşulu için ve büyütme faktörlerinin dikkate alındığı PGA S(0.2) ve S(1) değerleri

Referans zemin hızı için sonuçlar						
	V_{s30}[m/s]	Zemin sınıfı	Yer hareketi tahmin denklemi modeli	PGA (DD-2)	S_S(0,2 s)	S_1(1 s)
Adapazarı-Çark Caddesi	760	ZB	ASK14	0,597	1,44	0,265
Adapazarı-15 Temmuz Mahallesi	760	ZB	ASK14	0,555	1,32	0,255
Adapazarı-Güllük	760	ZB	ASK14	0,602	1,45	0267
Erenler	760	ZB	ASK14	0,606	1,46	0,268
Serdivan	760	ZB	ASK14	0,607	1,46	0,269
Ölçülmüş yer hızı için sonuçlar						
	V_{s30}[m/s]	Zemin sınıfı	Yer hareketi tahmin denklemi modeli	PGA	S_S(0,2 s)	S_1(1 s)
Adapazarı-Çark Caddesi	148	ZE	ASK14	0,493	1,03	0,868
Adapazarı-15 Temmuz Mahallesi	535,4	ZC	ASK14	0,620	1,67	0,349
Adapazarı-Güllük	221,83	ZD	ASK14	0,584	1,32	0,731
Erenler	130	ZE	ASK14	0,462	0,955	0,881
Serdivan	312	ZD	ASK14	0,637	1,61	0,592
AFAD Deprem Tehlike Haritası Sonuçları						
	V_{s30}[m/s]	Zemin sınıfı	Yer hareketi tahmin denklemi modeli	PGA	S_S(0,2 s)	S_1(1 s)
Adapazarı-Çark Caddesi	148	ZE	TBDY 2018	0,512	1,281	1,019
Adapazarı-15 Temmuz Mahallesi	535,4	ZC	TBDY 2018	0,549	1,372	0,478
Adapazarı-Güllük	221,83	ZD	TBDY 2018	0,656	1,64	0,831
Erenler	130	ZE	TBDY 2018	0,544	1,361	1,056
Serdivan	312	ZD	TBDY 2018	0,68	1,70	0,853

Referans kaya koşulunda gerçekleştirilen analizlerde çalışma noktaları arasında benzer tehlike düzeyleri elde edilirken, sahaya özgü ölçülmüş V_{S30} değerlerinin analize dâhil edilmesiyle spektral ivme taleplerinin önemli ölçüde değiştiği görülmüştür. Özellikle ZE sınıfındaki yumuşak zeminlerde PGA değerlerinde sınırlı bir azalma gözlenmesine karşın, 1,0 s spektral ivmeleri referans kaya koşuluna göre yaklaşık üç kata varan artış göstermiştir. Bu durum, doğrusal olmayan saha etkisinin yüksek frekanslı hareketleri sınırlandırırken uzun periyot bileşenlerini büyütmesiyle açıklanabilir. Ayrıca, ölçülmüş V_{S30} değerleri kullanılarak elde edilen sonuçların TBDY 2018 tasarım spektrumları ile genel olarak benzer eğilim göstermesi, modern yer hareketi tahmin denklemlerinin doğrusal olmayan saha terimlerinin yerel zemin davranışını fiziksel olarak temsil edebildiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, sahaya özgü ölçülmüş V S30 verilerinin bulunduğu durumlarda doğrusal olmayan saha terimlerini içeren güncel yer hareketi tahmin denklemlerinin kullanılmasının, yerel zemin etkisinin daha gerçekçi değerlendirilmesine katkı sağlayacağını göstermektedir.

Geoteknik raporlardan elde edilmiş ölçülmüş V_{s30} hızları kullanılarak 5 nokta için elde edilen her bir PGA, S(0.2) ve S(1) değerleri TBDY2018'e uyarlanmış ve AFAD Deprem tehlike haritalarından zemin sınıflarına göre elde edilen verilerle karşılaştırma yapılmıştır (Şekil 15).



a) ASK14 yer hareketi tahmin modeli

b) TBDY 2018

a) Ortalama spektrum eğrilerinin karşılaştırılması (Ölçülmüş V_{s30})

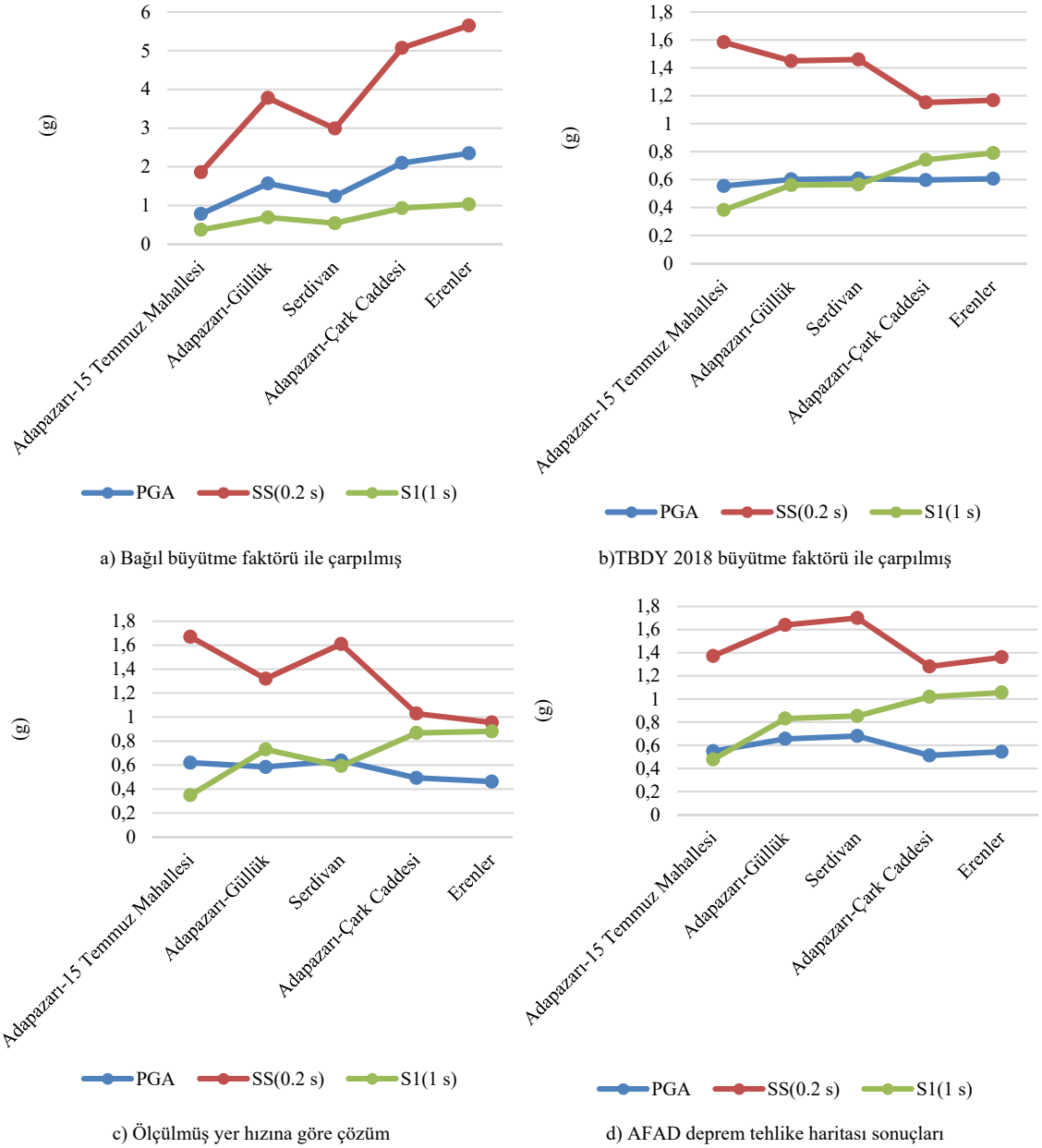
b) Ortalama spektrum eğrilerinin karşılaştırılması (V_{s30}=760 m/s)

Şekil 15. Spektrum eğrilerinin karşılaştırılması

Referans kaya koşulunda elde edilen sonuçlar ile sahaya özgü ölçülmüş V_{S30} değerleri kullanılarak gerçekleştirilen analizler birlikte değerlendirildiğinde, ASK14 modelinin her iki durumda da TBDY 2018 tasarım spektrumunun genel eğilimini başarılı şekilde temsil ettiği görülmektedir. Ölçülmüş VS30 değerlerinin modele tanımlanmasıyla spektral talepler zemin özelliklerine bağlı olarak değişmekle birlikte, elde edilen spektrumların yönetmelik spektrumları ile uyumlu davranış sergilemesi, doğrusal olmayan saha terimlerinin yerel zemin etkisini fiziksel olarak temsil edebildiğini göstermektedir. Bu nedenle, sahaya özgü geoteknik verilerin mevcut olduğu durumlarda doğrusal olmayan saha terimlerini içeren güncel yer hareketi

tahmin denklemlerinin kullanılması, yerel zemin etkisinin değerlendirilmesinde daha güvenilir bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir.

Büyütme faktörlerinin etkisinin bölgeler bazında yüksek zemin sınıfı olandan düşük zemin sınıfına göre görselleştirilmiş grafiği Şekil 16'da verilmiştir. Şekil 16a. referans zemin koşulu için CRISIS yazılımında yapılmış olan tehlike analizi sonuçlarının bağıl büyütme faktörü ile çarpılmış deprem tehlikesi verilerini, Şekil 16b. TBDY2018 zemin büyütme faktörleri ile çarpılmış deprem tehlikesi verilerini, Şekil 16c. zemin yer hızları dikkate alınarak elde edilen deprem tehlikesi verilerini, Şekil16d. ise zemin sınıfları dikkate alınarak AFAD Deprem Tehlike Haritalarından alınan verileri ifade etmektedir.



a) Bağıl büyütme faktörü ile çarpılmış

b)TBDY 2018 büyütme faktörü ile çarpılmış

c) Ölçülmüş yer hızına göre çözüm

d) AFAD deprem tehlike haritası sonuçları

Şekil 16. Büyütme faktörlerinin karşılaştırılması

Adapazarı-15 Temmuz Mahallesi V_{s30}= 535.4 m/s zemin hızına sahip ve diğer bölgelere oranla daha iyi zemin yapısına sahiptir. Analizi sonuçları incelendiğinde, S1 değerinin de zemin sınıfına bağlı olarak daha düşük olması beklenmektedir. Erenler bölgesi ise V_{s30}= 130 m/s zemin hızına sahip ve diğer bölgelerle karşılaştırıldığında daha zayıf zemin yapısına sahiptir. Analizi sonuçları incelendiğinde, S1 değerinin de

zemin sınıfına bağlı olarak daha yüksek beklenmektedir. Şekil 16'da Adapazarı-15 Temmuz Mahallesi için S1 değerlerinin azaldığı, Erenler bölgesi için ise arttığı görülmektedir.

PGA ve S(0.2) değerleri arasındaki farklılıklar zemin hızlarının birbirine yakın olması ve noktaların fay kaynağına uzaklıklarının farklı olması nedeniyle Şekil 16 b-c-d'de birbirine yakın ancak farklı şekilde seyrettiği görülmüştür. Şekil 16 a'da ise zemin büyütme etkisi her bir periyod için lineer artırıldığından farklılıklar gözlemlenmiştir.

Elde edilen bulgular, ölçülmüş V_{s30} değerlerinin doğrudan yer hareketi tahmin denklemlerinin doğrusal olmayan saha terimlerinde kullanıldığı analizlerin, yerel zemin etkisinin temsilinde ampirik büyütme bağıntılarına göre daha kapsamlı bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir. Ampirik bağıntılar zemin büyütmesini sabit veya yarı ampirik katsayılarla ifade ederken, doğrusal olmayan saha modelleri zemin davranışını V_{s30} ile birlikte yer hareketi şiddetine bağlı olarak değerlendirmektedir. Bu yaklaşım, özellikle yumuşak zemin koşullarında gözlenen doğrusal olmayan zemin davranışının daha gerçekçi temsil edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar da, sahaya özgü ölçülmüş VS30 değerlerinin kullanıldığı analizlerin yerel zemin etkisini daha tutarlı şekilde yansıttığını göstermiş olup, literatürde önerilen doğrusal olmayan saha modeli yaklaşımını desteklemektedir.

4. TARTIŞMA

Çalışma sonucunda elde edilen bulgular, yerel zemin koşullarının Sakarya ili özelinde deprem tehlikesi üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Referans kaya koşulu (VS30=760 m/s) esas alınarak gerçekleştirilen analizlerde beş çalışma noktası için PGA değerleri 0,555–0,607 g, S_S değerleri 1,32–1,46 g ve S_1değerleri 0,255–0,269 g aralığında hesaplanmış olup, çalışma noktaları arasında oldukça sınırlı farklılıklar gözlenmiştir. Buna karşın, sahaya özgü ölçülmüş V_{S30} değerlerinin kullanılmasıyla birlikte özellikle uzun periyot spektral ivmelerinde belirgin değişimler meydana gelmiştir. Örneğin, ZE sınıfındaki Çark Caddesi noktasında S_1 değeri 0,265 g'den 0,868 g'ye, Erenler noktasında ise 0,268 g'den 0,881 g'ye yükselmiş olup, yaklaşık 3,3 katlık bir artış meydana gelmiştir. Benzer şekilde Güllük ve Serdivan bölgelerinde de S_1 değerleri sırasıyla 0,267 g'den 0,731 g'ye ve 0,269 g'den 0,592 g'ye yükselmiştir. Buna karşılık PGA değerlerinde aynı oranda bir artış gözlenmemiş, hatta ZE sınıfındaki bölgelerde doğrusal olmayan saha davranışının etkisiyle 0,597 g'den 0,493 g'ye ve 0,606 g'den 0,462 g'ye düşüşler meydana gelmiştir. Ölçülmüş V_{S30} değerleri kullanılarak elde edilen sonuçlar ile TBDY 2018 tasarım spektrumları karşılaştırıldığında, her iki yaklaşımın benzer eğilim sergilediği ancak yönetmelik spektrumlarının genel olarak daha konservatif sonuçlar verdiği görülmektedir. Örneğin, Çark Caddesi için ASK14 modeli ile 0,868 g olarak hesaplanan S_1 değeri, TBDY 2018'de 1,019 g; Güllük bölgesinde 0,731 g ve 0,831 g; Serdivan'da ise 0,592 g ve 0,853 g olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, yönetmeliğin güvenli tasarım yaklaşımı doğrultusunda daha yüksek spektral talepler öngördüğünü, ancak genel spektral eğilim bakımından yer hareketi tahmin modeli ile uyumlu olduğunu göstermektedir.

Çalışmada ayrıca, bağıl büyütme faktörleri kullanılarak elde edilen spektrumların özellikle kısa periyot bölgesinde TBDY 2018 tasarım spektrumlarının altında kaldığı, buna karşılık sahaya özgü ölçülmüş V_{S30} değerlerinin doğrudan ASK14 modeline tanımlanmasıyla elde edilen spektrumların yönetmelik spektrumlarına daha yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Bu durum, doğrusal olmayan saha terimlerini içeren güncel yer hareketi tahmin denklemlerinin yerel zemin davranışını yalnızca sabit büyütme katsayıları kullanan ampirik yaklaşımlara göre daha gerçekçi temsil edebildiğini göstermektedir. Bu bulgu, doğrusal olmayan saha büyütmesinin V_{S30} ve yer hareketi şiddetine bağlı olarak modellenmesinin önemini vurgulayan Seyhan ve Stewart [9], Abrahamson ve arkadaşları [20] ve Kuncar [37] tarafından önerilen yaklaşımlarla da uyumludur.

Elde edilen sonuçlar, Sakarya ilinin özellikle Adapazarı merkezinde kısa mesafelerde dahi önemli zemin farklılıklarının bulunduğunu ve bu farklılıkların deprem taleplerini önemli ölçüde değiştirebildiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, yoğun yapılaşmanın bulunduğu bölgelerde standart bölgesel tehlike değerlendirmeleri yerine, sahaya özgü ölçülmüş geoteknik veriler kullanılarak gerçekleştirilen olasılıksal deprem tehlike analizlerinin tercih edilmesi, hem mühendislik yapılarının güvenli tasarımı hem de kentsel dönüşüm ve afet risk yönetimi uygulamaları açısından daha güvenilir sonuçlar sağlayacaktır.

5. KAYNAKLAR

1. Burucu, Ö.N.T. (2019). Serdivan/Sakarya bölgesinin yerbilimleri verilerinin coğrafi bilgi sistemleri (CBS) kullanılarak yorumlanması. *Yüksek lisans tezi.* Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya.
2. Koç, D.E. (2018). Sakarya'nın bitki örtüsü özellikleri. (Ed. İkiel, C.), *Sakarya'nın Fiziki, Beşeri ve İktisadi Coğrafya Özellikleri,* Sakarya Üniversitesi Yayınları, Sakarya, 289-315.
3. AFAD, (20259. *AFAD deprem kataloğu.* https://deprem.afad.gov.tr/depremkatalogu, Erişim tarihi: 14 Eylül 2025.
4. AFAD, (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*. Resmî Gazete, Sayı: 30364 (Mükerrer), Ankara.
5. Borcherdt, R.D. (1994) Estimates of site-dependent response spectra for design (Methodology and justification). *Earthquake Spectra, 10*(4), 617-653.
6. Joyner, W.B. & Fumal, T.E. (1984). Use of measured shear-wave velocity for predicting geological site effects on strong motion. *8th World Conf. on Earthq. Eng.,* 777-783
7. Midorikawa, S. (1987). Prediction of isoseismal map in the Kanto plain due to hypothetical earthquake. *Journal of Structural Engineering, 33B*, 43-48.
8. Mazanec, M., Valenta, J. & Málek, J. (2024). Does - V S30 reflect seismic amplification ? Observations from the West Bohemia seismic network. *Natural Hazards, 120*(13), 12181-12202.
9. Boore, D.M., Stewart, J.P., Skarlatoudis, A.A., Seyhan, E., Margaris, B., Theodoulidis, N., Scordilis, E., Kalogeras, I., Klimis, N. & Melis, N.S. (2021). A ground-motion prediction model for shallow crustal earthquakes in greece. *Bulletin of the Seismological Society of America, 111*(2), 857-874.
10. NGA-*West Pacific Earthquake Engineering Research Center.* https://peer.berkeley.edu/nga-west, Erişim tarihi: 29 Aralık 2022.
11. Bozorgnia, Y., Abrahamson, N.A., Atik, L. Al, Ancheta, T.D., Atkinson, G.M., Baker, J.W., Baltay, A., Boore, D.M., Campbell, K.W., Chiou, B.S.J., Darragh, R., Day, S., Donahue, J., Graves, R.W., Gregor, N., Hanks, T., Idriss, I.M., Kamai, R., Kishida, T., Kottke, A., Mahin, S.A., Rezaeian, S., Rowshandel, B., Seyhan, E., Shahi, S., Shantz, T., Silva, W., Spudich, P., Stewart, J.P., Watson-Lamprey, J., Wooddell, K. & Youngs, R. (2014). NGA-West2 research project. *Earthquake Spectra, 30*(3), 973-987.
12. Stewart, J.P. & Seyhan, E. (2013). Semi-empirical nonlinear site amplification and its application in NEHRP site factors. *PEER Repor,* 59.
13. Darzi, A., Halldorsson, B., Cotton, F. & Rahpeyma, S. (2024). Nationwide frequency-dependent seismic site amplification models for Iceland. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 183*(May), 108798.
14. Ilhan, O., Muratoğlu, G., Askan, A. & Taciroğlu, E. (2025). An initial velocity model based on V S30 for the region affected by the February 6, 2023 Turkiye earthquakes. *Bulletin of Earthquake Engineering, 23*(9), 3569-3587
15. Silahtar, A., Budakoğlu, E., Kafadar, Ö. & Şenkaya, M. (2026). Characterizing soil dynamic parameters through ambient seismic noise in the Sakarya region of the north anatolian fault system. Natural Hazards, 122(9), 1-29.
16. Ozcep, T., Ozcep, F. & Ozel, O. (2013). V S 30, site amplifications and some comparisons: The Adapazari (Turkey) case. *Physics and Chemistry of the Earth, 63*, 92-101.
17. Ordaz, M., Aguılar, A. & Arboleda, J. (2007). CRISIS2007: Program for computing seismic hazard. *Instituto de Ingeniería,* Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Mexico.
18. Cornell, C.A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America, 58*(5), 1583-1606.
19. Akkar, S., Kale, Ö., Yakut, A. & Çeken, U. (2018). Ground-motion characterization for the probabilistic seismic hazard assessment in Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering, 16*(8), 3439-3463.
20. Abrahamson, N.A., Silva, W.J. & Kamai, R. (2014). Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions. *Earthquake Spectra, 30*(3), 1025-1055.
21. Boore, D.M., Stewart, J.P., Seyhan, E. & Atkinson, G.M. (2014). NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra, 30*(3), 1057-1085.
22. Chiou, B.S.J. & Youngs, R.R. (2014). Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra, 30*(3), 1117-1153.
23. Bıçak, Ö. (2018). Olasılıksal sismik tehlike analizi ve sahaya özel deprem spektrumu geliştirilmesi. *Yüksek lisans tezi.* Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.

24. Hamdache, M., Peláez, J.A., Talbı, A. & Mobarkı, M. (2010). Evaluation of probabilistic seismic hazard in Northern Algeria: A contribution to the Algerian building code. *5ème Symposium International sur la Construction en Zone Sismique (SICZS 2010),* Chlef, Algeria.
25. İnce, Y. (2016). Kahramanmaraş ve çevresinin olasılıksal sismik tehlike analizi. *Yüksek lisans tezi.* Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 47.
26. Ulutaş, H. (2012). Van ili sismik tehlike analizi. *Yüksek lisans tezi.* Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya.
27. Karaca, H. (2017). Güncel veriler ve olasiliksal sismik tehlike analizi kullanarak Eskişehir için sismik tehlike haritasi ve ivme eğrileri elde edilmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32*(1), 265-273.
28. Harman, E. ve Küyük, H.S. (2016). Sakarya ili için olasılığa dayalı sismik tehlike analizi. *Sakarya University Journal of Science, 20*(1), 23-31.
29. Zülfikar, A.C., Okuyan Akcan, S., Yeşilyurt, A., Eröz, M. ve Cimilli, T. (2021). Kritik enerji tesislerinin deprem risk değerlendirmesinde farklı hasargörebilirlik fonksiyonlarının incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36*(4), 1019-1032.
30. Mert, A. (2024). İzmit Körfezindeki limanlarda deprem yakın saha etkilerinin araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39*(4), 1015-1026.
31. Akkar, S., Duman, T., Ergintav, S., Tuba, F., Kartal, R.F. ve Tekin, S. (2014). *Türkiye sismik tehlike haritasi proje dokümanı*.
32. Poisson, S.D. (1838). *Recherches sur la probabilitedes jugements en matieres criminelles et matiere civile.* Bachelier, 415.
33. Borcherdt, R.D., Wentworth, C.M., Janssen, A., Fumal, T. & Gibbs, J. (1991), Methodology for predictive GIS mapping of special study zones for strong ground shaking in the San Francisco bay region. *California, 4th International Conference on Seismic Zonation, Stanford,* California, USA, 545-552.
34. Kramer, S.L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering.* Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 653.
35. QGIS Development Team, (2022). *QGIS geographic information system.* https://www.qgis.org, Erişim tarihi: 14 Eylül 2026.
36. WoessneR, J., Danciu, L., Giardini, D., Crowley, H., Cotton, F., Grünthal, G., Valensise, G., Arvidsson, R., Basili, R., Demircioglu, M.B., Hiemer, S., Meletti, C., Musson, R.W., Rovida, A.N., Sesetyan, K. & Stucchi, M. (2015). The 2013 European seismic hazard model: Key components and results. *Bulletin of Earthquake Engineering, 13*(12), 3553-3596.
37. Kuncar, F., Bradley, B.A. & De La Torre, C.A. (2026). Validating VS30-based site amplification factors in hybrid broadband ground-motion simulation of small-magnitude earthquakes in New Zealand. *Earthquake Spectra, 42*(1), e70005

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

Makine Öğrenmesi Modelleri Kullanılarak Eriyik Yığma Modellemesi Süreçlerinde Enerji Verimliliğine Yönelik Parametre Optimizasyonu

Mehmet Şah GÜLTEKİN [1,a], **Cüneyt ÖZDEMİR** [2,b]

[1]*Siirt Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Siirt, Türkiye*
[2]*Siirt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Siirt, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0002-1251-9219; [b]**ORCID**: 0000-0002-9252-5888*

Makale Bilgileri
Geliş : 04.01.2026
Kabul : 31.08.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1855791

Sorumlu Yazar
Mehmet Şah GÜLTEKİN
mehmetsahgultekin@siirt.edu.tr

Anahtar Kelimeler
***E**klemeli imalat*
***F**DM*
***M**akine öğrenmesi*
***O**ptimizasyon*
***P**LA*

***Atıf şekli:** GÜLTEKİN, M.Ş., ÖZDEMİR, C., (2026). Makine Öğrenmesi Modelleri Kullanılarak Eriyik Yığma Modellemesi Süreçlerinde Enerji Verimliliğine Yönelik Parametre Optimizasyonu. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 623-634.*

ÖZ

Eklemeli imalat teknolojilerinin endüstriyel uygulamalarda yaygınlaşması, üretim süreçlerinde enerji verimliliğini sürdürülebilir üretim açısından kritik bir araştırma alanı hâline getirmiştir. Bu çalışma, FDM (Fused Deposition Modeling) yöntemiyle gerçekleştirilen üç boyutlu baskı süreçlerinde enerji tüketiminin tahmin edilmesine yönelik makine öğrenmesi tabanlı bir yaklaşım önermektedir. Çalışmada farklı baskı hızları, nozul sıcaklıkları, doluluk oranları ve katman kalınlıkları kullanılarak PLA numuneler üretilmiş; üretim sırasında enerji tüketimi gerçek zamanlı olarak dijital wattmetre ile ölçülmüştür. Elde edilen veriler Random Forest ve XGBoost algoritmaları kullanılarak analiz edilmiş ve baskı parametrelerinin enerji tüketimi üzerindeki etkileri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Bulgular, doluluk oranı ve nozul sıcaklığının enerji tüketimini belirleyen en etkili parametreler olduğunu, baskı hızının ise enerji tüketimi üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Geliştirilen tahmin modelleri, üretim öncesinde enerji tüketiminin yüksek doğrulukla öngörülmesine olanak sağlamış ve optimum süreç parametrelerinin belirlenmesine katkı sunmuştur. Gerçek zamanlı deneysel ölçümlere dayalı olarak geliştirilen bu yaklaşım, FDM süreçlerinde enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik karar destek mekanizmalarının geliştirilmesine katkı sağlayarak sürdürülebilir eklemeli imalat uygulamaları için bilimsel bir temel sunmaktadır.

Parameter Optimization for Energy Efficiency in Fused Deposition Modeling Using Machine Learning Models

Article Info
Received : 04.01.2026
Accepted : 31.08.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1855791

Corresponding Author
Mehmet Şah GÜLTEKİN
mehmetsahgultekin@siirt.edu.tr

Keywords
***A**dditive manufacturing*
***F**DM*
***M**achine learning*
***O**ptimization*
***P**LA*

***How to cite:** GÜLTEKİN, M.Ş., ÖZDEMİR, C., (2026). Parameter Optimization for Energy Efficiency in Fused Deposition Modeling Using Machine Learning Models. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 623-634.*

ABSTRACT

The widespread adoption of additive manufacturing technologies in industrial applications has made energy efficiency a critical research topic for sustainable manufacturing. This study proposes a machine learning-based approach for predicting energy consumption in Fused Deposition Modeling (FDM) three-dimensional printing processes. PLA specimens were fabricated using different printing speeds, nozzle temperatures, infill densities, and layer thicknesses, while energy consumption during the printing process was measured in real time using a digital power meter. The collected data were analyzed using the Random Forest and XGBoost algorithms to statistically evaluate the effects of printing parameters on energy consumption. The results revealed that infill density and nozzle temperature were the most influential factors affecting energy consumption, while printing speed also had a significant impact on the overall energy demand. The developed prediction models enabled highly accurate estimation of energy consumption prior to production and facilitated the identification of optimal process parameters. Based on real-time experimental measurements, the proposed approach contributes to the development of decision-support mechanisms for improving energy efficiency in FDM processes and provides a scientific foundation for sustainable additive manufacturing applications.

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat teknolojileri son yıllarda tasarım özgürlüğü, kişiselleştirilebilir üretim olanağı ve malzeme kullanımındaki verimlilik gibi avantajlar nedeniyle endüstriyel uygulamalarda hızla yaygınlaşmıştır [1,2]. Bu teknolojilerin artan kullanımı, üretim süreçlerinin sürdürülebilirlik boyutunun daha fazla önem kazanmasına yol açmış; özellikle enerji tüketiminin doğru modellenmesi ve optimize edilmesi, hem çevresel etkilerin azaltılması hem de üretim verimliliğinin artırılması açısından kritik bir araştırma alanı hâline gelmiştir [3,4]

Fused Deposition Modeling (FDM) yöntemi, yaygın kullanımına karşın enerji tüketimini etkileyen çok sayıda işlem parametresine sahip karmaşık bir üretim sürecidir. Doluluk oranı, baskı hızı, nozul sıcaklığı ve katman kalınlığı gibi parametrelerin enerji tüketimi üzerindeki bireysel ve etkileşimli etkilerinin ayrıntılı biçimde anlaşılması, FDM süreçlerinin daha sürdürülebilir yönetilmesi için gereklidir [5-7].

Literatürde enerji verimliliğine yönelik çalışmaların büyük bölümü ya deneysel gözlemlerle sınırlı kalmakta ya da sınırlı parametre setleri üzerinden değerlendirme yapmaktadır. Bununla birlikte, güncel akıllı üretim yaklaşımları gerçek zamanlı veri toplama ve makine öğrenmesi yöntemleriyle desteklenen daha bütüncül modelleme ihtiyaçlarını ortaya koymaktadır [8,9]. Özellikle makine öğrenmesi tabanlı tahmin modellerinin son dönemde artan şekilde enerji tüketimi analizlerinde kullanıldığı görülmektedir [10,11]

Bu bağlamda, FDM süreçlerinde enerji tüketiminin yüksek doğrulukla tahmin edilmesi ve optimum baskı parametrelerinin belirlenmesi, sürdürülebilir üretim stratejilerinin tasarlanmasına önemli katkılar sunmaktadır. Bu çalışma, farklı baskı parametreleri altında üretilen PLA numunelerden elde edilen gerçek zamanlı güç tüketimi verilerini kullanarak enerji tüketiminin makine öğrenmesi tabanlı olarak modellenmesini amaçlamaktadır. Random Forest ve XGBoost algoritmalarının kullanıldığı bu yaklaşım, enerji tüketimini etkileyen kritik değişkenleri belirlemenin yanı sıra üretim öncesinde enerji ihtiyacının öngörülmesine olanak tanıyan pratik bir karar destek mekanizması sunmaktadır [8,9]. Böylece çalışma, FDM süreçlerinin enerji verimliliği açısından optimize edilmesine yönelik literatürdeki mevcut boşluğu doldurmayı ve sürdürülebilir eklemeli imalat uygulamalarına katkı sağlamayı hedeflemektedir [12].

FDM tabanlı eklemeli imalat süreçlerinde yalnızca enerji tüketimi değil, aynı zamanda yüzey kalitesi, boyutsal doğruluk ve mekanik dayanım gibi performans kriterleri de büyük önem taşımaktadır. Baskı parametrelerinde yapılan değişiklikler enerji tüketimini azaltırken yüzey kalitesini veya mekanik özellikleri olumsuz etkileyebileceğinden, optimum baskı koşullarının belirlenmesi çok amaçlı bir optimizasyon problemi olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle enerji verimliliğini artırmaya yönelik çalışmaların üretim kalitesini de göz önünde bulundurması gerekmektedir.

FDM süreçlerinde doluluk oranı, nozul sıcaklığı, baskı hızı ve katman kalınlığı gibi işlem parametrelerinin yalnızca enerji tüketimi üzerinde değil, aynı zamanda üretilen parçaların mekanik dayanımı, çekme mukavemeti ve yüzey kalitesi üzerinde de belirleyici etkileri olduğu literatürdeki temel çalışmalarda gösterilmiştir [13,14]. Literatürde PLA'nın yanı sıra ABS, PETG ve yüksek performanslı polimerlerin enerji tüketim profilleri incelenmiş; thermal bed (ısıtıcı tabla) ve ekstrüder güç taleplerinin malzeme türüne göre belirgin farklılıklar gösterdiği bildirilmiştir [15,16]. Enerji tüketiminin tahmin edilmesinde ve parametrelerin etkilerinin analiz edilmesinde Yanıt Yüzey Metodu (YYM), Yapay Sinir Ağları (YSA) ve geleneksel regresyon analizleri sıklıkla kullanılmış; ancak son yıllarda karmaşık, doğrusal olmayan verisetlerinde yüksek başarım gösteren makine öğrenmesi algoritmaları ön plana çıkmıştır [17,18]. Bununla birlikte, süreç optimizasyonunda yalnızca enerji tasarrufunu değil, üretim süresi ve mekanik performansı eş zamanlı olarak ele alan çok amaçlı (multi-objective) optimizasyon yaklaşımlarının gerekliliği vurgulanmaktadır [19-22,25,26].

Bu bağlamda, bu çalışmanın literatürdeki mevcut araştırmalardan temel özgün yönleri; (i) 1 Hz örnekleme frekansında yüksek çözünürlüklü ve gerçek zamanlı güç ölçümlerine dayanması, (ii) Random Forest ve XGBoost gibi iki güçlü topluluk öğrenme (ensemble) algoritmasını karşılaştırmalı olarak değerlendirmesi ve (iii) yalnızca bir tahmin modeli sunmayıp minimum enerji tüketimini hedefleyen deneysel olarak doğrulanmış bir optimizasyon çerçevesi sunmasıdır. Bu özgün yönleriyle çalışma, gerçek zamanlı ölçüme dayalı, karşılaştırmalı ve deneysel olarak doğrulanmış bir optimizasyon çerçevesi sunarak alana bütüncül bir katkı sağlamaktadır [23,24].

2. YÖNTEM

Bu çalışmada, FDM (Fused Deposition Modeling) teknolojisiyle üretilen PLA numunelerde enerji tüketiminin tahmin edilmesi ve optimize edilmesine yönelik makine öğrenmesi tabanlı bir yöntem uygulanmıştır. Deneysel çalışmalar, kontrollü bir laboratuvar ortamında ticari tip bir FDM yazıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Baskı süreci boyunca güç tüketimi, yazıcıya entegre edilen yüksek hassasiyetli bir enerji ölçüm modülü aracılığıyla gerçek zamanlı olarak kaydedilmiştir. Ölçüm sistemi, anlık akım ve gerilim değerlerini 1 Hz örnekleme frekansında kaydederek toplam enerji tüketiminin doğru şekilde hesaplanmasını sağlamıştır.

2.1. Numune Üretimi ve Deney Parametreleri

Deneylerde ticari sınıf PLA filament (1.75 mm) kullanılmıştır. Enerji tüketimini etkileyen dört temel işlem parametresi değerlendirilmiştir Çizelge 1'de parametreler verilmiştir.

Çizelge 1. İşlem parametreleri

Parametre	Sembol	Birim	Aralık
Baskı hızı	v	mm/s	40 – 80
Nozul sıcaklığı	T_n	°C	190 – 220
Doluluk oranı	ρ	%	20 – 80
Katman kalınlığı	t	mm	0.10 – 0.30

Bu parametre kombinasyonlarıyla standart geometriye sahip test numuneleri üretilmiş, her parametre seti üç tekrar ile doğrulanmıştır. Tüm üretimlerde 0.4 mm çapında nozul ve 60 °C tabla sıcaklığı kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalar laboratuvar ortamında Creality Ender-3 V3 SE FDM tipi üç boyutlu yazıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Baskı işlemleri boyunca tüm numuneler aynı üretim koşullarında üretilmiş ve deneyler sabit baskı ortamında yürütülmüştür. Deneylerde kullanılan yazıcı ve baskı süreci Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Deneylerde kullanılan Creality Ender-3 V3 SE FDM yazıcısı ve baskı süreci

Çalışmada kullanılan Eriyik Yığma Modellemesi teknolojisinin temel çalışma prensibi ve süreçte enerji tüketen kritik bileşenleri aşağıda açıklanmaktadır. Süreçte filament makarasından beslenen termoplastik malzeme (PLA), ekstrüder mekanizması aracılığıyla ısıtılmış nozula iletilmekte ve erime sıcaklığına ulaştırılarak katman katman yazıcı tablası üzerine serilmektedir. Sisteminde toplam elektriksel güç tüketimi esas olarak üç temel eksendeki step motorların mekanik hareketlerinden, nozuldaki termal ısıtıcı bloğundan ve tabla sıcaklığını sabit tutan ısıtma elemanlarından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle baskı hızı,

nozul sıcaklığı ve katman kalınlığı gibi işlem parametrelerinin doğrudan bu bileşenlerin anlık güç çekimlerini etkilediği görülmektedir [27,28].

Çizelge 2, Creality Ender-3 V3 SE yazıcının teknik özelliklerini özetlemektedir. Yazıcı, 220x220x250 mm'lik geniş bir baskı hacmine sahip olup, FDM (Eritilmiş Biriktirme Modelleme) teknolojisini kullanmaktadır. Cihaz, maksimum 260°C nozul sıcaklığı ve 100°C tabla sıcaklığı kapasitesi sayesinde, PLA, PETG, TPU ve ABS dahil olmak üzere geniş bir filament yelpazesini destekleyebilmektedir. Yazıcının nozul çapı standart olarak 0,4 mm'dir ve baskı hızı normalde 180 mm/s civarında tavsiye edilmektedir.

Çizelge 2. Creality Ender-3 V3 SE yazıcısının teknik özellikleri

Açıklama	**Ölçüler / Özellik**
Yazıcı modeli	Creality Ender-3 V3 SE
Baskı teknolojisi	FDM (Fused Deposition Modeling)
Baskı hacmi	220 × 220 × 250 mm
Baskı hızı	Maksimum 250 mm/s (önerilen 180 mm/s)
Baskı hassasiyeti	±0,1 mm
Katman kalınlığı	0,10–0,35 mm
Nozul çapı	0,40 mm
Maksimum nozul sıcaklığı	260 °C
Maksimum tabla sıcaklığı	100 °C
Filament çapı	1,75 mm
Desteklenen filamentler	PLA, PETG, TPU, ABS
Güç kaynağı	350 W, 100–240 V AC

Çizelge 3, deneylerde kullanılan Creality Ender-3 V3 SE yazıcısı için Creality Print yazılımında belirlenen temel baskı (dilimleme) parametrelerini göstermektedir. Deneylerde 1,75 mm çapında PLA filament kullanılmıştır. Baskılar sırasında katman kalınlığı, baskı hızı, nozul sıcaklığı ve doluluk oranı deney planına göre değiştirilirken, diğer dilimleme parametreleri tüm deneylerde sabit tutulmuştur. Böylece enerji tüketimi üzerindeki değişimin yalnızca deneysel faktörlerden kaynaklanması sağlanmıştır.

Çizelge 3. Deneylerde kullanılan dilimleme (slicing) parametreleri

Açıklama	**Ölçüler / Özellik**
Yazıcı	Creality Ender-3 V3 SE
Dilimleme yazılımı	Creality Print
Malzeme	PLA
Filament çapı	1,75 mm
Nozul çapı	0,40 mm
Katman kalınlığı	0,10–0,30 mm
Baskı hızı	40–80 mm/s
Nozul sıcaklığı	190–220 °C
Tabla sıcaklığı	60 °C
Doluluk oranı	%20–80
Dolgu deseni	Lines
Soğutma fanı	%100
Destek yapısı	Kullanılmadı

Baskı sürecinde enerji tüketimi, **TOGRAT dijital priz tipi wattmetre (220 V, 16 A, 3680 W)** kullanılarak gerçek zamanlı olarak ölçülmüştür. Ölçüm cihazı yazıcı ile şebeke arasına bağlanarak baskı süresince anlık güç (W), gerilim (V), akım (A), frekans (Hz) ve toplam enerji tüketimi (kWh) değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen ölçüm verileri deney sonunda kayıt altına alınmış ve makine öğrenmesi modellerinin eğitim ve doğrulama aşamalarında kullanılmıştır. Ölçüm cihazına ait teknik özellikler Çizelge 4'te sunulmuştur.

Çizelge 4. Deneylerde kullanılan enerji ölçüm cihazının teknik özellikleri

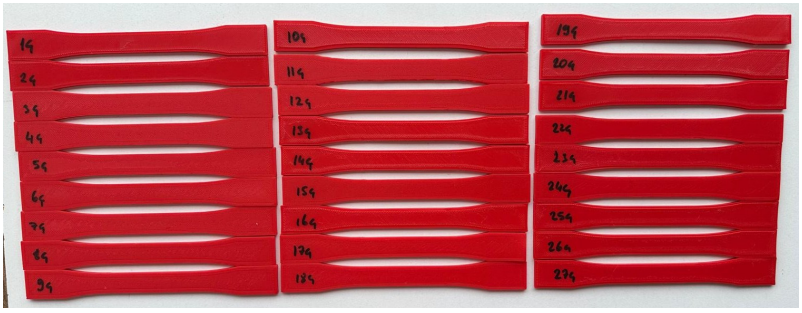
Özellik	Değer
Cihaz	TOGRAT Dijital Priz Tipi Wattmetre
Besleme gerilimi	220–240 V AC
Maksimum akım	16 A
Maksimum güç	3680 W
Frekans	50 Hz
Ölçülen parametreler	Gerilim (V), Akım (A), Güç (W), Enerji Tüketimi (kWh), Enerji Maliyeti
Güç gösterim çözünürlüğü	0,1 W
Ekran tipi	Arka aydınlatmalı LCD
Ölçüm yöntemi	Gerçek zamanlı priz tipi enerji ölçümü

Baskı işlemleri sırasında yazıcının elektriksel güç tüketimi prize bağlanan dijital enerji ölçüm cihazı kullanılarak gerçek zamanlı olarak kaydedilmiştir. Ölçüm cihazı baskı süresince anlık güç değerlerini sürekli olarak izleyerek enerji tüketiminin hesaplanmasında kullanılmıştır. Ölçüm sürecine ait örnek ekran görüntüleri Şekil 2'te verilmiştir.



Şekil 2. TOGRAT dijital wattmetre ile baskı sürecinde gerçekleştirilen gerçek zamanlı enerji tüketimi ölçümleri: (a) baskının başlangıç aşaması, (b) baskı sırasında anlık güç tüketimi

Deney kapsamında her parametre kombinasyonu için PLA çekme test numuneleri üretilmiş ve numuneler deney planına uygun şekilde kodlanmıştır. Üretilen numuneler daha sonra enerji tüketimi analizlerinde ve makine öğrenmesi modellerinin oluşturulmasında kullanılmıştır. Farklı deney koşullarında üretilen numuneler Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Farklı baskı parametre kombinasyonlarında üretilen PLA çekme test numuneleri

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Veri Toplama ve Ön İşlem

Baskı süreci boyunca, üretimin başlama anından tamamlanmasına kadar geçen süre zarfında yazıcıdan elde edilen anlık güç tüketim verileri yüksek zaman çözünürlüğü ile sürekli olarak kaydedilmiştir. Bu veriler kullanılarak her bir numune için toplam enerji tüketimi (Wh) cinsinden hesaplanmıştır. Elde edilen ham veri seti, ölçüm cihazlarından ve çevresel etkilerden kaynaklanabilecek gürültü ve tutarsızlıkları gidermek amacıyla kapsamlı bir ön işleme sürecine tabi tutulmuştur.

Ön işleme aşamasında; ilk olarak anormal değerlerin tespiti ve giderilmesi için istatistiksel eşikleme yöntemleri uygulanmış, ardından veri bütünlüğünü sağlamak amacıyla eksik veri kontrolü gerçekleştirilmiştir. Eksik veya hatalı ölçümlerin bulunması durumunda, bu gözlemler veri setinden çıkarılmış ya da uygun interpolasyon yöntemleri ile düzeltilmiştir. Modelleme sürecinde değişkenler arası ölçek farklılıklarının tahmin performansını olumsuz etkilemesini önlemek amacıyla tüm sürekli değişkenler normalize edilmiştir.

Her bir numune için; toplam üretim süresi, baskı süresince ölçülen anlık güç değerlerinin ortalaması ve toplam enerji tüketimi bağımlı değişkenler kapsamında değerlendirilirken; nozul sıcaklığı, tabla sıcaklığı, baskı hızı, doluluk oranı ve katman kalınlığı gibi baskı parametreleri bağımsız değişkenler olarak modele dâhil edilmiştir. Bu yapı, enerji tüketiminin hem zamansal hem de süreç parametreleriyle olan ilişkisini kapsamlı biçimde incelemeye imkân sağlamıştır.

3.2. Makine Öğrenmesi Modelleri

Enerji tüketiminin doğru ve güvenilir bir şekilde tahmin edilebilmesi amacıyla, literatürde regresyon problemlerinde yüksek performans gösterdiği bilinen iki farklı makine öğrenmesi algoritması kullanılmıştır: Random Forest Regressor ve XGBoost Regressor. Bu modeller, doğrusal olmayan ilişkileri ve parametreler arasındaki karmaşık etkileşimleri başarıyla temsil edebilme yetenekleri nedeniyle tercih edilmiştir.

Oluşturulan veri seti, modelin genelleme yeteneğini değerlendirmek amacıyla %80 eğitim ve %20 test verisi olacak şekilde rastgele bölünmüştür. Model performansını en üst düzeye çıkarmak amacıyla, her iki algoritma için de ağaç sayısı, maksimum derinlik, öğrenme oranı ve alt örnekleme oranı gibi temel hiperparametreler grid-search tabanlı hiperparametre optimizasyonu yöntemiyle belirlenmiştir.

Eğitilen modellerin başarımı; determinasyon katsayısı (R^2), kök ortalama kare hata (RMSE) ve ortalama mutlak hata (MAE) metrikleri kullanılarak nicel olarak değerlendirilmiştir. Buna ek olarak, modeller tarafından hesaplanan değişken önem düzeyleri analiz edilerek enerji tüketimi üzerinde en etkili baskı parametreleri belirlenmiş ve bu parametrelerin üretim süreci üzerindeki fiziksel anlamları yorumlanmıştır.

Makine öğrenmesi modellerinin geliştirilmesi, veri ön işleme ve performans değerlendirme süreçleri Python 3.10 programlama dili ortamında scikit-learn (v1.3.0) ve xgboost (v1.7.6) kütüphaneleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Verisetindeki doğrusal olmayan (non-linear) karmaşık ilişkileri ve parametre etkileşimlerini yüksek doğrulukla temsil edebilme yetenekleri, aşırı öğrenmeye (overfitting) karşı dirençli olmaları ve küçük/orta ölçekli veri setlerinde sergiledikleri yüksek genelleme başarısı nedeniyle ensemble (topluluk) öğrenme yöntemlerinden Random Forest Regressor ve XGBoost Regressor algoritmaları tercih edilmiştir.

4. SONUÇLAR

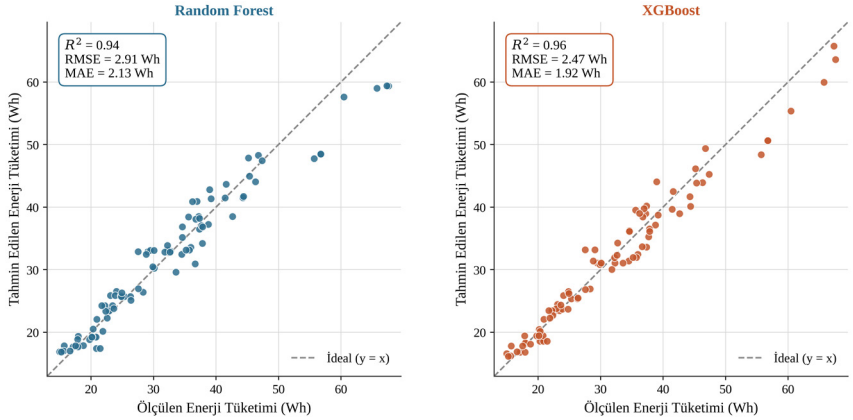
Bu çalışmada farklı baskı parametreleri altında gerçekleştirilen FDM üretimlerinden elde edilen gerçek zamanlı güç ölçümleri analiz edilerek toplam enerji tüketimini etkileyen temel değişkenler belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, FDM süreçlerinde enerji tüketiminin tek bir parametreye bağlı olmadığını; doluluk oranı, nozul sıcaklığı, baskı hızı ve katman kalınlığının etkileşimli olarak süreci şekillendirdiğini göstermektedir.

Deneysel veriler üzerinde eğitilen makine öğrenmesi modelleri yüksek tahmin doğruluğu sağlamıştır. Random Forest modeli test verisinde R^2=0.93, XGBoost modeli ise R^2=0.95 başarı göstermiş; her iki modelde de RMSE değerleri düşük seviyede kalarak enerji tüketiminin güvenilir biçimde tahmin edilebildiğini ortaya koymuştur. Değişken önem analizine göre **doluluk oranı**, enerji tüketimindeki en baskın değişken olarak belirlenmiş; bunu **nozul sıcaklığı** ve **baskı hızı** izlemiştir. Doluluk oranının artmasıyla birlikte toplam enerji tüketiminin doğrusal olmayan bir şekilde yükseldiği, özellikle %60 üzerindeki yoğunluklarda artışın belirginleştiği gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, yüksek nozul sıcaklığı hem güç gereksinimini artırmakta hem de baskı süresi üzerindeki etkisi nedeniyle toplam enerji tüketimini yükseltmektedir. Modellerin nicel performans karşılaştırması Çizelge 5'te özetlenmiştir.

Çizelge 5. Makine öğrenmesi modellerinin performans karşılaştırması

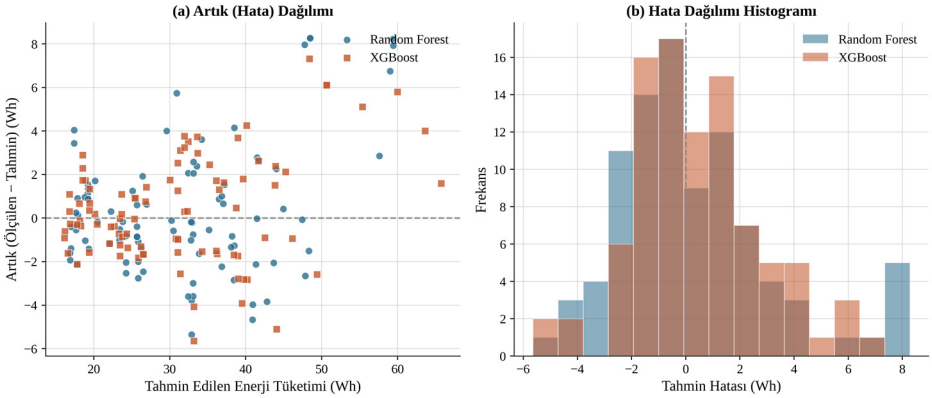
Model	R^2 skoru	Hata metriği (RMSE/MAE)	Kullanım amacı
Random forest	0.93	Düşük RMSE	Tahminleme ve Karşılaştırma
XGBoost	**0.95**	Düşük RMSE	En Yüksek Doğruluk ve Değişken Önem Analizi
Doğrulama (Optimizasyon)	-	**MAE < %5**	Optimum Parametre Setinin Test Edilmesi

Random Forest ve XGBoost modellerinin test verisi üzerindeki tahmin başarımı Şekil 4'te ölçülen ve tahmin edilen enerji tüketimi değerlerinin karşılaştırıldığı saçılım grafikleriyle görselleştirilmiştir. Veri noktalarının ideal doğru (y = x) çevresinde yoğunlaşması modellerin yüksek tahmin doğruluğunu desteklemekte; XGBoost modelinin daha dar bir saçılım sergilemesi Çizelge 5'teki daha yüksek R^2 ve daha düşük RMSE değerleriyle uyumludur.



Şekil 4. Test verisinde ölçülen ve tahmin edilen enerji tüketiminin karşılaştırması: (a) Random Forest, (b) XGBoost

Modellerin tahmin hatalarının yapısı Şekil 5'te artık dağılımı ve hata histogramı ile incelenmiştir. Artıkların sıfır ekseni çevresinde belirgin bir yanlılık göstermeden dağılması ve hataların sıfır etrafında dar bir bantta yoğunlaşması, her iki modelin de sistematik bir sapma içermeden güvenilir tahminler ürettiğini göstermektedir.



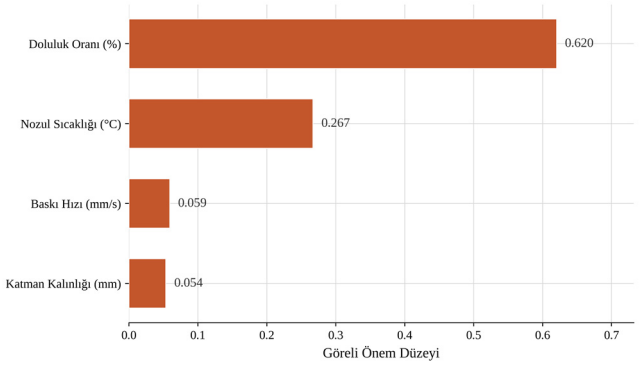
Şekil 5. Makine öğrenmesi modellerinin tahmin hatalarının analizi: (a) artık (ölçülen − tahmin) dağılımı, (b) hata dağılımı histogramı

Baskı hızının enerji tüketimi üzerindeki etkisi ise daha karmaşık bir ilişki göstermiştir. Düşük hızlarda baskı süresinin uzaması enerji tüketimini artırırken, çok yüksek hızlarda nozulun daha fazla güç talep etmesi toplam tüketimi yeniden yükseltmiştir. Bu durum baskı hızında bir **optimum denge noktası** bulunduğunu ortaya koymuştur. Katman kalınlığının artması ise baskı süresini kısalttığı için enerji tüketimini genel olarak azaltma eğilimi göstermiştir. Baskı parametrelerinin enerji tüketimine etkisi ve karakteristik davranışları Çizelge 6'da özetlenmiştir.

Çizelge 6. Baskı parametrelerinin enerji tüketimine etkisi ve karakteristiği

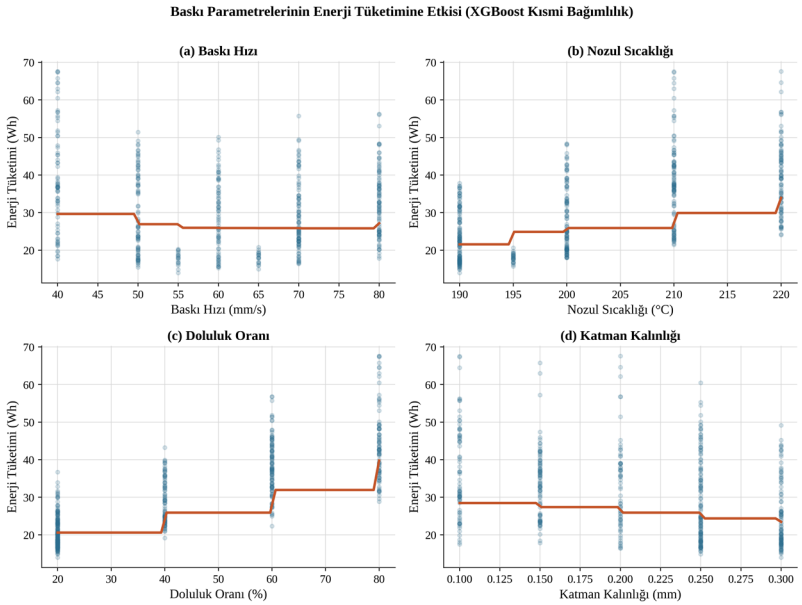
Baskı parametresi	Enerji tüketimine etkisi	Değişken önem düzeyi	Davranış karakteristiği ve gözlem
Doluluk oranı	Artırır	1. (En yüksek)	Doğrusal olmayan artış; özellikle %60 üzerinde belirgin enerji yükselişi.
Nozul sıcaklığı	Artırır	2. (Yüksek)	Hem anlık güç gereksinimini hem de dolaylı olarak süreci etkileyerek tüketimi artırır.
Baskı hızı	Karmaşık (Optimum denge)	3. (Orta)	Düşük hızlarda süre uzamasıyla, çok yüksek hızlarda ise artan güç talebiyle tüketim artar (U-benzeri davranış).
Katman kalınlığı	Azaltır	4. (Düşük)	Baskı süresini kısalttığı için toplam enerji tüketimini düşürme eğilimindedir.

Baskı parametrelerinin enerji tüketimi üzerindeki göreli önemi Şekil 6'da XGBoost modelinden elde edilen önem düzeyleriyle görselleştirilmiştir. Doluluk oranının açık ara en baskın değişken olduğu, bunu nozul sıcaklığının izlediği; baskı hızı ve katman kalınlığının ise görece düşük etkiye sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 6. XGBoost modeline göre baskı parametrelerinin enerji tüketimine göreli önemi

Parametrelerin enerji tüketimi üzerindeki bireysel etkileri Şekil 7'deki kısmi bağımlılık eğrileriyle ayrıntılı olarak incelenebilir. Doluluk oranının artmasıyla enerji tüketiminin doğrusal olmayan biçimde ve özellikle %60 üzerinde belirgin şekilde yükseldiği; baskı hızının orta aralıkta minimuma ulaşıp çok yüksek değerlerde yeniden arttığı (U-benzeri davranış); katman kalınlığının artmasının ise baskı süresini kısaltarak toplam tüketimi azalttığı gözlenmektedir.



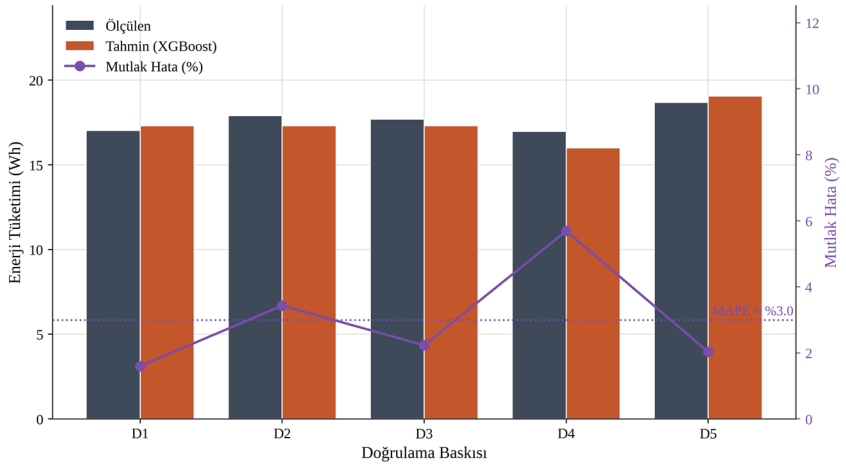
Şekil 7. Baskı parametrelerinin enerji tüketimine etkisi (XGBoost kısmi bağımlılık eğrileri): (a) baskı hızı, (b) nozul sıcaklığı, (c) doluluk oranı, (d) katman kalınlığı

Optimizasyon analizleri sonucunda XGBoost modeli kullanılarak minimum enerji tüketimini sağlayan baskı parametreleri belirlenmiştir. Optimum kombinasyonun düşük doluluk oranı, orta seviye baskı hızı ve orta-alt aralıkta nozul sıcaklığı ile elde edildiği tespit edilmiştir. Bu parametre setiyle gerçekleştirilen doğrulama baskılarında model tarafından öngörülen enerji tüketimi ile ölçülen değerler arasında düşük hata oranı (MAE < 5%) görülmüştür. Çizelge 7'de optimum Üretim Parametreleri verilmiştir.

Çizelge 7. Optimum üretim parametreleri

Parametre	Enerji tasarrufu için tespit edilen optimum seviye
Doluluk oranı	%20
Baskı hızı	60 mm/s
Nozul sıcaklığı	200°C
Katman kalınlığı	0.30 mm

Optimum parametre setinin geçerliliği Şekil 8'de sunulan doğrulama baskılarıyla değerlendirilmiştir. Ölçülen ve model tarafından tahmin edilen enerji tüketimi değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu ve ortalama mutlak yüzde hatanın (MAPE) yaklaşık %3 düzeyinde kalarak %5 hedefinin altında gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 8. Optimum parametrelerle yapılan doğrulama baskılarında ölçülen ve tahmin edilen enerji tüketimi ile mutlak hata (MAPE ≈ %3)

Elde edilen sonuçlar, FDM süreçlerinin enerji verimliliğinin yalnızca tek bir üretim parametresinin değiştirilmesiyle değil, çoklu parametre optimizasyonu ile önemli ölçüde iyileştirilebileceğini göstermektedir. Makine öğrenmesi tabanlı yaklaşım, hem üretim öncesi enerji ihtiyacının yüksek doğrulukla tahmin edilmesini sağlamakta hem de sürdürülebilir üretime yönelik karar süreçlerine etkin şekilde katkı sunmaktadır.

Bu çalışmada enerji tüketiminin tahmin edilmesine odaklanılmış olup yüzey pürüzlülüğü veya diğer kalite karakteristikleri deneysel olarak değerlendirilmemiştir. Gelecek çalışmalarda enerji tüketimi ile yüzey kalitesi, mekanik özellikler ve üretim süresinin birlikte ele alınması, optimum baskı parametrelerinin belirlenmesine katkı sağlayacaktır.

4.1. Tartışma

Bu çalışmada FDM süreçlerinde enerji tüketiminin hem deneysel veriler hem de makine öğrenmesi tabanlı modeller aracılığıyla analiz edilmesi, eklemeli imalatın sürdürülebilirlik boyutuna yönelik önemli bulgular ortaya koymuştur. Sonuçlar, enerji tüketiminin tek bir üretim parametresine indirgenemeyecek kadar karmaşık bir yapıya sahip olduğunu, özellikle doluluk oranı ve nozul sıcaklığı gibi parametrelerin sistem üzerinde baskın rol oynadığını göstermektedir. Literatürde enerji tüketimi çoğunlukla baskı süresi ile ilişkilendirilirken, bu çalışmada doğrudan güç ölçümü yoluyla elde edilen veriler enerji profilinin daha ayrıntılı şekilde değerlendirilmesine olanak tanımıştır. Bu yönüyle çalışma, gerçek zamanlı sensör tabanlı veri toplamanın enerji analizlerinde sağladığı avantajları vurgulamaktadır.

Random Forest ve XGBoost modellerinin yüksek doğrulukla enerji tüketimini tahmin edebilmesi, FDM süreçlerinde makine öğrenmesinin güçlü bir karar destek aracı olabileceğini ortaya koymaktadır. Literatürde benzer çalışmalar çoğunlukla sınırlı parametre setleri veya teorik tüketim modelleri üzerinden yürütülürken, bu araştırma gerçek üretim koşullarından elde edilen çok boyutlu veri setiyle daha gerçekçi ve pratik bir yaklaşım sunmaktadır. Özellikle XGBoost modelinin değişken önem analizinde doluluk oranını en kritik parametre olarak belirlemesi, önceki araştırmaların doluluk oranının malzeme tüketimi ve mekanik performans üzerindeki etkisine odaklanan bulgularıyla uyumludur; ancak bu çalışma doluluk oranının enerji tüketimi açısından da belirleyici bir faktör olduğunu nicel olarak ortaya koymuştur.

XGBoost modelinin Random Forest Regressor'e kıyasla daha yüksek bir açıklayıcılık katsayısı ($R^2 = 0.95$) ve daha düşük RMSE değeri sunmasının temel nedeni; XGBoost'un gradyan artırma (gradient boosting) altyapısı sayesinde ağaçları sıralı olarak eğitmesi, bir önceki ağacın artık hatalarını (residuals) sonraki adımlarda minimize etmesi ve parametreler arasındaki yüksek boyutlu doğrusal olmayan etkileşimleri daha hassas bir biçimde modelleyebilmesidir.

Baskı hızına ilişkin bulgular, üretim süresi ile güç tüketimi arasındaki doğrusal olmayan dengeyi göstermesi bakımından dikkat çekicidir. Literatürde bazı çalışmalar hızın yalnızca baskı süresini etkilediğini ileri sürerken, bu araştırmada yüksek hızlarda nozulun artan güç talebi nedeniyle toplam enerji tüketiminin yeniden yükseldiği görülmüştür. Bu durum, enerji verimliliği odaklı süreç optimizasyonunda hız parametresinin hem termal hem de mekanik yüklerle birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Bu çalışmanın bir diğer önemli katkısı, optimum üretim parametrelerinin makine öğrenmesi modelleri kullanılarak belirlenmesidir. Elde edilen sonuçlar, minimum enerji tüketimi açısından tek bir ideal parametre yerine çoklu değişkenlerin dengeli şekilde optimize edildiği bir kombinasyonun gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu yaklaşım, gelecekte enerji verimliliği odaklı akıllı üretim sistemlerinin tasarlanması için kullanılabilir.

Bununla birlikte çalışma bazı sınırlılıklara da sahiptir. Analizler yalnızca PLA malzemesi ve belirli bir FDM yazıcı üzerinde gerçekleştirilmiştir; farklı malzemeler veya yazıcı mimarileri için enerji tüketim profilleri değişebilir. Ayrıca, çevresel koşullar (ortam sıcaklığı, fan verimi, güç kaynağı tipi) gibi ek faktörlerin modele dahil edilmesi daha kapsamlı tahmin performansı sağlayabilir. Gelecek çalışmalarda farklı malzeme türleri, daha geniş parametre aralıkları ve derin öğrenme tabanlı modellerin kullanılması enerji tahminlerinin genellenebilirliğini artıracaktır.

Bu çalışmada temel amaç baskı parametreleri ile enerji tüketimi arasındaki ilişkinin makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak modellenmesidir. Bununla birlikte literatürde baskı parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, mekanik dayanım ve boyutsal doğruluk üzerinde de önemli etkiler oluşturduğu bilinmektedir. Dolayısıyla enerji tüketimini minimize eden parametre kombinasyonlarının üretim kalitesi açısından da değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda enerji tüketimi ile yüzey pürüzlülüğü, mekanik performans ve baskı süresi birlikte ele alınarak çok amaçlı optimizasyon modelleri geliştirilebilir.

Genel olarak çalışma, FDM süreçlerinin enerji verimliliğinin makine öğrenmesi ile modellenmesine yönelik literatürdeki boşluğu doldurmakta; sürdürülebilir eklemeli imalat uygulamaları için hem teorik hem de pratik anlamda önemli bir katkı sunmaktadır.

5. GELECEK ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER

Bu çalışmada elde edilen bulgular, FDM süreçlerinde enerji tüketiminin modellenmesine yönelik önemli katkılar sunmakla birlikte, konunun daha geniş bir çerçevede ele alınabilmesi için gelecekte yapılabilecek araştırmalara da ışık tutmaktadır. Bu kapsamda aşağıdaki geliştirme alanları önerilmektedir:

Çalışma yalnızca PLA malzemesi ile sınırlı olduğundan, ABS, PETG, kompozit dolgulu filamentler veya yüksek sıcaklık dayanımlı mühendislik polimerlerinin enerji tüketim profillerinin analiz edilmesi genellenebilirliği artıracaktır. Kartesyen, CoreXY veya Delta tipi 3D yazıcılar farklı hareket sistemlerine sahiptir ve enerji tüketimi açısından değişkenlik gösterebilir. Farklı yazıcı mimarilerinin karşılaştırılması gelecekteki modellerin daha geniş kapsamlı olmasını sağlayacaktır. Nozul ve tabla ısıtma dinamikleri, fan

hızları, hız ivme–yavaşlama profilleri, ekstrüzyon akış hızı gibi ek parametrelerin modele dahil edilmesi enerji tüketiminin daha ayrıntılı şekilde açıklanmasına katkı sağlayabilir.

Makine öğrenmesi modellerinin yazıcı kontrol yazılımına entegre edilerek üretim sırasında anlık enerji tahmini ve otomatik parametre ayarı yapan akıllı bir geri besleme mekanizması geliştirilebilir. Özellikle LSTM, GRU veya derin regresyon modellerinin zaman serisi şeklindeki güç verilerini işlemesi, enerji tahmin performansını artırabilir. Enerji tüketiminin yanı sıra yüzey kalitesi, mekanik dayanım ve baskı süresi gibi performans kriterlerini birlikte optimize eden çok amaçlı (multi-objective) optimizasyon algoritmalarının uygulanması daha kapsamlı çözümler sunacaktır. Enerji tüketimi verilerinin karbon ayak izi hesaplamaları, maliyet analizi ve yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) ile birleştirilmesi, eklemeli imalatın çevresel etkilerine yönelik daha bütüncül değerlendirmeler yapılmasını sağlayabilir.

Bu öneriler doğrultusunda yapılacak çalışmalar, FDM ve diğer eklemeli imalat teknolojilerinde enerji verimliliğinin daha kapsamlı modellenmesine ve sürdürülebilir üretim stratejilerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlayacaktır.

6. KAYNAKLAR

1. Gibson, I., Rosen, D.W. & Stucker, B. (2015). *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing* (2nd ed.). Springer.
2. Sürmen, H.K. (2019). Eklemeli imalat (3B baskı): Teknolojiler ve uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *24*(2), 373-392.
3. Enemuoh, E.U., Menta, V.G., Abutunis, A., O'Brien, S., Kaya, L.I. & Rapinac, J. (2021). Energy and eco-impact evaluation of fused deposition modeling and injection molding of polylactic acid. *Sustainability*, *13*(4), Article 1875.
4. Ulkir, O. (2023). Energy-consumption-based life cycle assessment of additive-manufactured products with different types of materials. *Polymers*, *15*(6), Article 1466.
5. Griffiths, C. A., Howarth, J., De-Almeida-Rowbotham, G., Rees, A. & Kerton, R. (2016). A design of experiments approach for the optimisation of energy and waste during the production of parts manufactured by 3D printing. *Journal of Cleaner Production*, *139*, 74-85.
6. Öztürk, O., Şen, M.A. & Aydın, M. (2024). The influence of fused filament fabrication parameters on the fracture behavior of PLA specimens considering energy consumption. *Konya Journal of Engineering Sciences*, *12*(2), 451-464
7. Kamer, M.S., Temiz, Ş. & Kaya, A. (2023). Determination of energy consumption during the tensile test sample production in 3D printer working with the fused deposition modeling method. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *13*(3), 1998-2007
8. Aktepe, E. & Ergün, U. (2025). Machine learning approaches for FDM-based 3D printing: A literature review. *Applied Sciences*, *15*(18), Article 10001.
9. El-Youbi El Idrissi, M.A., Laaouina, L., Jeghal, A., Tairi, H. & Zaki, M. (2023). Modeling of energy consumption and print time for FDM 3D printing using multilayer perceptron network. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, *7*(4), Article 128.
10. Qin, J., Liu, Y. & Grosvenor, R. (2018). Multi-source data analytics for AM energy consumption prediction. *Advanced Engineering Informatics*, *38*, 840-850.
11. Camposeco-Negrete, C. (2020). Optimization of printing parameters in fused deposition modeling for improving part quality and process sustainability. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *108*(7-8), 2131-2147.
12. Yang, W., Liu, Y., Chen, J., Chen, Y. & Shang, E. (2024). Process-based modeling of energy consumption for multi-material FDM 3D printing. *Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment*, *1*, 190-202.
13. Kechagias, J. D. & Vidakis, N. (2022). Parametric optimization of material extrusion 3D printing process: an assessment of Box-Behnken vs. full-factorial experimental approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *121*(5), 3163-3172.
14. Chacon, J.M., Caminero, M.A., Garcia-Plaza, E. & Nunez, P.J. (2017). Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of part orientation, layer thickness and infill level on mechanical properties. *Materials & Design*, *124*, 143-157.

15. Petousis, M., Michailidis, N., Papadakis, V.M., Korlos, A., Mountakis, N., Argyros, A., ... & Vidakis, N. (2023). Optimizing the rheological and thermomechanical response of acrylonitrile butadiene styrene/silicon nitride nanocomposites in material extrusion additive manufacturing. *Nanomaterials*, *13*(10), 1588.

16. Mecheter, A. & Tarlochan, F. (2023). Fused filament fabrication three-dimensional printing: assessing the influence of geometric complexity and process parameters on energy and the environment. *Sustainability*, *15*(16), 12319.

17. Elmenshawy, S.E., Mahmoud, D., Aly, M.H. & Backar, S. (2026). Optimization of fused deposition modelling (FDM) spline quality characteristics using plan do check act (PDCA) and Taguchi. *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector, 1*(79), 1105-1116.

18. Mustafa, M.S., Zafar, M.Q., Muneer, M.A., Arif, M., Siddiqui, F.A. & Javed, H.M.A. (2020). Process parameter optimization in fused deposition modeling (FDM) using response surface methodology (RSM). *Res. Sq*, 19.

19. Yang, J., Wang, F., Dun, Y., Huang, Z., Zhang, A. & Liu, Y. (2024). Prediction-based multi-objective optimization method for 3D printing resource consumption. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *134*(3), 1805-1843.

20. Naser, A. Z., Defersha, F., Xu, X. & Yang, S. (2026). A hybrid machine learning–genetic algorithm approach to multi-criteria sustainable optimization of additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *143*(3), 1389-1408.

21. Murat, D., Mustafa, S., Uguz, A. & Cakir, M.C. (2026). Optimizing process parameters of FDM-printed PLA components using a combined Taguchi-CRITIC-VIKOR Approach. *Journal of Engineering Sciences, 13*(1), A19.

22. Fulkerson, O., Inman, E., Rane, A., Noori, H., Deep, A. & Ramesh, S. (2024). Multi-objective Bayesian optimization of fused filament fabrication parameters for enhanced specific fracture energy in PLA-carbon fiber composites. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, *10*(1), 2395089.

23. Gültekin, M.Ş. (2026). Prediction of tensile strength of PLA parts produced with FDM using Taguchi L27, ANOVA, and large-scale machine learning models and optimal parameter design. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 08927057261429023.

24. Gültekin, M.Ş. & Özdemir, C. (2026). Optimization of flexural strength of PLA flexural test specimens produced by FDM using Taguchi L27 orthogonal array and hybrid regression model. *Journal of Polymer Science*, *64*(10), 2122-2137.

25. Kamer, M.S., Doğan, O., Temiz, Ş. ve Yaykaşlı, H. (2021). 3 Boyutlu yazıcı ile farklı yazdırma parametreleri kullanılarak üretilen eğme test numunelerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *36*(3), 835-846.

26. Kaveloğlu, S., Temiz, Ş., Doğan, O. ve Kamer, M.S. (2022). 3 boyutlu yazıcı ile üretilen farklı hücre çaplarındaki bal peteği sandviç yapıların eğme dayanımlarının incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *37*(2), 459-470.

27. Boztepe, M.H. (2025). Investigation of tensile strength in 3D printed PLA+ samples: Influence of raster angle and infill density. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *40*(4), 937-948.

28. Tunçel, O. ve Tutar, M. (2023). EYM ile üretilen YMK yapılı numunelerde kenar genişliğinin basma dayanımı üzerine etkisinin araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *38*(3), 851-858.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

Morgedik Barajı (Erciş–Van) Derivasyon Tünelinde Su Kaçaklarının Enjeksiyonla Önlenmesi

Veli KESKİN [1,a]

[1]*Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0003-2769-5044*

Makale Bilgileri

Geliş : 17.01.2026
Kabul : 18.09.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1865965

Sorumlu Yazar

Veli KESKİN
veli_keskin@outlook.com

Anahtar Kelimeler

Enjeksiyon
Morgedik barajı
Tünel
Su sızıntıları

***Atıf şekli:** KESKİN, V., (2026). Morgedik Barajı (Erciş–Van Derivasyon Tünelinde Su Kaçaklarının Enjeksiyonla Önlenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 635-650.*

ÖZ

Bu çalışmada, Morgedik Barajı derivasyon tünelinde gözlenen su sızıntılarının kontrol altına alınmasında kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonu yöntemlerinin etkinliği değerlendirilmiştir. Saha çalışmaları, kırıklı ve çatlaklı sütun bazalt birimlerinde, özellikle 0+150 km ve 0+183 km kilometre noktalarında yaklaşık 4,5 bar basınca sahip su kaçaklarının varlığını ortaya koymuştur. Tünel temel kayasının jeolojik ve jeoteknik özellikleri saha ve laboratuvar çalışmalarıyla belirlenmiş, enjeksiyon malzemelerinin reolojik özellikleri analiz edilmiştir. Enjeksiyon basınçları saha koşullarına göre optimize edilerek uygulamaya alınmış ve enjeksiyon sonrası performans izleme çalışmalarıyla değerlendirilmiştir. Uygulamalar sonucunda su sızıntılarında belirgin bir azalma sağlanmış ve derivasyon tünelinin su geçirimsizlik performansı önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Elde edilen bulgular, kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonunun benzer jeolojik koşullara sahip derivasyon tünellerinde teknik ve ekonomik açıdan etkili ve uygulanabilir bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Grouting-Based Mitigation of Water Leakage in the Morgedik Dam Diversion Tunnel (Erciş–Van)

Article Info

Received : 17.01.2026
Accepted : 18.09.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1865965

Corresponding Author

Veli KESKİN
veli_keskin@outlook.com

Keywords

Grouting
Morgedik dam
Tunnel
Water leakage

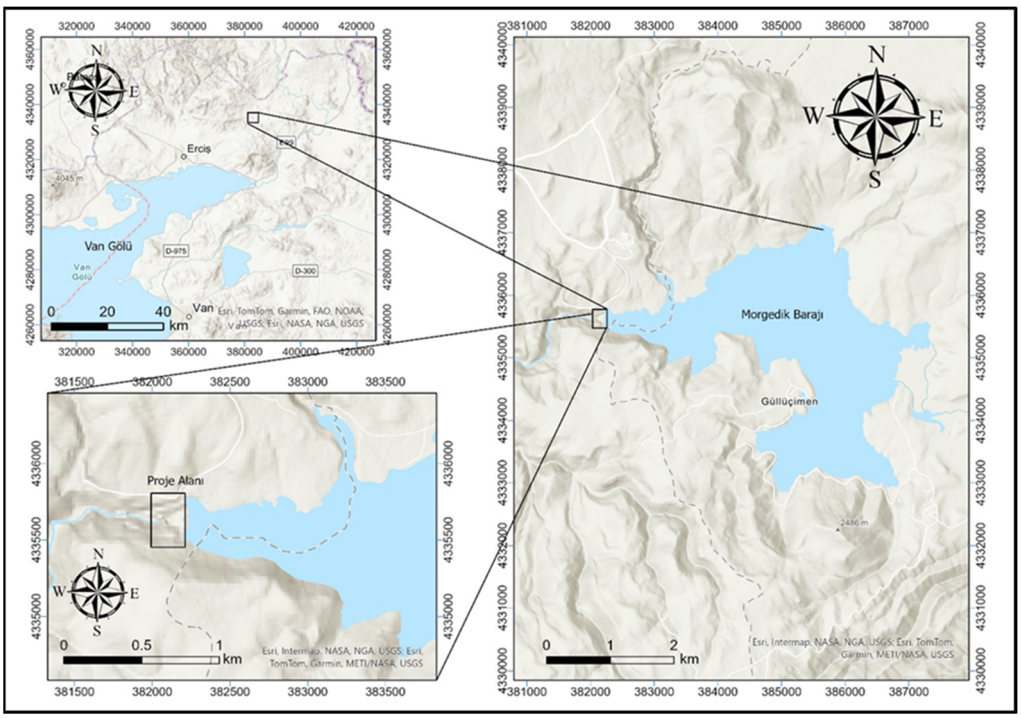
***How to cite:** KESKİN, V., (2026). Grouting-Based Mitigation of Water Leakage in the Morgedik Dam Diversion Tunnel (Erciş–Van). Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 635-650.*

ABSTRACT

This study evaluates the effectiveness of contact and consolidation grouting methods for controlling water leakage observed in the diversion tunnel of the Morgedik Dam. Field investigations identified water inflows with pressures of approximately 4.5 bar within weak zones developed in fractured and jointed columnar basalt units, particularly at chainages 0+150 km and 0+183 km. The geological and geotechnical characteristics of the tunnel foundation rock were determined through detailed field observations and laboratory analyses, while the rheological properties of the grouting materials were systematically assessed. Grouting pressures were optimized according to site-specific conditions, and the post-grouting performance was evaluated through continuous monitoring. The results indicate a significant reduction in water leakage and a marked improvement in the impermeability performance of the diversion tunnel. The findings demonstrate that contact and consolidation grouting constitute a technically effective and economically viable solution for leakage control in diversion tunnels developed under similar geological conditions.

1. GİRİŞ

Morgedik Barajı (Van–Erciş) projesinde baraj gövdesi, kil çekirdekli kaya dolgu tipinde tasarlanmıştır. Gövde dolgusu, yaklaşık 5 m kalınlığındaki aşırı kırıklı, çatlaklı ve ayrışmış bazalt ile alüvyon biriminin kaldırılmasının ardından, Kuvaterner yaşlı bazalt ana kaya üzerine oturtulmuştur. Baraj mühendisliğinde, barajın oturacağı ana kayanın yanı sıra derivasyon tüneli gibi yardımcı yapıların geçirimsizliği ve stabilitesi, yapının uzun dönemli güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu kapsamda, derivasyon tüneli güzergâhı boyunca ana kaya içerisinde gelişmiş ayrışma, alterasyon ve süreksizliklere bağlı litolojik zayıflık zonlarının belirlenmesi ve tünel inşaatı sırasında bu zonların iyileştirilmesi gerekmektedir. Söz konusu zayıf zonların güçlendirilmesinde kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonları, mühendislik uygulamalarında yaygın olarak tercih edilen ve etkinliği kanıtlanmış yöntemler arasında yer almaktadır. Kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonu, yeraltı mühendisliği uygulamalarında; özellikle tünel ve baraj yapılarında karşılaşılan su sızıntılarının kontrol altına alınması ile zemin/kaya kütlesinin dayanım ve geçirgenlik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla uygulanan basınçlı enjeksiyon teknikleridir [1,2]. Bu yöntemler, kaya ve zemin ortamındaki mevcut boşlukların, süreksizliklerin ve zayıflık zonlarının çimento esaslı enjeksiyon karışımları ile doldurulmasını hedefleyerek daha geçirimsiz ve bütünlüklü bir yapı oluşturmayı amaçlamaktadır [3,4]. Her iki enjeksiyon yöntemi, uygulama derinliği ve hedeflenen boşluk türleri açısından farklılık göstermekle birlikte, çoğu uygulamada entegre biçimde kullanılarak iyileştirme etkinliği artırılmaktadır [5-7]. Teknik yaklaşım ve kullanılan malzeme açısından benzerlik gösteren kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonu uygulamaları arasındaki temel fark, enjeksiyonun uygulandığı derinlikler ile enjeksiyon basınçlarının farklı olmasıdır. Bu bağlamda, enjeksiyon parametrelerinin saha koşullarına uygun şekilde belirlenmesi, uygulamanın başarısını doğrudan etkilemektedir. Bu çalışma kapsamında, ana kaya içerisinde açılan Morgedik Barajı derivasyon tünelinde, barajın işletmeye alınmasının ardından ortaya çıkan su sızıntılarının kontrol altına alınmasına yönelik olarak uygulanan kontakt ve konsolidasyon enjeksiyon teknikleri ayrıntılı biçimde incelenmiştir. İnceleme sürecinde, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü tarafından geliştirilen tasarım yaklaşımı, saha uygulamaları ve enjeksiyonların etkinliğine ilişkin elde edilen bulgular sistematik olarak değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen iyileştirme uygulamalarının analizi ile benzer mühendislik projelerinde kullanılabilecek teknik bir bilgi birikiminin oluşturulması amaçlanmıştır. Deliçay üzerine inşa edilen ve sulama ile enerji üretimi amaçlı işletilen Morgedik Barajı, kil çekirdekli kaya dolgu tipindedir. . Proje alanı, Van J50-C1 ve J50-C4 numaralı 1/25.000 ölçekli topoğrafik haritalar kapsamında yer almakta olup, konum bilgileri Şekil 1'de gösterilmiştir. Baraja ait teknik özellikler Çizelge 1'de sunulmakta olup, baraj Van iline bağlı Erciş ilçesinin yaklaşık 37 km kuzeydoğusundadır



Şekil 1. Çalışma alanı yer bulduru haritası

Çizelge 1. Baraja ait teknik bilgiler

Tipi	Kil çekirdekli kaya dolgu	Maksimum su seviyesi	1025.00m
Kret kotu	2232.50 m	Yıllık ortalama su	240.5hm³/yıl
Kret uzunluğu	237.00 m	Toplam göl hacmi	1025.105 m³
Talvegden yüksekliği	55.00 m	Regülasyon oranı	% 88.24
Temelden yüksekliği	60.00 m	Toplam kurulu güç	4.11 MW
Kret genişliği	10.00m	Proje düşüsü	47.50 m
Derivasyon tüneli	Betonarme (L = 341.50 m., R= 3.5 m)	Proje debisi	2.168 m³/s
Göl alanı	8.20 km²	Yıllık enerji üretimi	10.88 GWh/yıl

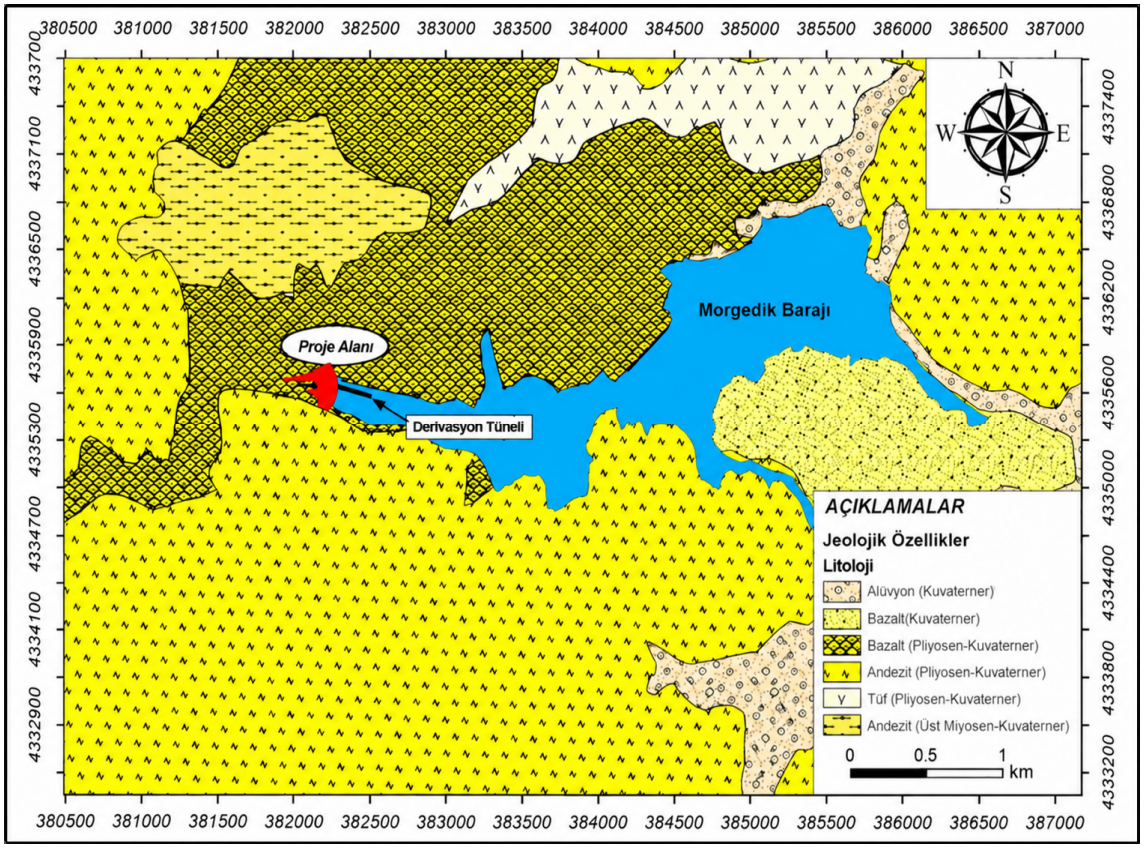
2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Materyal

Bu çalışmanın ana materyalini; Morgedik Barajı derivasyon tüneli, tünel çevresindeki litolojik birimler, derivasyon tünelinde gözlenen su sızıntıları, kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonu uygulamalarında kullanılan araç ve gereçler, enjeksiyon şerbetinde kullanılan kimyasallar ile arazi ve laboratuvar malzemeleri oluşturmaktadır. Morgedik Barajı derivasyon tünelinde gerçekleştirilen kontakt-konsolidasyon enjeksiyonu uygulama projeleri, Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü Jeoteknik Hizmetler Dairesi Başkanlığı tarafından yayımlanan Enjeksiyon Teknik Şartnamesi [8] ilkeleri doğrultusunda; baraj yerinin jeolojik ve jeoteknik özellikleri dikkate alınarak hazırlanmıştır.

2.1.1. Baraj Yeri ve Çevresinin Jeolojik Özellikleri

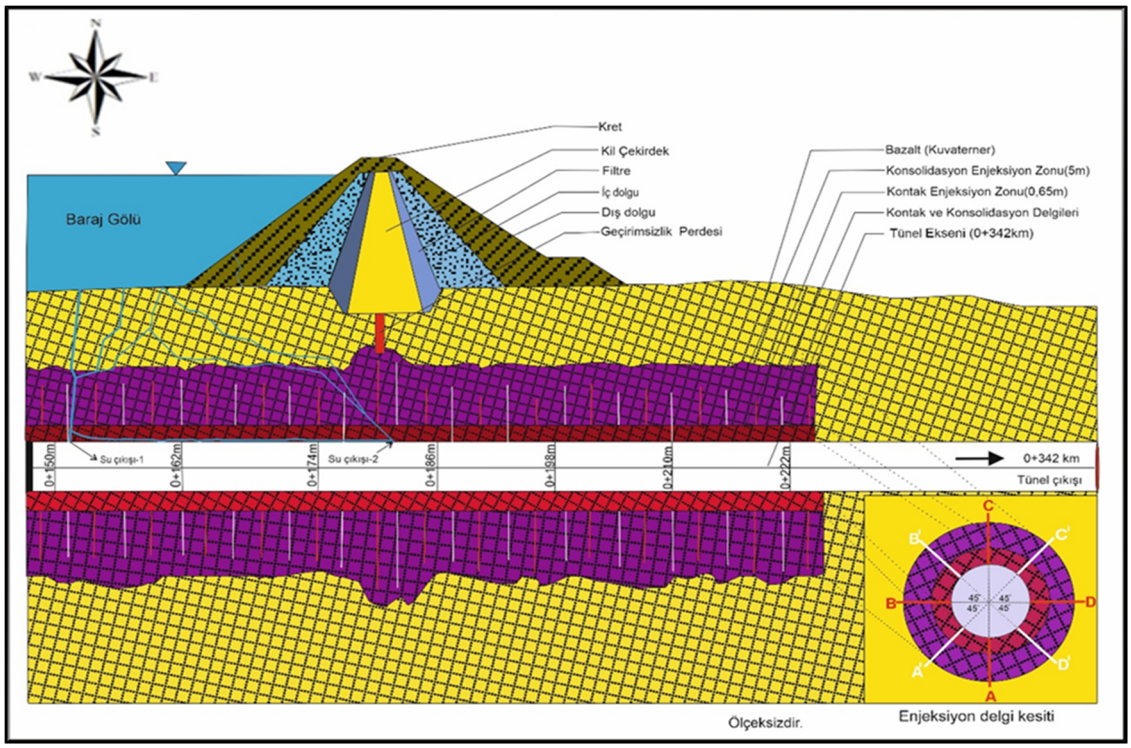
İnceleme alanında gözlenen Üst Miyosen–Kuvaterner yaşlı volkanik birimler, litolojik özellikleri ve yapısal süreksizlikleri nedeniyle baraj temeli ve derivasyon tüneli açısından önemli jeoteknik heterojenlikler sunmaktadır. Özellikle Üst Miyosen yaşlı andezitler ile Pliyosen–Kuvaterner yaşlı sütun bazaltlarda yaygın olarak gelişmiş kırık, çatlak ve süreksizlik sistemleri, kaya kütlesinin mühendislik özelliklerini olumsuz yönde etkilemekte ve su iletimine elverişli yollar oluşturmaktadır [9]. Bu durum, derivasyon tüneli boyunca yerel su sızıntılarının gelişmesine zemin hazırlamaktadır. Derivasyon tünelinin geçtiği sütun bazalt birimlerinde gözlenen tektonik deformasyon ve süreksizlik yoğunluğu, kaya kütlesinin bütünlüğünü azaltmakta ve enjeksiyon gereksinimini artırmaktadır [9]. Özellikle çatlak aralığı geniş, süreksizlik devamlılığı yüksek olan ve bozunmaya uğramış zonlarda, kaya kütlesinin geçirgenliği artmakta; bu alanlar enjeksiyon uygulamaları açısından öncelikli müdahale bölgeleri olarak değerlendirilmektedir. Bu tür zonlarda kontakt enjeksiyonu, kaplama ile kaya kütlesi arasındaki boşlukların doldurulması amacıyla uygulanırken; konsolidasyon enjeksiyonu, kaya kütlesinin daha derin seviyelerinde yer alan süreksizlik ve çatlakların doldurularak su geçiş yollarının sınırlandırılması amacıyla tercih edilmektedir. Enjeksiyon şerbetinin kırık ve çatlak sistemlerini doldurması, öncelikle kaya kütlesinin geçirimsizlik özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik olmakla birlikte, süreksizliklerin sürekliliğinin azaltılması yoluyla kaya kütlesinin bütünlüğüne ve mekanik davranışına da olumlu katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir. Bölgede yayılım gösteren Kuvaterner yaşlı alüvyon birimleri ise düşük taşıma gücü ve yüksek sıkışabilirlik özellikleri nedeniyle baraj temeli açısından risk oluşturmaktadır. Bu birimlerin baraj aksında sınırlı kalınlıklarda bulunması olumlu bir durum olmakla birlikte, alüvyon–ana kaya geçiş zonları potansiyel su kaçak yolları açısından dikkatle değerlendirilmiştir. Bu geçiş zonlarında gerçekleştirilen enjeksiyon uygulamaları, geçirimsizliğin sağlanması ve zemin–kaya etkileşiminin iyileştirilmesi açısından önemli bir rol oynamıştır. Sonuç olarak, Morgedik Barajı ve derivasyon tüneli çevresinde hâkim olan jeolojik ve jeoteknik koşullar, kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonunun birlikte ve aşamalı olarak uygulanmasını gerekli kılmıştır. Kaya kütlesinin süreksizlik özellikleri, litolojik heterojenliği ve yerel alüvyon birimleri dikkate alındığında, enjeksiyon uygulamalarının esas olarak su sızıntılarının kontrolü ve su geçiş yollarının sınırlandırılması amacıyla etkin bir iyileştirme yöntemi olduğu; kırık ve çatlak sistemlerinin doldurulmasının ise kaya kütlesinin bütünlüğü ve mekanik davranışı üzerinde ikincil düzeyde olumlu katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 2. Çalışma alanı ve yakın çevresinin jeoloji haritası [10].

2.1.2. Derivasyon Tünel Güzergâhının Jeoteknik Özellikİnceleme

Morgedik Barajı dipsavak ve derivasyon tünelinde gözlenen su kaçakları yerinde yapılan incelemelerle değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, derivasyon tünelinin km 0+150 kesitinde yaklaşık 10 L/s, km 0+183 noktasında ise yaklaşık 8 L/s debiye sahip su girişleri tespit edilmiştir. Derivasyon tüneli ile baraj gövdesinin mansap sağ sahilinden gelen sulara ait kot ve kilometre bilgileri belirlenmiş; söz konusu sular ile baraj göl suyu arasındaki ilişkinin ortaya konulması amacıyla su numuneleri alınarak kimyasal analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, derivasyon tüneli içerisinden alınan su örnekleri ile baraj göl suyunun benzer kökene sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, tünel içerisinden gelen suyun (vana odası) debisinin baraj göl seviyesi ile birlikte artış gösterdiği saptanmıştır. Baraj yerinde yayılım gösteren Tendürek bazaltlarının kırıklı ve çatlaklı yapısı nedeniyle, tünel kazısı sırasında km 0+150 ile km 0+190 arasında yer yer göçükler meydana gelmiş ve tünel tavanında yoğun su gelişleri gözlenmiştir. Bu durum, daha önce uygulanmış enjeksiyonların zamanla yıkanmış veya etkinliğini kaybetmiş olabileceğini göstermektedir. Ortaya çıkan bu olumsuzluklar doğrultusunda, tünel stabilitesinin artırılması ve su gelişlerinin kontrol altına alınması amacıyla ilave enjeksiyon uygulamalarının yapılmasına karar verilmiştir. Morgedik Barajı sağ sahil derivasyon tünelinde, km 0+150 ile km 0+190 arasındaki birimin aşırı derecede ayrıştığı, yer yer kil bantları içeren bazaltlarda yeterli kemerlenmenin sağlanamadığı belirlenmiştir. Bu zonlarda tünel duvarlarında dökülmeler ve kopmalar meydana gelmiş olup, kaya kütlesinin mühendislik özelliklerinin zayıf olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle planlanan konsolidasyon enjeksiyonu uygulamalarında, km 0+150 ile km 0+222 arasında ana kayada 5 m, enjeksiyon perdesi bölümünde ise toplam 5+3 m delgi boyları öngörülmüştür. 5+3 m delgi boyu ile daha önce gerçekleştirilen perde enjeksiyonu ile planlanan konsolidasyon enjeksiyonunun birbiriyle bütünleştirilmesi ve böylece enjeksiyon zonunun sürekliliğinin sağlanması amaçlanmıştır. Bu uygulamanın, tünel çevresindeki zayıf kaya kütlesinin iyileştirilmesine ve mevcut su geçiş yollarının kontrol altına alınmasına katkı sağlayacağı değerlendirilmiştir (Şekil 3).



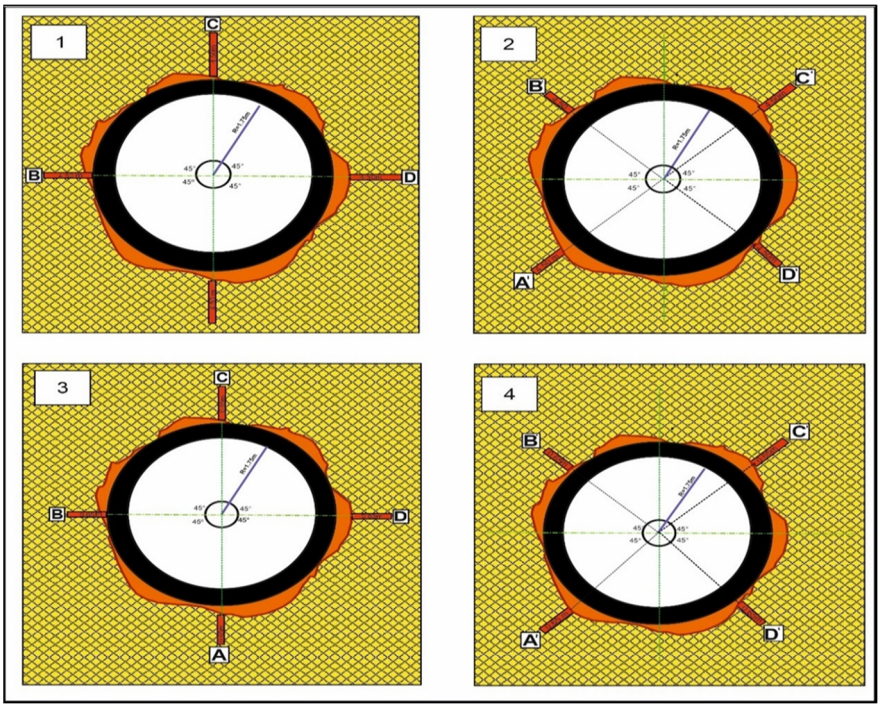
Şekil 3. Morgedik Barajı derivasyon tüneli kontakt ve konsolidasyon enjeksiyon kesiti

2.2. Yöntem

Bu çalışma kapsamında, baraj aksı doğrultusu ile sağ sahilde kesişen ve baraj gövdesine temel oluşturan sütun bazaltları içerisinde açılmış derivasyon tünelindeki su kaçaklarını önlemek amacıyla, km 0+150 ile km 0+222 aralığında kaplama betonu ile ana kaya arasındaki boşlukların doldurulması için kontakt enjeksiyonları; ana kaya kütlesindeki süreksizliklerin ve zayıf zonların iyileştirilmesi amacıyla ise konsolidasyon enjeksiyonları gerçekleştirilmiştir. Enjeksiyon çalışmalarında ano uzunluğu 24 m olarak seçilmiş olup, bu seçim enjeksiyonların daralan ano (split-spacing) yaklaşımına uygun olarak kademeli biçimde sıklaştırılmasına olanak sağlayan bir başlangıç geometrisi oluşturması esasına dayanmaktadır. Nitekim 24 m'lik başlangıç ano uzunluğunun 12, 8, 6, 4, 3 ve 2 m gibi daha küçük aralıklara bölünebilmesi, enjeksiyon alışları ve basınçlı su deneylerinden elde edilen sonuçlara bağlı olarak gerekli görülen kesimlerde delgi aralıklarının kademeli olarak azaltılmasına ve enjeksiyon performansının saha koşullarına göre değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Bu kapsamda, yaklaşık 72 m uzunluğundaki su kaçağının gözlendiği derivasyon tüneli kesiminde kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonları üç ano sistemi şeklinde uygulanmıştır. Bununla birlikte, su çıkışlarının debisi ve enjeksiyon alış değerlerine bağlı olarak delgi sayıları, çapları ve yönelimleri saha koşullarına göre yeniden tasarlanmıştır [11]. Kontakt enjeksiyonlarında öncelikle tek numaralı kesitler tamamlanmış, ardından çift numaralı kesitlere geçilmiş; her bir anonun kontakt enjeksiyonu tamamlandıktan ve 14 günlük priz süresi sağlandıktan sonra konsolidasyon enjeksiyonuna geçilmiştir [8].

2.2.1. Delgi Yöntemi

Enjeksiyon delgileri genel olarak 56 mm çapında, döner (rotary) delgi yöntemiyle açılmıştır. Kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonlarına ait ana ve ara kuyular, tünel güzergâhında daha önce gerçekleştirilen temel sondajlarının karotlu olması nedeniyle karotsuz olarak delinmiştir. Delgilerin açıldığı uygun kesitlerde, kontakt ve konsolidasyon kuyularında basınçlı su deneyleri gerçekleştirilerek kaya kütlesinin hidrolik davranışı değerlendirilmiştir [8]. Delgi çalışmalarına öncelikle tek kesitlerden başlanmış; tünel çeperine dik (90°) doğrultuda açılan tek kontakt delgileri ile 45° eğimli çift kontakt delgileri, delme sırasında oluşan formasyon ve beton kırıntılarının uzaklaştırılması amacıyla basınçlı su ile yıkanmıştır (Şekil 4). Aynı temizleme ve kontrol işlemleri konsolidasyon delgileri için de uygulanmıştır [12,13] (Şekil 4).



Şekil 4. Kontakt ve konsolidasyon delgi kesitleri(1-4) tek kesit(A, B, C, D). çift kesit (A', B', C', D').

2.2.2. Enjeksiyonda Kullanılan Malzemeler

Sülfata Karşı Dayanıklı Çimento

Enjeksiyon uygulamalarına geçilmeden önce, derivasyon tüneli vana odası ile rezervuar alanından alınan su örnekleri üzerinde ayrıntılı kimyasal analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde özellikle sülfat (SO_4^{2-}) iyonu derişimleri, enjeksiyon malzemesi seçimi açısından değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları, mevcut koşullar altında sülfat kaynaklı herhangi bir kimyasal riskin bulunmadığını ortaya koymuştur. Ancak, enjeksiyon uygulamalarının uzun vadeli performansı ve olası hidrojeokimyasal değişimler göz önünde bulundurularak, ilerleyen dönemlerde sülfat etkisinin ortaya çıkma ihtimaline karşı önleyici bir tedbir olarak sülfata dayanıklı çimentonun kullanımı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, uygulama sırasında gerekli görülmesi halinde kullanılmak üzere sülfata dayanıklı çimento temin edilmiştir [14].

Normal Portland Çimento

Derivasyon tüneli enjeksiyon çalışmalarında, sülfata dayanıklı çimentoların kullanılması zorunlu olan alanlar dışında kalan tüm enjeksiyon uygulamalarında, sulu ortamlarda daha yüksek dayanım performansı sergilemesi nedeniyle CEM II tipi katkılı çimentolar tercih edilmiştir. Kullanılan çimentonun özgül yüzeyi 4557 cm^2/g olup, 200 µm göz açıklığına sahip elekte en fazla %1, 90 µm göz açıklığına sahip elekte ise en fazla %9 oranında kalıntı bıraktığı belirlenmiştir [14].

Bentonit

Enjeksiyon uygulamaları sırasında çimento taneciklerinin askıda kalmasını sağlayarak harcın duraylılığını artırmak ve çimento–su karışımında su ayrışmasını en aza indirmek amacıyla, TS EN ISO 13500 standardına uygun sodyumlu karben bentonit kullanılmıştır [14,15]. Gerçekleştirilen tüm enjeksiyonlarda, karışım içeriğindeki çimento miktarının %1'i oranında bentonit ilavesi yapılmıştır.

Kimyasal Katkı Maddeleri

Enjeksiyon sıvısının viskozite değerinin düşürülmesi amacıyla Rheobuild 1000T akışkanlaştırıcı kullanılmış; hızlı priz almasının gerekli olduğu durumlarda ise kimyasal katkı maddesi olarak Sikament AC 326 tercih edilmiştir [16].

2.2.3. Enjeksiyonda Kullanılan Karışımlar

Morgedik Barajı'nda gerçekleştirilen kontakt ve konsolidasyon enjeksiyon çalışmalarında kullanılan şerbet karışımları Çizelge 2'de sunulmuştur. Hazırlanan karışımlara, toplam karışım içeriğindeki çimento miktarının %10 olacak şekilde hazırlanan bentonit çözeltisi ilave edilmiştir.

Çizelge 2. Kontakt ve konsolidasyon enjeksiyon uygulamalarında kullanılan şerbet karışım oranları [8]

Karışım oranı	Çimento	Su	Bentonit		Katkı	Hacim	Yoğunluk
Çimento/Su	(kg)	(L)	(L)	(kg)	(L)	(L)	(gr/cm^3)
1/1	150	136.5	15	1.5	3.75	202.5	1.50
9/10	150	121.5	15	1.5	3.75	187.5	1.152
4/5	150	106.5	15	1.5	3.75	172.5	1.55
5/7	150	93.6	15	1.5	4.50	160	1.59
Yoğunluk (gr/cm^3)	3.13	1	1.11	1.5	1.22	-	-

2.2.4. Kontakt ve Konsolidasyon Enjeksiyon Basınçları

Morgedik barajı sağ sahilinde yer alan derivasyon tünelinin km 0+150–km 0+222 arasındaki bölümünde kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonu uygulanmak üzere projelendirilmiştir. Projede farklı kesitlerde delgi boylarının farklı olması ve farklı basınçlarda su çıkışları olduğu için enjeksiyon basınçları ilgili kesitlere göre hesaplanmıştır.

Kontakt ve konsolidasyon kuyularının enjeksiyon basıncı (PT);

$$PT = 0.33 * H \tag{1}$$

formülüne göre hesaplanmıştır.

H = Metre cinsinden kademe ortası kuyu ağzı arasındaki mesafedir. PT = Efektif basınç (kg/cm^2) Gerekli görüldüğünde, proje özelliklerine bağlı olarak bu basınçlar bir miktar artırılıp azaltılabilir. Bir kuyu veya kuyu kademesinin enjeksiyonu sona erdirilirken, manometrede okunacak refü basıncı, kuyunun açılış yönüne bağlı olarak hesaplanmıştır. Derivasyon tünelinde enjeksiyon yapılan kuyularda, yukarı yönlü açılışlarda şerbet sütununun hidrostatik basıncı enjeksiyon basıncına eklenirken; aşağı yönlü açılışlarda ise çıkarılarak bulunmuştur. Ayrıca, eğimli kuyularda şerbetin hidrostatik basıncına kuyu eğimi (düşey ile yaptığı açı) de etki ettiğinden, manometrede okunacak refü basıncı aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır:

Yukarı yönde ve yukarı yönde eğimli kuyularda:

$$\mathrm{Pm} = \mathrm{PT} + (W * L * \cos\alpha)/10 \tag{2}$$

Aşağı yönde ve aşağı yönde eğimli kuyularda:

$$\mathrm{Pm} = \mathrm{PT} - (W * L * \cos\alpha)/10 \tag{3}$$

Burada; PT = Enjeksiyon basıncı (kg/cm^2)
Pm = Manometre basıncı (kg/cm^2)
L = Kuyuda enjekte edilecek kademe ortasından kuyu başı manometresine kadar olan mesafedir.

Manometre kuyunun başında olmadığı durumlarda manometrenin bulunduğu yer ile kuyu arasındaki metre cinsinden düşey mesafe dikkate alınmıştır.

α = Kuyu yönü ile düşey arasındaki açıdır. Bu açı (α = 45˚) sadece yan deliklerde etken olmaktadır. Düşey ve tam yatay deliklerde Cos α=90˚ değeri 1'e eşit oluğundan hesaplanacak basınç değerini değiştirmeyecektir.
W = Enjeksiyon şerbetinin özgül ağırlığıdır [8].

Projede kullanılan enjeksiyon basınçları ve kontrol kuyusu test sonuçları Çizelge 1, 3, 4 ve 5 'te verilmiştir.

Çizelge 3. Derivasyon tüneli kontakt enjeksiyon basınçları

Tek numaralı delgi	Kademe boyu (m)	Efektif basınç Pt(kg/cm²)	Manometre basıncı Pm (kg/cm²)
A	0.65	2.10	2.00
B	0.65	2.10	2.50
C	0.65	2.10	2.80
D	0.65	2.10	2.50
Çift numaralı delgi		Efektif basınç Pt (kg/cm²)	Manometre basıncı Pm (kg/cm²)
A’	0.65	2.10	2.00
B’	0.65	2.10	2.50
C’	0.65	2.10	2.50
D’	0.65	2.10	2.00

Çizelge 4. Derivasyon tüneli konsolidasyon enjeksiyon basınçları

Tek numaralı delgi	Kademe boyu (m)	Efektif basınç Pt. (kg/cm²)	Manometre basıncı Pm. (kg/cm²)
A	0.00-2.50	2.40	2.15
	2.5-5.00	3.25	2.60
B	0.00-2.50	3.40	2.90
	2.5-5.00	3.30	4.10
C	0.00-2.50	2.40	3.20
	2.5-5.00	3.25	4.45
D	0.00-2.50	2.40	2.90
	2.5-5.00	3.30	4.10
Çift numaralı delgi	Kademe boyu (m)	Efektif basınç Pt. (kg/cm²)	Manometre basıncı Pm. (kg/cm²)
A’	0.00-2.5	2.40	2.20
	2.5-5.00	3.25	2.75
B’	0.00-2.5	4.40	2.90
	2.5-5.00	3.25	4.00
C’	0.00-2.5	2.40	2.90
	2.5-5.00	3.25	4.00
D’	0.00-2.5	2.40	2.20
	2.5-5.00	3.25	2.75

Çizelge 5. Perde enjeksiyonu bölgesindeki(0+183km) konsolidasyon enjeksiyon basınçları

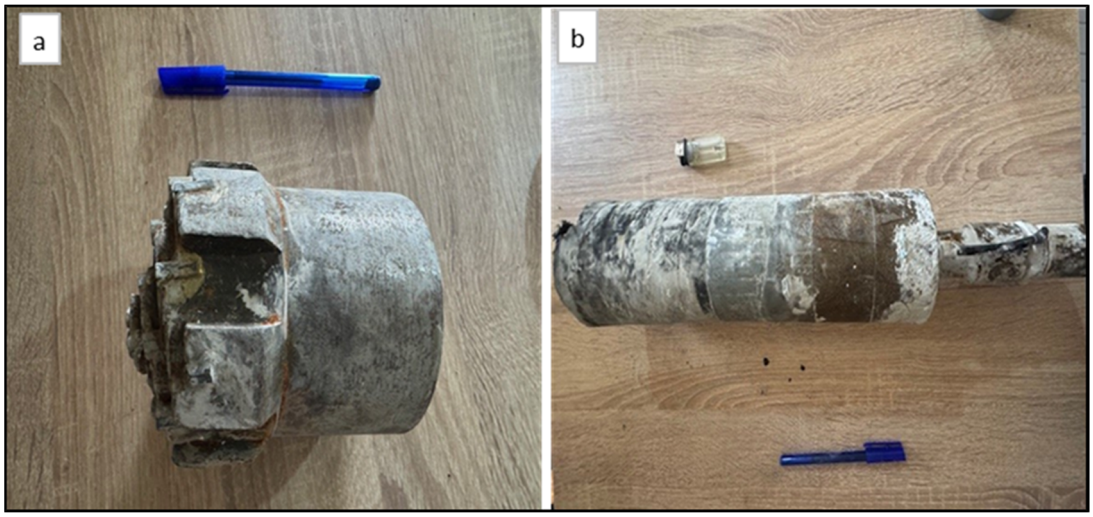
Tek numaralı delgi	Kademe boyu (m)	Efektif basınç Pt. (kg/cm²)	Manometre basıncı Pm. (kg/cm²)
A	0.00-4.00	2.70	2.30
	4.00-8.00	5.2	3.00
B	0.00-4.00	2.70	3.30
	4.00-8.00	4.00	5.20
C	0.00-4.00	2.70	3.60
	4.00-8.00	4.00	5.50
D	0.00-4.00	2.70	3.30
	4.00-8.00	4.00	5.20
Çift numaralı delgi	Kademe boyu (m)	Efektif basınç Pt. (kg/cm²)	Manometre basıncı Pm. (kg/cm²)
A’	0.00-4.00	3.00	3.00
	4.00-8.00	4.00	3.25
B’	0.00-4.00	2.70	3.25
	4.00-8.00	4.00	5.00
C’	0.00-4.00	3.00	3.20
	4.00-8.00	4.00	5.00
D’	0.00-4.00	3.00	2.95
	4.00-8.00	4.00	3.25

Kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonları, uygulama amacı ve hedeflenen kaya zonu bakımından birbirinden ayrılmaktadır. Kontakt enjeksiyonu, tünel kaplaması ile çevre kaya arasındaki temasın iyileştirilmesine yönelik olarak uygulanırken, konsolidasyon enjeksiyonu daha derindeki kaya kütlesinde bulunan süreksizlik ve zayıf zonların iyileştirilmesine yönelik olarak uygulanmıştır. Bu iki uygulama, enjeksiyon programında birbirini izleyen aşamalar olarak gerçekleştirilmiştir.

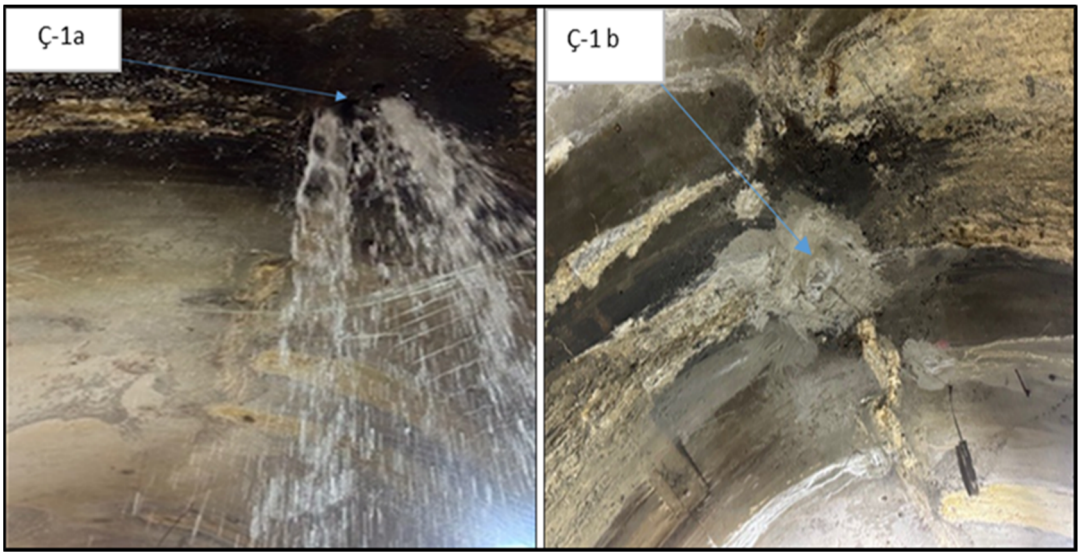
Kontakt Enjeksiyonu

Kontakt enjeksiyonunda delgi boyları, kaplama betonu kalınlığına ek olarak 35 cm kaya ortamı içerisine uzanacak şekilde belirlenmiştir. Bu yaklaşım ile beton–kaya ara yüzeyinde kazı hasarı ve patlatma etkisi sonucu gelişen zayıflamış zonun enjeksiyon kapsamına alınması amaçlanmıştır. Belirlenen derinlik, enjeksiyon şerbetinin temas yüzeyindeki boşluklara ve gevşek kaya dokusuna etkin biçimde nüfuz etmesini sağlarken, aynı zamanda enjeksiyon basınçlarının kontrol altında tutulmasına ve kaplama betonunun yapısal bütünlüğünün korunmasına olanak tanımıştır. Enjeksiyon uygulamaları 24 m uzunluğundaki anolar hâlinde gerçekleştirilmiştir. Basınçlı su çıkışlarının gözlendiği kesitlerde, su girişlerinin kontrol altına alınabilmesi amacıyla 56 mm ve 114 mm çaplarında farklı delgiler açılmıştır. Enjeksiyon işlemleri, öncelikle tünel içerisindeki tek kesitlerden başlanarak sırasıyla tünel tabanı, sol yan, sağ yan ve tavan deliklerine, A, B, D, C sıralamasına göre uygulanmıştır (Şekil 4). Tek kesit enjeksiyonlarının tamamlanmasının ardından 14 günlük priz süresi beklenmiş ve daha sonra çift kesit enjeksiyon aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada enjeksiyonlar, sırasıyla tünel tabanı, sol yan alt–üst ve sağ yan alt–üst deliklerine, A’, D’, B’, C’ sıralamasıyla gerçekleştirilmiştir [8]. Derivasyon tünelindeki kontakt enjeksiyon çalışmalarına taban deliklerinden 1/1 çimento–su karışım oranına sahip şerbet ile başlanmıştır. 1 m³ şerbet verilmesine rağmen manometre basıncında artış gözlenmemesi durumunda, sırasıyla 9/10, 4/5 ve 5/7 çimento–su karışım oranlarındaki karışımdan 1 m³, 1 m³ ve 5 m³ uygulanmıştır. Toplamda 8 m³ şerbet verilmesine karşın refü basıncı elde edilememesi hâlinde enjeksiyona ara verilerek priz süresi beklenmiştir.

Bu süreçte, kuyunun refü göstermemesine neden olabilecek jeolojik ve jeoteknik koşullar değerlendirilmiş ve ilgili enjeksiyon kademesinin metodolojisi gözden geçirilmiştir [8]. Refü sağlanamayan kademeler temizlendikten sonra enjeksiyon işlemlerine yeniden başlanmıştır. Yeniden enjeksiyona geçildiğinde, basınç değeri kademe refü basıncının yarısı veya daha düşük ise başlangıç şerbeti (1/1) ile 0,25 m³ enjeksiyon yapılmış, ardından priz süresince kullanılan karışımla uygulamaya devam edilmiştir. Şerbet karışımı ile hedef basınca ulaşılıp 10 dakika boyunca kademe şerbet almadığında, başlangıç şerbetine dönülerek enjeksiyon bu karışımla sürdürülmüştür. Kademenin 20 dakika içerisinde 0,6 L/m/dk veya daha düşük miktarda şerbet alması durumunda refü sağlanmış kabul edilerek enjeksiyon sonlandırılmış ve bir sonraki kademeye ya da deliğe geçilmiştir [8]. Bu enjeksiyon metodolojisi, basınçlı su çıkışlarının yoğun olarak gözlendiği 14C ve 23C kesitlerinde eksiksiz biçimde uygulanmıştır. Diğer kesitlerde ise farklı karışım oranları kullanılarak refü basıncına ulaşılmış ve enjeksiyon işlemleri tamamlanmıştır (Çizelge 2).
Morgedik Barajı derivasyon tünelinde km 0+150–km 0+222 aralığında tespit edilen yüksek basınçlı su girişlerinin önlenmesi amacıyla gerçekleştirilen kontakt enjeksiyon çalışmaları, ayrıntılı planlama ve kademeli enjeksiyon yaklaşımı ile yürütülmüştür. Basınçlı su çıkışlarının görüldüğü noktalarda 114 mm çapında delgiler açılmış ve bu deliklere 112 mm çapında mekanik pakerler yerleştirilmiştir (Şekil 5). Enjeksiyon uygulamaları üç basınç kademesinde planlanmış; birinci kademede 2 bar, ikinci ve üçüncü kademelerde ise 3'er bar basınç artışı uygulanmıştır. Yüksek alış değerlerine bağlı olarak yalancı refü oluşumunu önlemek amacıyla günlük ortalama 23.103 L şerbet kullanılmıştır. Şerbet üretiminde çimento esaslı karışımlar tercih edilmiştir. Her 25 ton çimento kullanımı (yaklaşık 27.103 L çimento enjeksiyonu) sonrasında, şerbetin formasyon içerisinde priz alabilmesi için ilgili kuyu 24 saat dinlendirilmiş ve ardından enjeksiyona yeniden başlanmıştır [8]. Bu işlem, refü basıncına ulaşılıncaya kadar 72 saatlik aralıklarla sürdürülmüştür. Uygulamalar, tünel kesitinde su çıkışlarının yoğun olduğu 23C ve 14C numaralı kontakt kuyularında gerçekleştirilmiştir (Şekil 6 ve 7). Bu kuyular, kırıklı ve çatlaklı sütun bazalt birimleri içerisinde yoğun su girişlerinin gözlendiği zonları temsil etmektedir. Kuyu lokasyonlarının belirlenmesinde; kaya kütlesinin süreksizlik yoğunluğu ve sürekliliği, çatlak açıklıkları, alterasyon derecesi, yeraltı suyu seviye ve akım yönleri ile tünel kazısı sırasında gözlenen su geliş debileri gibi jeolojik ve hidrojeolojik parametreler belirleyici olmuştur [13]. Gerçekleştirilen enjeksiyon çalışmaları sonucunda yüksek basınçlı su girişleri büyük ölçüde kontrol altına alınmış ve tünel yapısının su geçirimsizliği önemli ölçüde sağlanmıştır (Şekil 6 ve 7).



Şekil 5. Basınçlı su çıkışlarının yoğun olarak gözlendiği kesitlerde kullanılan ekipmanlar: kapalı matkap (a) ve mekanik paker (b)

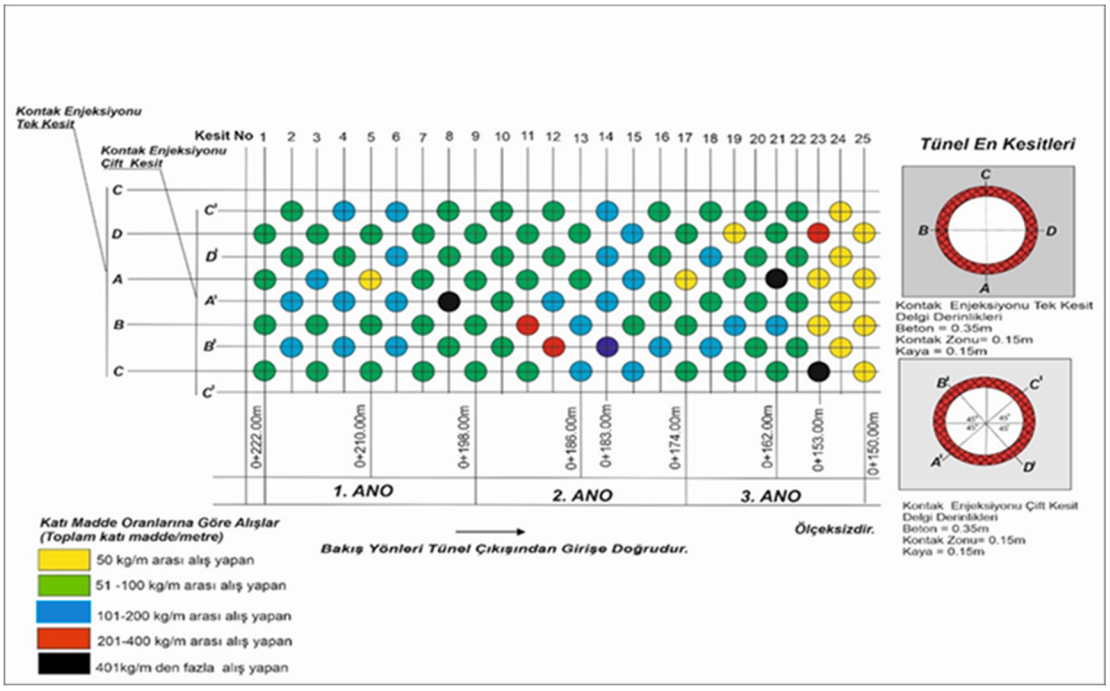


Şekil 6. Enjeksiyon öncesi ve sonrası su çıkışlarının yoğun olarak gözlendiği 14C numaralı kesit



Şekil 7. Enjeksiyon öncesi ve sonrası su çıkışlarının yoğun olarak gözlendiği 23C numaralı kesit

Bu metodoloji, derivasyon tünelinde yer alan tüm enjeksiyon kuyularında titizlikle uygulanmış ve kontakt ile konsolidasyon enjeksiyon çalışmalarının etkin biçimde yürütülmesi sağlanmıştır. Her bir kuyu için enjeksiyon süresince kullanılan katı madde miktarları düzenli olarak kaydedilmiş; elde edilen veriler esas alınarak derivasyon tünelinde katı madde alışının mekânsal dağılımını gösteren kesitler oluşturulmuştur. Bu kesitler, enjeksiyon uygulamalarının etkinliğinin değerlendirilmesi ve su sızıntılarının azaltılmasında önemli bir veri seti sunmuştur. Ayrıca enjeksiyon malzemesinin farklı zonlarda tüketim oranı ve yeraltı ortamına nüfuz derecesi bu kesitler üzerinden analiz edilmiştir [13]. Böylece enjeksiyon parametrelerinin optimize edilmesi, gerekli durumlarda enjeksiyon programının yeniden düzenlenmesi ve mühendislik uygulamalarının yönlendirilmesi mümkün olmuştur (Şekil 8).

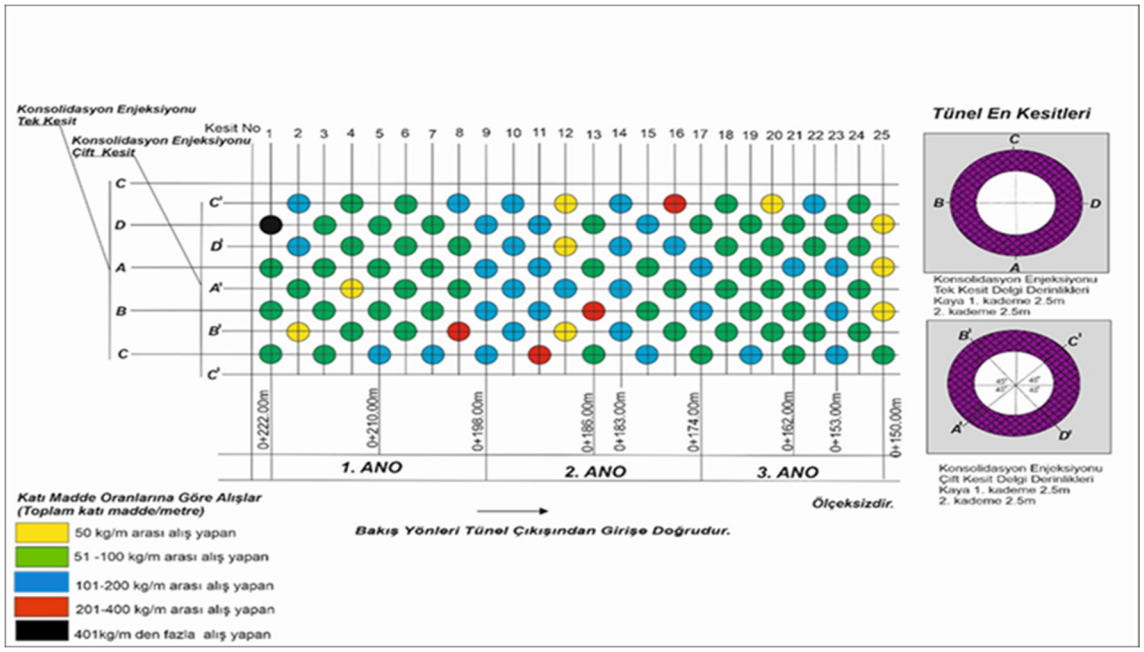


Şekil 8. Derivasyon tünelinde gerçekleştirilen kontakt enjeksiyonuna ait katı madde alış grafiği

Konsolidasyon Enjeksiyonu

Kontakt enjeksiyon uygulamasında en az iki anoya ait işlemler tamamlandıktan veya 14 günlük priz süresi dolduktan sonra, konsolidasyon enjeksiyonu delgileri, daha önce kontakt enjeksiyonu yapılmış deliklerin delgi boyları uzatılarak açılmıştır. Bu uygulama, enjeksiyon yapılan zonların derinlemesine sağlamlaştırılması ve kaya kütlesinin su geçirimsizliğinin artırılması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Konsolidasyon enjeksiyonu için açılan delgiler genellikle toplam 5 m uzunluğunda planlanmış ve enjeksiyonun aşamalı ve kontrollü biçimde uygulanabilmesi amacıyla 2+3 m kademelere ayrılmıştır. Derivasyon tünelinin perde enjeksiyonu ile kesiştiği kritik kesitlerde, zemin ve kaya kütlesinin daha yüksek geçirimsizlik gereksinimi nedeniyle konsolidasyon delgi boyları 8 m olarak belirlenmiş ve enjeksiyon işlemleri 2+3+3 m kademeleri şeklinde yürütülmüştür. Bu sayede enjeksiyon şerbetinin yeraltı ortamına nüfuz derinliği artırılmış ve su kaçaklarının etkin biçimde önlenmesi hedeflenmiştir. Konsolidasyon enjeksiyonlarına, kontakt enjeksiyon metodolojisiyle uyumlu olacak şekilde taban deliklerinden 1/1 (çimento/su) oranlı şerbetle başlanmıştır. Enjeksiyonun başlangıç aşamasında hacim düşük tutulmuş ve genellikle 1 m³ şerbet verilerek kontrol sağlanmıştır. Bu yaklaşım, şerbetin kılcal boşluklara daha etkin şekilde nüfuz etmesine olanak tanımıştır. Enjeksiyon sırasında hedeflenen refü basıncına ulaşıldığında ve devam eden süreçte, 10 dakikalık gözlem süresi boyunca kademenin şerbet almaması ya da 20 dakika içerisinde litre/metre/dakika cinsinden şerbet tüketiminin 0.6 veya daha az olması durumunda, enjeksiyonun etkin biçimde tamamlandığı ve refü sağlandığı kabul edilmiştir [8,13]. Söz konusu kriterler, enjeksiyonun doluluk ve tıkanma düzeyinin belirlenmesinde temel parametreler olarak değerlendirilmiştir. Bu uygulama tüm kesit ve deliklerde tekrarlanarak enjeksiyonun homojenliği ve genel etkinliği artırılmıştır. Konsolidasyon enjeksiyonlarıyla, yeraltı yapısındaki potansiyel su sızıntı yollarının kapatılması ve enjeksiyon malzemesinin boşlukları kayıpsız biçimde doldurarak süreklilik gösteren bir geçirimsiz tabaka oluşturması amaçlanmıştır [8]. Uygulama süresince kullanılan enjeksiyon katı madde miktarları düzenli

olarak kaydedilmiş ve bu veriler kullanılarak derivasyon tüneline ait konsolidasyon enjeksiyonu katı madde alış kesitleri oluşturulmuştur (Şekil 9). Bu kesitler, enjeksiyonun mekânsal verimliliğinin ve şerbet dağılımının değerlendirilmesi, enjeksiyon stratejilerinin optimize edilmesi ve benzer mühendislik projeleri için karşılaştırmalı veri oluşturulması amacıyla kullanılmıştır[13].



Şekil 9. Derivasyon tünelinde uygulanan konsolidasyon enjeksiyonuna ait katı madde alış grafiği [8]

Kontrol Delgileri ve Testleri

Morgedik Barajı derivasyon tünelinde gerçekleştirilen kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonu uygulamalarının ardından, enjeksiyon zonunun geçirimsizlik sağlama kapasitesini ve uygulamanın genel etkinliğini değerlendirmek amacıyla basınçlı su testleri yapılmıştır. Ortalama 0,65 m derinlikte ve 56 mm çapındaki kontrol delgilerinde gerçekleştirilen bu testlerde, enjeksiyon uygulamalarının ardından doğal su akışlarının kesilmesi sonrasında, enjeksiyon zonunun sızdırmazlık durumunu kontrol etmek amacıyla delgilere belirli bir basınç altında su verilmiştir. Testlerde, enjeksiyon basıncının yaklaşık %90'ına karşılık gelen basınç altında 10 dakika süreyle su verilmiş ve bu süre boyunca gerçekleşen su sarfiyatları ölçülmüştür. Enjeksiyon öncesinde doğal akış koşullarında gözlenen su çıkışları (Çıkış-1: 8 L/s, Çıkış-2: 10 L/s) ile enjeksiyon sonrasında basınç altında gerçekleştirilen kontrol testlerinde ölçülen 9,5–14 L/dk aralığındaki su sarfiyatları, farklı hidrolik koşulları temsil etmeleri nedeniyle doğrudan karşılaştırılmamıştır. Basınçlı su testlerinden elde edilen su sarfiyatı değerleri, enjeksiyon zonunun uygulanan test basıncı altında su kabul etme davranışının ve sızdırmazlık durumunun değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Buna ek olarak, çok kademeli olarak test edilen C ve D serisi enjeksiyon kuyularında gerçekleştirilen Lugeon testleri ile kaya kütlesinin geçirgenlik davranışı analiz edilmiştir. Bu kuyularda ölçülen Lugeon değerlerinin 3–5 aralığında kaldığı, derin zonlarda geçirgenlik katsayısının 10^{-7}–10^{-8} m/s mertebesinde olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, özellikle zayıf zonlarda su geçiş yollarının kontrol altına alındığını ortaya koymaktadır. B çiftindeki kontrol delgilerinde ölçülen nispeten yüksek su sarfiyatı değerleri ise, yerel kırıklılık yoğunluğunun fazla olması veya enjeksiyonun bu kesitlerde yeterli düzeyde etkili olmaması ile ilişkilendirilmiştir. Özellikle K3–K4 kontrol delgisinde, 2,25 kg/cm² basınç altında ölçülen 13–14 L/dk değerlerindeki su sarfiyatı, bu kesitte enjeksiyon zonunun diğer bazı kesitlere göre daha fazla su kabul ettiğini göstermiştir. Bu durum, kaya kütlesi içerisinde sürekliliği yüksek çatlak sistemlerinin veya enjeksiyon zonu dışına uzanan ikincil geçirgenlik yollarının varlığına işaret etmektedir. Bu doğrultuda, söz konusu kesitte enjeksiyon perdesinin sürekliliğini ve etkinliğini artırmak amacıyla ilave enjeksiyon uygulamaları gerçekleştirilmiş, sonrasında yapılan kontrol testlerinde su sarfiyatının belirgin biçimde azaldığı gözlenmiştir. Elde edilen bulgular, bölgesel jeolojik koşullar dikkate alınarak enjeksiyon uygulamalarının gerektiğinde tekrarlanmasının, tünel çevresinde hedeflenen geçirimsizlik seviyesine ulaşılmasında önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 6. Kontrol delgilerine ait basınçlı su testi sonuçları [8]

Delgi no	Delgi çapı (mm)	Kademe delgi derinliği (m)	Test süresi (dk)	Kontrol kuyuları test basınçları (kg/cm^2)	Kademe su sarfiyatı	
					1.5 dk	2. 5dk
K1 - K2 (A çift)	56	0.65	10	1.8	12	11
K3 – K4 (B çift)	56	0.65	10	2.25	14	13
K6 – K7 (A çift)	56	0.65	10	1.8	12	11
K7 – K8 (A çift)	56	0.65	10	1.8	14	11.5
K9 – K10 (A çift)	56	0.65	10	1.8	11	9.5
K11 – K12 (C tek)	56	0.65	10	1.8	13	11.5
K13 – K14 (C tek)	56	0.65	10	2.25	14	10.5
K9 – K10 (D çift)	56	0.00 -2.50	10	2.7	15	14.5
		2.50 - 5.00	10	3.24	17	15
K11 – K12 (C tek)	56	0.00 - 2.50	10	2.88	16	14.5
		2.50 - 5.00	10	4.5	20	17.5
K13 – K14 (B tek)	56	0.00- 2.50	10	2.7	14	11
		2.50 - 5.00	10	3.24	18	15.5

3. BULGULAR

Morgedik Barajı derivasyon tünelinde uygulanan kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonlarının etkinliği; enjeksiyon sırasında kaydedilen şerbet alış miktarları, enjeksiyon sonrası gerçekleştirilen basınçlı su testleri, kontrol delgileri ve Lugeon deneyleri ile değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, enjeksiyon uygulamalarının su sızıntılarının azaltılması ve kaya kütlesinin geçirimsizlik özelliklerinin iyileştirilmesi üzerindeki etkisini açık biçimde ortaya koymaktadır.

3.1. Enjeksiyon Alış Davranışına İlişkin Bulgular

Kontakt enjeksiyonu uygulamaları sırasında, enjeksiyon şerbetinin özellikle kırıklı ve çatlaklı sütun bazalt birimlerinde yüksek alış miktarları gösterdiği belirlenmiştir. Katı madde alış grafikleri incelendiğinde, km 0+150–0+222 aralığında yer alan enjeksiyon zonlarında alışların homojen olmadığı; bazı kesitlerde yüksek, bazı kesitlerde ise sınırlı düzeyde gerçekleştiği görülmüştür. Bu durum, kaya kütlesinin süreksizlik yoğunluğu ve sürekliliği açısından belirgin bir heterojenlik sunduğunu göstermektedir. Kontakt enjeksiyonlarında, özellikle 14C ve 23C kesitlerinde enjeksiyon şerbeti tüketiminin belirgin şekilde arttığı ve refü basıncına ulaşmanın daha uzun sürede gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu kesitlerde enjeksiyonun çok kademeli olarak ve yüksek hacimli şerbet kullanılarak tamamlanması, kaya kütlesindeki açık çatlak sistemlerinin varlığına işaret etmektedir. Buna karşılık, diğer kesitlerde refü basıncına daha düşük hacimlerde ve daha kısa sürede ulaşılması, enjeksiyonun bu bölgelerde daha etkin şekilde sonuçlandığını göstermektedir. Konsolidasyon enjeksiyonlarında ise katı madde alışlarının, kontakt enjeksiyonlara kıyasla daha kontrollü ve derinliğe bağlı olarak değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle 2,5–5,0 m ve 4,0–8,0 m derinlik kademelerinde enjeksiyon şerbeti alışlarının devam etmesi, süreksizliklerin derin zonlara kadar uzandığını ortaya koymuştur. Bu bulgu, konsolidasyon enjeksiyonunun kaya kütlesinin derin seviyelerinde geçirimsizlik sağlama açısından kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

3.2. Basınçlı Su Testi Bulguları

Kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonlarının tamamlanmasının ardından gerçekleştirilen basınçlı su testleri, enjeksiyon zonunun sızdırmazlık durumunun ve test basıncı altındaki su kabul davranışının değerlendirilmesi amacıyla uygulanmıştır. Ortalama 0,65 m derinlikte ve 56 mm çapında gerçekleştirilen kontrol delgilerinde, enjeksiyon sonrasında doğal su akışlarının kesilmesinin ardından, enjeksiyon basıncının yaklaşık %90'ına karşılık gelen basınç altında 10 dakika süreyle su verilmiş ve su sarfiyatları ölçülmüştür. Kontrol testlerinde ölçülen su sarfiyatlarının 9,5–14 L/dk aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu değerler, enjeksiyon öncesinde doğal akış koşullarında gözlenen 8–10 L/s arasındaki su çıkışlarından farklı hidrolik koşullarda elde edildiğinden, söz konusu ölçümler doğrudan karşılaştırılmamıştır. Enjeksiyon öncesindeki doğal su çıkışları tünel çevresindeki mevcut su geçişlerinin belirlenmesinde, enjeksiyon sonrasındaki basınçlı su testleri ise enjeksiyon zonunun belirli bir test basıncı altında su kabul etme

davranışının ve sızdırmazlık durumunun kontrol edilmesinde kullanılmıştır. Kontrol delgileri bazında değerlendirildiğinde, A ve C çiftlerinde ölçülen su sarfiyatlarının genel olarak daha düşük, B çiftindeki kontrol delgilerinde ise daha yüksek olduğu görülmüştür. Özellikle K3–K4 kontrol delgisinde 2,25 kg/cm² test basıncı altında 13–14 L/dk su sarfiyatı ölçülmesi, bu kesitte enjeksiyon zonunun diğer bazı kesitlere göre daha fazla su kabul ettiğini göstermektedir. Bu durum, yerel kırıklılık yoğunluğunun fazla olması veya enjeksiyon zonu içerisinde sürekliliği yüksek geçirgenlik yollarının bulunması ile ilişkili olabilir. Bu kesitte gerçekleştirilen ilave enjeksiyon uygulamasının ardından yapılan kontrol testlerinde su sarfiyatının belirgin biçimde azalması, enjeksiyon uygulamasının söz konusu kesitteki sızdırmazlık koşullarının iyileştirilmesine katkı sağladığını göstermektedir. Genel olarak, kontrol delgilerinde elde edilen su sarfiyatı değerleri, enjeksiyon zonunun farklı kesimlerinde sızdırmazlık koşullarının yerel jeolojik özelliklere bağlı olarak değişebildiğini ortaya koymaktadır.

3.3. Lugeon Testi Bulguları

Çok kademeli olarak test edilen C ve D serisi enjeksiyon kuyularında gerçekleştirilen Lugeon testleri, enjeksiyon sonrası kaya kütlesinin geçirgenlik özelliklerinin değerlendirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Lugeon (Lu) değeri, 1 MPa (10 bar) etkin test basıncı altında, 1 m uzunluğundaki test zonundan dakikada alınan su miktarını ifade etmektedir. Kaya kütlesinin hidrolik geçirgenlik katsayısının yaklaşık olarak belirlenmesinde yaygın kullanılan bağıntı $k \approx Lu \times 10^{-7}$ m/s şeklindedir [17]. Bununla birlikte, Lugeon–geçirgenlik ilişkisi test zonunun uzunluğu, kuyu çapı, kaya kütlesinin süreksizlik özellikleri ve hidrolik sınır koşullarından etkilenebildiğinden, bu bağıntı yaklaşık bir korelasyon olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, C ve D serisi enjeksiyon kuyularında ölçülen Lugeon değerlerinin 3–5 Lu aralığında olduğu belirlenmiştir. Söz konusu bağıntı kullanıldığında, bu değerler yaklaşık 3×10^{-7}–5×10^{-7} m/s aralığında hidrolik geçirgenlik katsayılarına karşılık gelmektedir. Lugeon değerlerinin 3–5 aralığında olması, kaya kütlesinin düşük geçirgenlik gösterdiğine işaret etmektedir. Elde edilen sonuçlar, enjeksiyon uygulamalarından sonra kaya kütlesindeki su iletim yollarının sınırlandırıldığını ve özellikle derin seviyelerde uygulanan konsolidasyon enjeksiyonlarının hidrolik davranışın iyileştirilmesine katkı sağladığını göstermektedir.

3.4. Kritik Kesitlerde Enjeksiyon Performansı

Şekil 8'de verilen kontakt enjeksiyonu katı madde alış dağılımı incelendiğinde, enjeksiyon alışlarının kesitler arasında belirgin farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Katı madde alışlarının ≤50 kg/m ile >50 kg/m arasında değişen sınıflarda gerçekleşmesi, kaya kütlesindeki süreksizliklerin mekânsal olarak homojen olmadığını göstermektedir. Özellikle 14C ve 23C kesitlerinde yüksek katı madde alışlarının gözlenmesi ve bu kesitlerde refü basıncına ulaşmanın daha uzun sürmesi, enjeksiyon şerbetinin daha fazla miktarda ve daha uzun süre süreksizlik sistemlerine nüfuz ettiğini göstermektedir. Buna karşılık, daha düşük alış gösteren kesitlerde hedeflenen refü basıncına daha kısa sürede ulaşılması, enjeksiyon sırasında şerbet tüketiminin daha sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır. Bu değerlendirme, enjeksiyon basıncı altında gerçekleşen şerbet alış davranışının kaya kütlesindeki süreksizliklerin özellikleriyle ilişkili olduğunu göstermektedir. Enjeksiyon sonrasında C ve D serisi kuyularda elde edilen 3–5 Lu aralığındaki Lugeon değerleri ise bu kesimlerde kaya kütlesinin düşük geçirgenlik gösterdiğine işaret etmektedir. Kontakt enjeksiyonlarında gözlenen yüksek alış değerleri ile enjeksiyon sonrasında gerçekleştirilen Lugeon deneylerinden elde edilen düşük değerler birlikte değerlendirildiğinde, enjeksiyon şerbetinin süreksizlik yoğunluğu ve geçirgenliği yüksek zonlara nüfuz ettiği ve enjeksiyon uygulamalarının ardından kaya kütlesindeki su iletim yollarının sınırlandırıldığı değerlendirilmektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Morgedik Barajı derivasyon tünelinde sütun bazaltlar içerisinde gelişen su sızıntılarının kontrol altına alınması amacıyla uygulanan kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonlarının performansı saha verileri ışığında değerlendirilmiştir. Enjeksiyon öncesinde gerçekleştirilen gözlem ve ölçümler, km 0+150–0+190 aralığında yoğunlaşan su gelişlerinin kırıklı–çatlaklı, ileri derecede altere ve yer yer kil bantları içeren bazalt zonlarıyla ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Enjeksiyon uygulamaları sonucunda derivasyon tünelinde gözlenen doğal su çıkışları kontrol altına alınmış ve özellikle vana odası bölgesinde ölçülen

debilerin baraj göl seviyesiyle olan hidrolik bağı büyük ölçüde zayıflatılmıştır. Bu sonuç, enjeksiyon uygulamalarının lokal boşlukların doldurulmasının yanı sıra ana kaya içerisindeki su geçiş yollarının sürekliliğinin sınırlandırılmasına da katkı sağladığını göstermektedir. Enjeksiyon sonrasında gerçekleştirilen basınçlı su testlerinde ölçülen su sarfiyatları, enjeksiyon zonunun belirli test basınçları altındaki su kabul davranışının değerlendirilmesine ve enjeksiyon perdesinin sızdırmazlık performansının kontrol edilmesine olanak sağlamıştır. Enjeksiyon öncesinde gözlenen doğal su debileri ile enjeksiyon sonrasında basınç altında gerçekleştirilen kontrol deneylerinde ölçülen su sarfiyatlarının farklı hidrolik koşulları temsil ettiği dikkate alınmış ve bu değerler doğrudan karşılaştırılmamıştır. Böylece enjeksiyon performansı, doğal su çıkışlarının kontrol altına alınması ile basınçlı su deneylerinden elde edilen kontrol sonuçları kendi deney koşulları içerisinde değerlendirilmiştir. Ano uzunluğunun 24 m olarak seçilmesi ve enjeksiyonların azalan aralık yöntemiyle üç kademeli sistem şeklinde uygulanması, enjeksiyon basınçlarının kontrollü biçimde iletilmesine olanak sağlamış ve istenmeyen hidrolik yayılım ile enjeksiyon kayıplarının sınırlandırılmasına katkıda bulunmuştur. Enjeksiyon alış değerlerinin kademeler ilerledikçe azalması, kaya kütlesindeki süreksizliklerin giderek daha fazla doldurulduğuna ve geçirgenlik koşullarında iyileşme sağlandığına işaret etmektedir. Kontakt enjeksiyonlarının kaplama betonu ile ana kaya arasındaki boşlukların doldurulmasında, konsolidasyon enjeksiyonlarının ise kaya kütlesindeki süreksizlik ve çatlakların doldurularak su geçiş yollarının sınırlandırılmasında etkili olduğu değerlendirilmiştir. Özellikle kritik 14C ve 23C kesitlerinde gözlenen yüksek enjeksiyon alışları ve refü basıncına ulaşmanın daha uzun sürmesi, enjeksiyon gereksiniminin kaya kütlesindeki süreksizlik özelliklerine bağlı olarak önemli ölçüde değişebildiğini göstermiştir. Bu kesitlerden elde edilen saha bulguları ile enjeksiyon sonrası gerçekleştirilen basınçlı su deneyleri ve C ve D serisi kuyularda elde edilen Lugeon sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi, enjeksiyon performansının yalnızca tek bir parametre üzerinden değil; jeolojik koşullar, enjeksiyon alış davranışı, uygulanan basınç ve enjeksiyon sonrası hidrolik kontrol sonuçları birlikte dikkate alınarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bazı kontrol kesitlerinde ölçülen görece yüksek su sarfiyatları da enjeksiyon performansının kaya kütlesindeki jeolojik heterojenliklere duyarlı olduğunu ve gerekli durumlarda enjeksiyon tasarımının saha sonuçlarına göre revize edilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu nedenle enjeksiyon uygulamalarının tek aşamalı bir işlemden ziyade, saha gözlemleri ve kontrol deneylerinden elde edilen geri beslemeler doğrultusunda yönetilen aşamalı bir mühendislik süreci olarak ele alınması önem taşımaktadır. Kırık ve çatlak sistemlerinin enjeksiyon şerbeti ile doldurulmasının temel amacı kaya kütlesinin geçirimsizlik koşullarının iyileştirilmesi olmakla birlikte, süreksizliklerin sürekliliğinin azaltılmasının kaya kütlesinin bütünlüğüne ve mekanik davranışına da olumlu katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir. Özellikle altere bazalt ve kil bantlarının yaygın olduğu kesitlerde enjeksiyon sonrasında tünel çeperlerinde gözlenen dökülme ve kopmaların durması bu değerlendirmeyi destekleyen bir saha gözlemi olarak kabul edilmiştir. Bununla birlikte, bu çalışmada kaya kütlesinin dayanımındaki değişimi doğrudan ortaya koyan mekanik deneyler gerçekleştirilmediğinden, enjeksiyon sonrasında meydana gelebilecek dayanım artışı nicel olarak değerlendirilmemiştir. Çalışmanın özgün katkısı, kırıklı ve ileri derecede altere sütun bazaltlardan oluşan bir derivasyon tünelinde uygulanan kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonlarının performansının gerçek saha verileri üzerinden ve birbirini tamamlayan parametreler kullanılarak değerlendirilmesidir. Jeolojik ve jeoteknik gözlemler, enjeksiyon alış davranışları, enjeksiyon basınçları, basınçlı su deneyleri ve Lugeon sonuçlarının birlikte ele alınması, kaya kütlesindeki süreksizlik özellikleri ile enjeksiyon gereksinimi ve hidrolik performans arasındaki ilişkinin saha ölçeğinde değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Bu yaklaşım, benzer kırıklı ve altere volkanik kaya ortamlarında karşılaşılan su kaçağı problemlerinde enjeksiyon tasarımının yalnızca önceden belirlenmiş sabit uygulama parametrelerine göre değil, uygulama sırasında elde edilen alış, basınç ve kontrol deneyi sonuçlarına göre uyarlanmasının önemini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, Morgedik Barajı derivasyon tünelinde uygulanan kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonlarının kırıklı ve altere volkanik kayaçlarda gelişen su sızıntılarının kontrolünde teknik açıdan etkin ve uygulanabilir bir iyileştirme yöntemi olduğu değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, benzer jeolojik koşullara sahip mevcut baraj ve tünel yapılarında enjeksiyon tasarımı, ano uzunluğu, uygulama basıncı, enjeksiyon sıralaması ve kontrol stratejilerinin belirlenmesine yönelik saha temelli bir mühendislik referansı sunmaktadır. Ayrıca mevcut tünelin enjeksiyon yoluyla iyileştirilmesi, daha kapsamlı yapısal müdahalelere veya yeni yapı çözümlerine duyulan gereksinimin azaltılması açısından ekonomik bir avantaj sağlayabilir. Ancak bu çalışmada doğrudan bir maliyet analizi gerçekleştirilmediğinden, ekonomik katkı nicel bir maliyet veya tasarruf değeri üzerinden değil, mevcut yapının iyileştirilerek kullanılmasına olanak sağlayan uygulanabilir bir mühendislik çözümü sunması açısından değerlendirilmiştir.

5. TEŞEKKÜR

Yazar, bu çalışma kapsamında gerekli izinlerin sağlanması, saha verilerinin temini ve uygulama sürecinde sunulan teknik destekler nedeniyle Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'ne; çalışmanın bilimsel niteliğinin geliştirilmesine ve son haline ulaşmasına katkı sağlayan Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi editör ve hakemlerine değerli görüş ve önerileri için teşekkürlerini sunar.

6. KAYNAKLAR

1. Houlsby, A.C. (1990). *Construction and design of cement grouting: A guide to grouting in rock foundations.* John Wiley & Sons, New York.
2. Warner, J. (2004). *Practical handbook of grouting: Soil, rock, and structures.* John Wiley & Sons, New York.
3. Lombardi, G. (2003). Grouting of rock masses. *Grouting and Ground Treatment,* 164-197.
4. Karol, R.H. (2003). *Chemical grouting and soil stabilization.* 3rd ed. M. Dekker, New York.
5. Akbulut, S. & Gökçe, A. (2007). Grouting techniques in rock engineering and their applications in tunneling. *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı,* 111-118.
6. Sabancı, A. (2015). Tünelcilikte enjeksiyon yöntemleri ve uygulamaları. *Mühendis ve Makina, 56*(667), 31-44.
7. Ulusay, R. ve Gökceoğlu, C. (2001). *Mühendislik jeolojisi temelleri.* TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara.
8. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, (2025). Jeoteknik Hizmetler Daire Başkanlığı – *Enjeksiyon teknik şartnamesi.* Teknik Şartname, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.
9. Oyan, V. (2011). Etrüsk Volkanı ve çevresinin (Van Gölü kuzeyi) volkanostratigrafisi, petrolojisi ve magmatik evrimi. *Doktora tezi.* Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van.
10. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA), (2002). *Türkiye jeoloji haritası (1:500.000 ölçekli).* Harita seti, MTA Yayınları, Ankara.
11. Turkmen, S. ve Güç, Y. (2026). Mersin-Anamur karayolu T3 tünelindeki karstik boşlukların iyileştirilmesinde kullanılan yöntemler. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41*(1), 17-28.
12. Prasad, R., Singh, S.P. & Kumar, R. (2023). An overview of construction practices in tail race tunnels of lesser himalayas-A case study of Tehri Pumped storage plant-1000 MW Uttarakhand, India. *International Journal of Novel Research and Development, 8*(9), a730-a748.
13. Keskin, V. (2025). Derivasyon tünellerinde su sızıntılarının kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonu ile iyileştirilmesi: Enjeksiyon karışım testleri ve uygulama aşamaları. *Mühendislik Alanında Uluslararası Akademik Araştırma ve Çalışmalar,* 109-138. Serüven Yayıncılık, Ankara.
14. Türk Standardları Enstitüsü (TSE), (2012). *TS EN 197-1: Çimento – Bölüm 1: Portland çimentosu, bileşik çimentolar ve yüksek fırın cüruflu çimentolar – Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri.* TSE, Ankara.
15. Al-antaki, T.S.W. ve Niş, A. (2025). Bağlayıcı olarak bazaltik pomza tozu kullanımının geopolimer harçların mekanik dayanımına etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40*(3), 687-697.
16. Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. (2025). *SikaRapid® AC 326 teknik bilgi föyü.* https://tur.sika.com/dms/getdocument.get/9bc7fe99-999d-4cdc-af83-/sikarapid-ac-326.pdf
17. Zoorabadi, M. (2023). Lugeon test: New insights into calculated hydraulic conductivity. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 56*(3), 2023-006.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

Farklı Katkı Maddeleri ile İyileştirilmiş Kil Zeminin Donma-Çözülme Davranışının Konsolidasyona Etkisi

İlkim ÖZBAHÇECİ GÖKDENİZ [1,a], **Baki BAĞRIAÇIK** [1,b]

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

[a]***ORCID***: *0009-0001-1729-2471;* [b]***ORCID***: *0000-0002-1860-2881*

Makale Bilgileri

Geliş : 24.02.2026
Kabul : 04.09.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1895808

Sorumlu Yazar

İlkim ÖZBAHÇECİ GÖKDENİZ
iozbahceci@cu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Zemin iyileştirme
Atık
Donma-çözülme
Konsolidasyon
Sürdürülebilirlik

Atıf şekli: *ÖZBAHÇECİ GÖKDENİZ, İ., BAĞRIAÇIK, B., (2026). Farklı Katkı Maddeleri ile İyileştirilmiş Kil Zeminin Donma-Çözülme Davranışının Konsolidasyona Etkisi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 651-662.*

ÖZ

Bu çalışmada, yüksek plastisiteli kil zeminin konsolidasyon davranışı ve donma-çözülme çevrimleri sonrasındaki mühendislik özellikleri, kiremit tozu ve akasya zamkı katkıları kullanılarak deneysel olarak araştırılmıştır. Bu kapsamda, doğal kil zemine kuru ağırlığının %3'ü oranında kiremit tozu, %1'i oranında akasya zamkı ve her iki katkının birlikte kullanıldığı farklı karışım kombinasyonları ilave edilmiştir. 5 günlük kür süreci sonrasında numuneler, 1, 3, 5 ve 10 tekrarlı donma-çözülme çevrimleri uygulanmıştır. Kullanılan katkı malzemelerinin ve donma-çözülme etkisinin, zeminin konsolidasyon katsayısı ile hacimsel sıkışma katsayısı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Katkı uygulamaları sonucunda konsolidasyon katsayısında görülen artış, zeminin konsolidasyon sürecini daha hızlı tamamlamasını sağlarken; hacimsel sıkışma katsayısındaki azalma, uygulanan yükler altında zeminin daha düşük sıkışabilirlik sergilediğini göstermiştir. Bu değişimler, zeminin aşırı oturma eğiliminin azaltılması ve donma-çözülme çevrimleri sırasında oluşabilecek yapısal bozulmaların sınırlandırılması açısından olumlu bir gelişme olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, kiremit tozu ve akasya zamkı katkılarının hem donma-çözülme öncesinde hem sonrasında kil zeminin konsolidasyon davranışı üzerinde iyileştirici etki oluşturduğu belirlenmiştir.

Effect of Freeze-Thaw Behavior on Consolidation of Clay Soil Improved with Different Additives

Article Info

Received : 24.02.2026
Accepted : 04.09.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1895808

Corresponding Author

İlkim ÖZBAHÇECİ GÖKDENİZ
iozbahceci@cu.edu.tr

Keywords

Soil improvement
Waste
Freeze–thaw
Consolidation
Sustainability

How to cite: *ÖZBAHÇECİ GÖKDENİZ, İ., BAĞRIAÇIK, B., (2026). Effect of Freeze-Thaw Behavior on Consolidation of Clay Soil Improved with Different Additives. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 651-662.*

ABSTRACT

In this study, the consolidation behavior and post-freeze-thaw engineering properties of high plasticity clay soil were experimentally investigated using brick dust and acacia gum additives. Within this scope, brick dust at 3% and acacia gum at 1% of the dry weight, along with various mixture combinations utilizing both additives together, were added to the natural clay soil. Following a 5-day curing period, the samples were subjected to 1, 3, 5, and 10 freeze-thaw cycles. The effects of the additive materials and freeze-thaw action on the coefficient of consolidation and the coefficient of volume compressibility of the soil were examined. The increase observed in the coefficient of consolidation as a result of the additive applications enabled the soil to complete its consolidation process more rapidly; meanwhile, the decrease in the coefficient of volume compressibility indicated that the soil exhibited lower compressibility under applied loads. These changes were considered a positive development in terms of reducing the excessive settlement tendency of the soil and limiting the structural deterioration that may occur during freeze-thaw cycles. In conclusion, it was determined that brick dust and acacia gum additives have an improving effect on the consolidation behavior of clay soil both before and after freeze-thaw cycles.

1. GİRİŞ

İnşaat mühendisliği; taşıyıcı sistemler, yapı malzemeleri, ulaştırma, hidrolik ve geoteknik mühendisliği gibi çok sayıda alt disiplini bünyesinde barındıran, toplumların altyapı ve üstyapı ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik temel bir mühendislik dalıdır. Bu alt disiplinler içerisinde yer alan geoteknik mühendisliği, yapıların inşa edildiği zemin ortamının davranışını esas alması nedeniyle insan yaşamı açısından son derece kritik bir öneme sahiptir. Geoteknik mühendisliği; zeminlerin ve kaya ortamlarının fiziksel, mekanik ve hidrolik özelliklerinin belirlenmesi, bu özelliklerin mühendislik yapıları üzerindeki kısa ve uzun vadeli etkilerinin değerlendirilmesi ve zeminden kaynaklanabilecek olası problemlerin önlenmesine veya giderilmesine yönelik yöntemlerin geliştirilmesi ile ilgilenmektedir. Doğal zeminler, jeolojik oluşum süreçleri ve mineralojik bileşimleri nedeniyle oldukça heterojen bir yapı sergilemektedir. Bu durum, zeminlerin taşıma gücü, sıkışabilirlik, drenaj kabiliyeti ve çevresel etkilere karşı dayanım gibi mühendislik parametrelerinde önemli farklılıklara yol açmaktadır. Özellikle ince taneli zeminler, düşük drenaj kapasiteleri ve yüksek sıkışabilirlikleri nedeniyle aşırı oturma, taşıma gücü yetersizliği ve stabilite problemleri oluşturabilmektedir. Bu tür problemler, insanların barınma, ulaşım ve diğer temel ihtiyaçlarını karşılamak üzere inşa edilen yapıların güvenliğini ve servis ömrünü doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, geoteknik mühendislerinin temel görevlerinden biri, problemli zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirerek güvenli ve ekonomik yapı tasarımına olanak sağlayacak stabilizasyon yöntemlerini geliştirmektir. Zemin iyileştirme uygulamaları kapsamında; mekanik yöntemler (kompaksiyon), hidrolik yöntemler (drenaj), derin temel sistemleri (kazıklar) ve kimyasal ya da fiziksel katkı malzemeleri ile stabilizasyon teknikleri yaygın biçimde kullanılmaktadır. Son yıllarda özellikle katkı malzemeleri ile zemin stabilizasyonu, uygulama kolaylığı, ekonomik avantajları ve zemin davranışı üzerindeki olumlu etkileri nedeniyle öne çıkmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde, bir yandan sanayi yan ürünleri ve atık malzemeler yeniden değerlendirilerek çevresel yükler azaltılmakta, diğer yandan zeminlerin taşıma gücü, oturma davranışı ve durabilite özellikleri önemli ölçüde iyileştirilebilmektedir. Böylece hem çevresel sürdürülebilirlik hem de mühendislik performansı açısından bütüncül bir çözüm elde edilmektedir. Güncel araştırmalar, atık materyallerin ve biyopolimerlerin zemin stabilizasyonunda etkin ve sürdürülebilir alternatifler sunduğunu ortaya koymaktadır. Atık malzemeler, geri dönüştürülebilir ve düşük maliyetli olmaları sayesinde doğal kaynak tüketimini azaltırken; biyopolimerler, doğal kökenli ve çevre dostu yapıları nedeniyle sürdürülebilir mühendislik uygulamalarında önemli bir yer edinmektedir. Bu çalışma kapsamında da atık bir malzeme olan kiremit tozu (KT) ile biyopolimer esaslı bir katkı olan akasya zamkının birlikte kullanılmasıyla kil zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmış; elde edilen bulguların hem mühendislik performansı hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

Kiremit tozu, kırılmış, üretim fazlası veya kullanım dışı kalmış kiremitlerin öğütülmesiyle elde edilen ince taneli bir atık malzemedir. Pişirilmiş kil esaslı yapısı nedeniyle içeriğinde SiO_2 (silis), Al_2O_3 (alümina), Fe_2O_3 (demir oksit), CaO (kireç), MgO ve çeşitli alkali oksitler bulunmaktadır. Bu kimyasal bileşim, kiremit tozunun dolgu etkisi yaratmasının yanı sıra, belirli koşullarda puzolanik reaksiyonlar göstermesine de olanak sağlamaktadır. Gözenekli ve hafif yapısı, kolay temin edilebilirliği ve düşük maliyeti nedeniyle birçok sektörde yaygın olarak kullanılmakta olup, bu çalışmada da zemin stabilizasyonunda katkı malzemesi olarak tercih edilmiştir. Kiremit tozuna ek olarak kullanılan akasya zamkı (AZ), doğal polisakkarit yapıya sahip bir biyopolimerdir. Biyopolimerler, zemin taneleri arasında bağlayıcı bir ağ oluşturarak kohezyonun artmasına ve boşluk yapısının düzenlenmesine katkı sağlamaktadır. Bu mekanizma sayesinde zemin içerisinde permeabilite azalmakta, dayanım artmakta ve uzun dönem oturma davranışı iyileştirilmektedir. Literatürde yer alan birçok çalışma, biyopolimer katkılarının zeminlerin mekanik özellikleri üzerinde olumlu etkiler oluşturduğunu ortaya koymuştur. Akasya zamkının toksik olmaması, çevreye zarar vermemesi ve uygulama kolaylığı da bu malzemenin tercih edilmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu iki katkı malzemesi birlikte kullanılarak, kil zeminin konsolidasyon davranışı ve donma–çözülme döngüleri sonrasındaki performansı detaylı olarak incelenmiştir. Donma–çözülme olayı, zemin içerisindeki gözenek suyunun sıcaklık değişimleriyle birlikte donarak hacimsel genleşme göstermesi ve ardından çözülerek tekrar sıvı hâle geçmesi sürecidir. Bu süreç, özellikle mevsimsel sıcaklık farklarının yüksek olduğu bölgelerde zemin yapısını önemli ölçüde etkilemektedir. Donma sırasında, gözeneklerdeki suyun hacim artışı zemin tanelerini birbirinden uzaklaştırmakta ve özellikle ince taneli zeminlerde kapiler su hareketiyle buz merceklerinin oluşmasına neden olmaktadır. Çözülme aşamasında ise zemin yapısında meydana gelen bozulmalar sonucunda taşıma gücü azalmakta ve kalıcı oturmalar meydana gelmektedir.

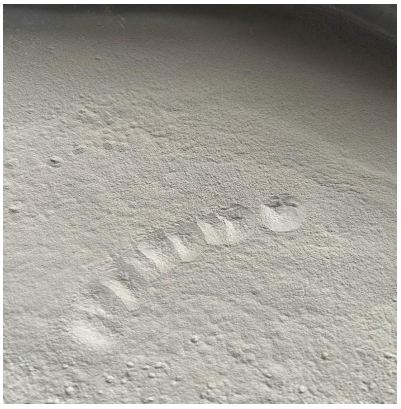
Donma–çözülme döngüleri, zemin mukavemetini azaltmakta, zemin–temel etkileşimini olumsuz yönde etkilemekte ve mühendislik yapılarında servis dışı kalmalara ve kalıcı deformasyonlara yol açabilmektedir. Bu etkiler özellikle siltli ve killi zeminlerde daha belirgin olup, kumlu zeminlerde suyun daha serbest hareket edebilmesi nedeniyle nispeten daha sınırlıdır. Donma–çözülme dayanımının belirlenebilmesi amacıyla, laboratuvar ortamında zemin numuneleri belirli sıcaklık aralıklarında tekrarlanan çevrimlere maruz bırakılmakta ve çevrimler sonrasında basınç dayanımı, hacim değişimi ve geçirgenlik gibi parametreler değerlendirilmektedir. Bu tür olumsuz etkileri azaltmak amacıyla gerçekleştirilen zemin iyileştirme çalışmalarında çimento, kireç, mermer tozu, uçucu kül ve geopolimer esaslı bağlayıcılar sıklıkla kullanılmaktadır.

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde; Javed ve Chakraborty [1], kil zeminin iyileştirilmesinde cam atık çamurunun etkinliğini araştırmış ve optimum katkı oranını %8 olarak belirlemişlerdir. Bağrıaçık ve arkadaşları [2], akasya zamkı biyopolimerinin kum zeminlerin dayanım ve geçirgenlik özellikleri üzerindeki olumlu etkilerini ortaya koymuştur. Albayrak ve arkadaşları [3], biyopolimer ve lif katkılarının birlikte kullanımının kil zeminlerin donma–çözülme sonrası mukavemetini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Orman [4], farklı katkı maddelerinin kil zeminlerin dayanım özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiş; Teber ve Akoğuz [5] ise biyopolimer ve kireç katkılarının donma–çözülme davranışını iyileştirdiğini belirtmiştir. Tunç ve arkadaşları [6], Arabik Gam biyopolimerinin kil zeminlerin konsolidasyon davranışını olumlu yönde etkilediğini; Poyraz ve Ural [7] ise atık porselen karosu katkısının kil zeminlerin mühendislik özelliklerini geliştirdiğini ortaya koymuştur. Yılmaz [8] uçucu kül katkısı ile çalışmış dayanımda artışlar elde etmiştir. Aksoy ve Yıldırım [9], kaolin kili içerisine polipropilen lif eklemişlerdir. Polipropilen lifi eklenen numunelerin serbest basınç mukavemetinin, katkısız kile göre yaklaşık 2 katına çıktığı gözlemlenmiştir. Bağrıaçık ve Deniz [10] yumuşak kilin içerisine içme suyu arıtma tesisi çamurunun (DWTS) eklemişlerdir. Farklı oranlarda atık çamur ekleyerek zeminin taşıma gücüne etkisini incelemişlerdir. En verimli sonuçların %10 karışım oranında elde edilmiştir. Singh ve arkadaşları [11] atık lastik parçalarını kil zemine eklemiş dayanımı incelemişlerdir. Sonuç olarak zeminin taşıma kapasitesini ve kayma direncini arttırdığı, likit limitini artırıp plastik limiti düşürdüğü gözlemlenmiştir. Uçkaç ve arkadaşları [12] killi kum zemine atık cam tozunun geopolimerizasyonunun mekanik etkisini incelemişlerdir. Geopolimerleştirilmiş cam tozu ilavesinin zeminin su ihtiyacını azaltırken yoğunluğunu artırdığı ve özellikle %30 cam tozu ile yüksek kür sıcaklığının serbest basınç dayanımını en üst seviyeye çıkardığı görülmüştür. Chavan ve arkadaşları [13] tuğla tozu, mermer tozu, plastik atık ve ahşap testere tozu gibi atık malzemelerin killi zeminin mekanik özellikleri üstüne etkisin incelemişlerdir. Sonuçta özellikle yüzde 4 oranında testere tozu ve yüzde 10 oranında tuğla tozu ilavesinin zeminin CBR değerlerinde en yüksek artışı sağladığı görülmüştür. Yapılan kapsamlı literatür taraması sonucunda, kiremit tozunun zemin iyileştirme alanında farklı mühendislik özelliklerine etkisinin araştırıldığı çalışmalar bulunmakla birlikte, özellikle donma–çözülme çevrimleri altındaki davranışının yeterince detaylı incelenmediği tespit edilmiştir. Ayrıca, biyopolimerlerin tek başına zemin stabilizasyonundaki performanslarını değerlendiren araştırmalar mevcut olmasına rağmen, biyopolimer ve kiremit tozu katkılarının birlikte kullanıldığı herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu durum, mevcut araştırmanın özgünlüğünü ve bilimsel katkı potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, hem kiremit tozunun donma–çözülme koşulları altındaki davranışının değerlendirilmesi hem de biyopolimer ile kullanımının etkilerinin incelenmesi, literatürdeki önemli bir boşluğu dolduracak nitelikte olup çalışmaya yenilikçi ve özgün bir değer kazandırmaktadır.

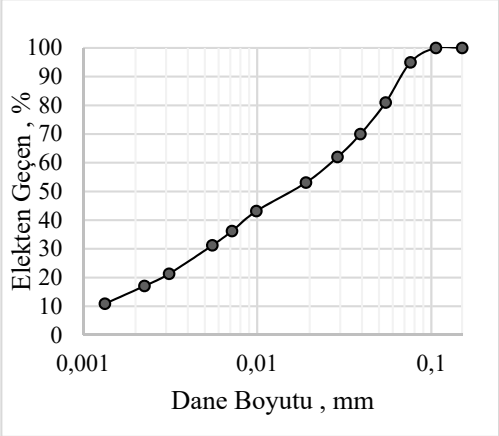
2. YÖNTEM

2.1. Materyal

Bu çalışmada kullanılan doğal kil zemin numuneleri, Adana ili Sarıçam ilçesi sınırlarından temin edilmiştir (Şekil 1). Kil, tane çapı 0,002 mm'den küçük olan mineral tanelerinden oluşan ince daneli bir zemin türüdür ve zemin davranışı, bu ince taneli yapısına bağlı olarak yüksek plastisiteli özellikler göstermektedir. Kullanılan kil zemin numunesi üzerinde, TS 1900-1[14] standardına uygun olarak gerçekleştirilen deneyler sonucunda, özgül ağırlığı 2,63 g/cm³, maksimum kuru birim hacim ağırlığı 1,69 g/cm³ ve optimum su içeriği %21 olarak belirlenmiştir. Numunenin likit limiti %51, plastik limiti %28 bulunmuş ve buna göre zemin sınıflandırması, USCS (Unified Soil Classification System) sistemi kullanılarak yüksek plastisiteli kil (CH) olarak belirlenmiştir (Şekil 2) [15].



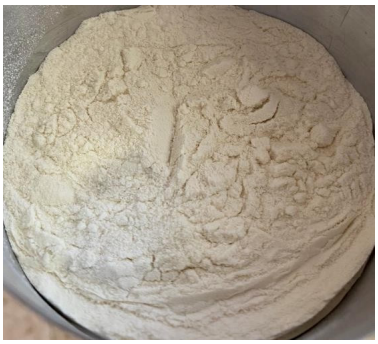
Şekil 1. Doğal kil numunesi (öğütme sonrası)



Şekil 2. Kil zemin granülometri eğrisi

Bu yüksek plastisiteli kil zemin, yüksek su tutma kapasitesi, düşük permeabilite ve özellikle zamana bağlı oturma davranışına sahip olması nedeniyle yüksek oturma potansiyeline sahiptir. Çalışmada, zemin oturma potansiyelinin azaltılması hedeflenmiştir. Ayrıca, zemin mevsimsel sıcaklık değişimlerine bağlı olarak maruz kaldığı donma-çözülme (D-Ç) davranışı açısından incelenecek ve çevrim öncesi ve sonrası mühendislik parametreleri değerlendirilmiştir.

Zemin iyileştirmede kullanılan katkı malzemelerinden biri olan Akasya Zamkı (AZ), doğal kökenli bir biyopolimerdir ve gıda, inşaat gibi farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sarımsı, yarı saydam bir görünüm sergileyen AZ (Şekil 3), suda tamamen çözülerek viskoz bir jel formu oluşturur ve bu özellik zemin içerisinde homojen bir dağılım sağlar. Akasya zamkının fiziksel yapısını daha detaylı karakterize etmek amacıyla lazer tanecik boyutu analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre malzemenin özgül yüzey alanı 127,8 m²/kg olarak ölçülmüştür. Ortalama parçacık boyutu dağılımı verileri incelendiğinde; malzemenin hacimsel olarak %10'unun 16,5 µm, %50'sinin 49,8 µm ve %90'ının 128 µm boyutunun altında olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 1).



Şekil 3. Akasya zamkı

Çizelge 1. AZ kimyasal ve fiziksel özellikler [6]

Ph	4,7
Renk	Sarımsı beyaz toz
Nem	9,40%
Toplam kül	3,30%
Toplam ağır metal	<5 ppm
Kurşun	<1 ppm
Arsenik	<3 ppm
Cıva	<1 ppm
Katminyum	<1 ppm
Özgül yüzey alanı	127,8 m²/kg
Parçacık boyutu D_{x10}	16,5 µm
Parçacık boyutu D_{x50}	49,8 µm
Parçacık boyutu D_{x90}	128 µm

Diğer bir katkı malzemesi olan KT ise, kullanım ömrünü tamamlamış veya üretim sürecinde ortaya çıkan atık kiremitlerin öğütülmesiyle elde edilen kil esaslı seramik kökenli bir malzemedir. KT, gözenekli ve sert yapısı sayesinde zemin iyileştirme çalışmalarında farklı mühendislik amaçlarla kullanılabilmektedir (Şekil 4). Kil oranı yüksek ve ince taneli zeminlerde KT kullanımı özellikle önemlidir; küçük tane boyutu, boşlukları doldurarak sıkışabilirliği artırır ve puzolanik reaksiyonlar aracılığıyla zemin yapısını güçlendirir. Bu sayede taşıma gücü artar, oturma ve şişme gibi mühendislik problemleri kontrol altına alınabilir.

AZ ve KT katkıları, CH zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde, oturma kontrolü sağlamak amacıyla kullanılmış ve bu katkıların D-Ç davranışı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir.



Şekil 4. Kiremit tozu

Konsolidasyon deneylerinde kullanılacak karışım oranları ise CH tipi kil zemin üzerinde gerçekleştirilen detaylı serbest basınç dayanımı (SBD) testlerinin sayısal sonuçlarından elde edilmiştir. Katkısız kil zeminin (KZ) başlangıçtaki serbest basınç dayanımı 1,22 kg/cm² olarak ölçülmüştür. KT katkısının mekanik dayanım etkisini incelemek amacıyla sırasıyla %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında karışımlar hazırlanmış; bu numunelerden elde edilen SBD değerleri sırasıyla 2,72 kg/cm², 2,90 kg/cm², 3,25 kg/cm², 3,06 kg/cm² ve 3,00 kg/cm² olarak tespit edilmiştir. Elde edilen dayanım değerleri sonucunda en yüksek dayanımı veren %3 oranı optimum KT miktarı olarak seçilmiştir. Benzer şekilde, AZ biyopolimeri için %0,5, %0,75, %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında testler gerçekleştirilmiş; sırasıyla 2,50 kg/cm², 2,57 kg/cm², 2,62 kg/cm², 2,58 kg/cm², 2,34 kg/cm², 2,29 kg/cm² ve 1,25 kg/cm² dayanım değerleri ölçülerek maksimum dayanımın elde edildiği %1 oranı optimum AZ olarak belirlenmiştir. Tek başına ulaşılan bu dayanım değerlerine kıyasla, hazırlanan %1 AZ + %3 KT kombine numunesi zemin dayanımını en üst seviyeye taşıyarak 3,39 kg/cm² SBD değerine ulaşmıştır. Katkı maddelerinin kür süresini belirlemek amacıyla, hazırlanan numuneler 1, 5, 10, 15 ve 25 gün süreyle desikatörde kürlenmiştir. Kür süreleri sonunda yapılan ölçümlerde sırasıyla 1,40 kg/cm², 3,39 kg/cm², 2,38 kg/cm², 2,10 kg/cm² ve 2,10 kg/cm² dayanım değerleri elde edilmiş, böylece maksimum mekanik performans 5 günlük kür süresinde elde edilmiştir [16].

2.2. Metot

Bu çalışmada, hem optimum katkı oranlarında KT ve AZ ile stabilize edilmiş numuneler hem de doğal kil zemin numuneleri üzerinde konsolidasyon deneyleri uygulanmıştır [15]. Bu yaklaşımın amacı, katkı maddelerinin zemin davranışı üzerindeki etkilerinin, doğal zemin ile karşılaştırmalı olarak nicel olarak değerlendirmektir. Deneylerde kullanılan konsolidasyon düzeneği Şekil 5'te gösterilmiştir. Konsolidasyon deneyleri, TS 1900-2 [17] standardı doğrultusunda yürütülmüş ve numuneler iç çapı 50 mm, yüksekliği 20 mm olan konsolidasyon ringlerinde hazırlanmıştır. Numuneler, kademeli olarak artırılan düşey gerilmeler altında 800 kPa'ya kadar yüklenmiş ardından zeminin şişme davranışının ve elastik deformasyonlarının incelenebilmesi amacıyla yine kademeli olarak boşaltma işlemi gerçekleştirilmiştir. Deney boyunca hem yükleme hem de boşaltma adımlarında zamana bağlı deformasyon ve boşluk değişimi kaydedilmiştir. Donma–çözülme davranışı için, laboratuvar ortamında numuneler belirlenen sıcaklık aralıklarında tekrarlanan çevrimlere tabi tutulmuştur. Numuneler standart konsolidasyon numuneleri gibi hazırlanmış sonrasında ise birkaç kat streç filme sarılarak donma-çözülme kabinin de döngüler gerçekleştirilmiştir [18]. Literatürde Othman ve Benson [19] tarafından yapılan deneysel çalışmada mevcut numuneden 24 kat daha büyük olan yalıtımsız standart kil numunelerinin (102x114 mm) çekirdek sıcaklığının ortam sıcaklığıyla dengelenmesi için yalnızca birkaç saatin yeterli olduğu belirtilmektedir. Bu doğrultuda, 5x2 cm boyutlarındaki numunelerin merkezine kadar kesintisiz ve homojen bir donma-çözülme döngüsü sağlamak amacıyla 3 saatlik donma ve 3 saatlik çözülme sürelerinin tam ısıl dengeyi sağlamada teorik ve deneysel olarak yeterli olacağı kabul edilmiştir. Çevrim sayısı 1, 3, 5 ve 10 olarak seçilmiş [20], böylece numuneler sırasıyla 6, 18, 30 ve 60 saat D-Ç işlemine maruz bırakılmıştır. Deneylerin tamamlanmasının ardından, elde edilen veriler kullanılarak yük–boşluk oranı (log(p)–e) eğrileri çizilmiş ve bu eğrilerden konsolidasyon katsayısı (C_v), hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) ve boşluk oranı (e) gibi temel konsolidasyon parametreleri hesaplanmıştır. Böylece hem katkı içeren hem de doğal numunelerin konsolidasyon davranışları nicel olarak karşılaştırılmış ve D-Ç çevrimleri sonrası KT ve AZ katkılarının zemin davranışına etkisi değerlendirilmiştir. Bu yöntem, katkı maddelerinin hem oturma kontrolü hem de D-Ç dayanımı üzerindeki etkilerinin sistematik olarak incelenmesini sağlamış ve zemin stabilizasyonu için önerilebilecek mühendislik uygulamalarına temel oluşturmuştur. Şekil 6'da konsolidasyona ait donma-çözülme numunelerine ait görseller sunulmuştur.



Şekil 5. Konsolidasyon deney düzeneği

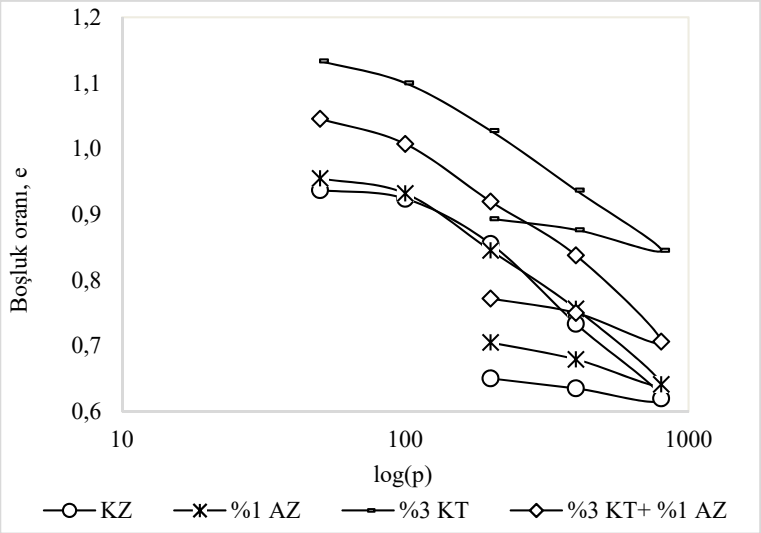


Şekil 6. Donma-çözülme konsolidasyon döngü süreci

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Katkılı Kil Zeminin Konsolidasyon Parametrelerinin Belirlenmesi

KZ ve optimum oranlarında malzeme içeren katkılı numunelerin konsolidasyon verileri elde etmek amacıyla konsolidasyon deneyleri yapılmış ve e-log(p) eğrileri elde edilmiştir (Şekil 7) [15].



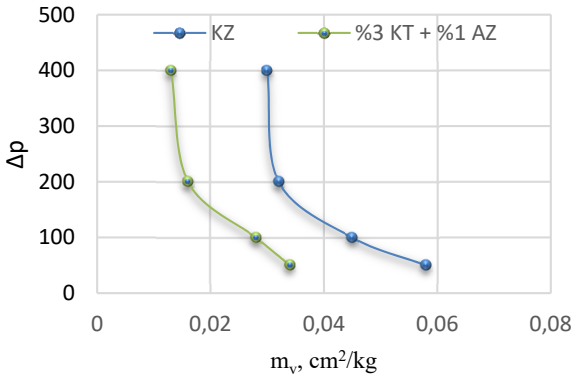
Şekil 7. Kil zemin, kiremit tozu, biyopolimer ve kombinasyon konsolidasyon eğrisi (e- $\log_p$)

Çizelge 2'de sunulan konsolidasyon katsayısı (C_v) ve Şekil 8'de verilen hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) değerleri incelendiğinde, katkı malzemelerinin kil zeminin mekanik ve deformasyon özellikleri üzerinde olumlu etki gösterdiği belirlenmiştir. Doğal kil zeminlerde düşük C_v değerleri, konsolidasyon hızının sınırlı olduğunu ve drenaj koşullarının yetersizliğini işaret etmektedir. Katkı malzemelerinin uygulanmasıyla C_v değerlerinde belirgin artışlar gözlenmiş; özellikle kiremit tozu katkısı, 100 kPa ve 800 kPa yükleme kademelerinde maksimum C_v değerleri sağlamış ve böylece konsolidasyon süresinin azaldığını göstermiştir. Akasya zamkı katkısı ise başlangıç yüklemeleri (50 kPa) altında yüksek C_v değerleri üretmiş olup, biyopolimerin düşük gerilmelerde zeminin geçirgenliğini artırıcı etkisini ortaya koymaktadır. %3 KT + %1 AZ kombinasyonu, özellikle 200–400 kPa aralığında en yüksek ve dengeli C_v değerlerini vererek orta yükleme kademelerinde konsolidasyon hızını optimize etmiştir.

Çizelge 2. KZ ve kombinasyonlara ait C_v değerleri(cm^2/dk)

Parametre	**Konsolidasyon katsayısı (C_v, cm^2/dk)**			
Kademeler	**KZ**	**KT**	**AZ**	**%3 KT + %1 AZ**
50	0,34	0,23	0,57	0,50
100	0,10	0,57	0,37	0,18
200	0,21	0,35	0,29	0,49
400	0,20	0,25	0,23	0,51
800	0,26	0,37	0,40	0,26

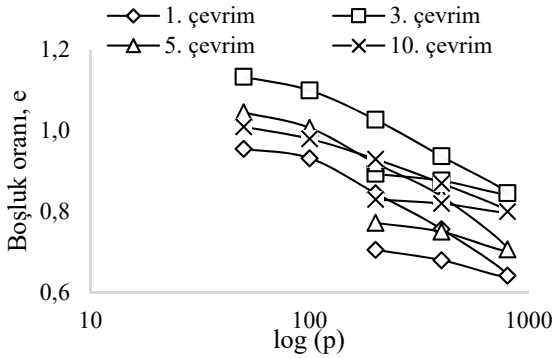
Hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) analizlerinde (Şekil 8), doğal kil zeminde yüksek m_v değerleri, zeminin yük altında yüksek sıkışabilirliğe sahip olduğunu göstermektedir. Katkı malzemelerinin uygulanmasıyla m_v değerlerinde sistematik bir azalma gözlenmiştir. Bu durum doğal halde hacimsel değişimlere hassasiyet gösteren zeminin katkı malzemesi eklenmesi ile hacimsel değişimlere karşı direncinin arttığını göstermektedir.



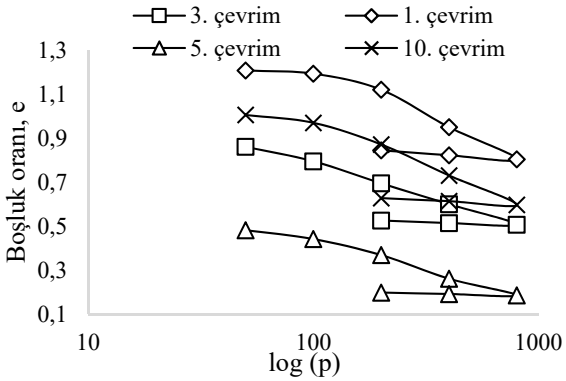
Şekil 8. KZ ve kombinasyona ait m_v değerleri

3.2. Kil Zemin ve Katkılı Zeminin Donma-Çözülme Konsolidasyon Davranışı

Kil zemin ve katkılı zemin numunelerine uygulanan konsolidasyon deneyleri sonrasında, mevsimsel değişimlerin etkisiyle ortaya çıkan donma-çözülme davranışını değerlendirmek amacıyla numuneler 1, 3, 5 ve 10 çevrim sayısına tabi tutulmuştur. Belirlenen döngü sayıları tamamlandıktan sonra, numuneler üzerinde konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çevrimsel döngülere karşılık gelen konsolidasyon eğrileri Şekil 9 ve Şekil 10'da sunulmuştur.



Şekil 9. KZ'ye ait çevrimsel konsolidasyon eğrileri



Şekil 10. Optimum katkılı numunelerin çevrimsel konsolidasyon eğrileri

Konsolidasyon deneyinden sonra zeminin oturma davranışı açısından etkilerini görmek amacı ile konsolidasyon parametreleri olan C_v ve m_v değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 3.-4.-5.-6, Şekil 11 – Şekil 12). Donma–çözülme çevrimleri sonrası doğal kil zeminlerde konsolidasyon katsayısı değerleri düşük ve düzensiz bir dağılım sergilemiştir; bu durum gözenek yapısının bozulduğunu ve drenaj yollarının

etkinliğinin azaldığını göstermektedir. Yük artışı ile C_v değerlerinde genel bir azalma gözlenmiş olup, bu da yüksek yükler altında oturmaların daha uzun sürelerde gerçekleşeceğine işaret etmektedir.

Buna karşın katkılı zeminlerde C_v değerleri her yük kademesinde doğal zemine kıyasla daha yüksek bulunmuş ve özellikle düşük yüklerde belirgin bir artış göstermiştir. Bu durum, katkı malzemelerinin zemin içerisindeki parçacıklar arası bağları güçlendirerek D-Ç etkilerine karşı dayanıklılığı artırdığını ve boşluk suyu basıncının daha hızlı sönümlenmesini sağladığını göstermektedir.

Çizelge 3. C_v, cm^2/dk (1. döngü)

Parametre	Konsolidasyon katsayısı (C_v, cm^2/dk)	
Yükleme kademeleri	**KZ**	**%3 KT + %1 AZ**
50	0,32	0,46
100	0,24	0,20
200	0,23	0,34
400	0,24	0,26
800	0,29	0,31

Çizelge 4. C_v, cm^2/dk (3. döngü)

Parametre	Konsolidasyon katsayısı (C_v, cm^2/dk)	
Yükleme kademeleri	**KZ**	**%3 KT + %1 AZ**
50	0,30	0,37
100	0,24	0,33
200	0,33	0,30
400	0,19	0,27
800	0,26	0,25

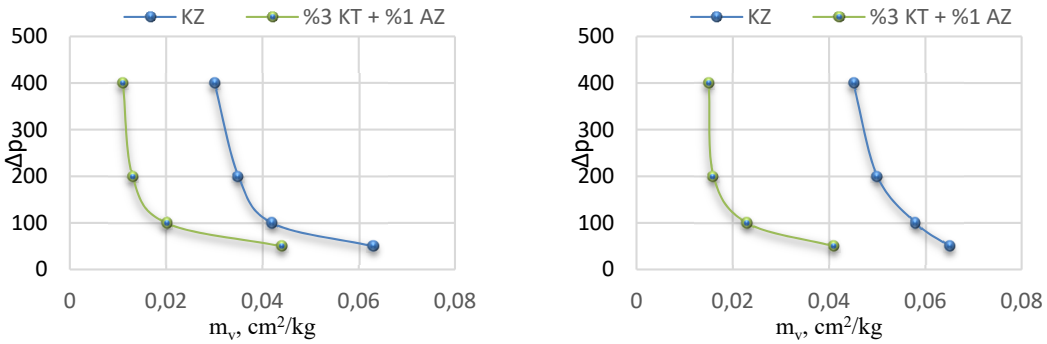
Çizelge 5. C_v, cm^2/dk (5. döngü)

Parametre	Konsolidasyon katsayısı (C_v, cm^2/dk)	
Yükleme kademeleri	**KZ**	**%3 KT + %1 AZ**
50	0,31	0,32
100	0,27	0,24
200	0,21	0,30
400	0,16	0,32
800	0,14	0,17

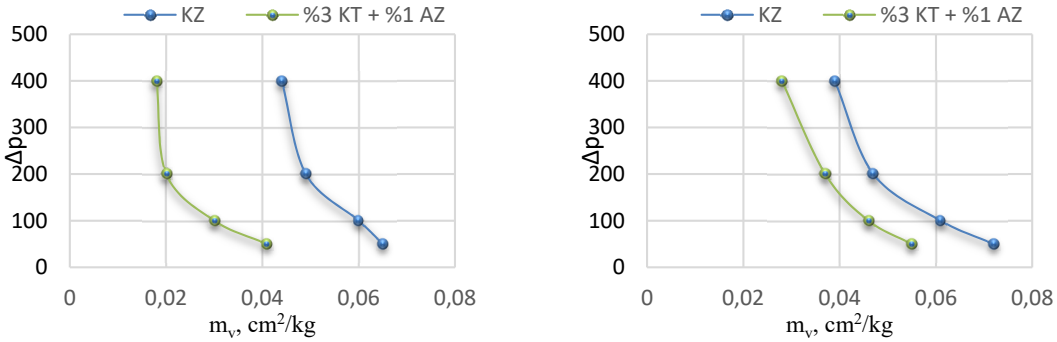
Çizelge 6. C_v, cm^2/dk (10. döngü)

Parametre	Konsolidasyon katsayısı (C_v, cm^2/dk)	
Yükleme kademeleri	**KZ**	**%3 KT + %1 AZ**
50	0,20	0,31
100	0,13	0,21
200	0,19	0,27
400	0,16	0,22
800	0,14	0,18

Donma–çözülme çevrimleri sonrası elde edilen veriler, doğal kil zeminlerde hacimsel sıkışma katsayısı değerlerinin oldukça yüksek seviyelere ulaştığını ve çevrim sayısının artışıyla birlikte bu değerlerde belirgin bir yükselme eğilimi gözlenmiştir (Şekil 11- Şekil 12). Bu durum, tekrar eden D-Ç etkilerinin zemin yapısında yol açtığı bozulmalar sonucunda gözenek düzeninin bozulduğunu ve zeminin yük altında daha fazla sıkışmaya eğilimli olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle 5. ve 10. çevrimler karşılaştırıldığında, doğal zeminde hacimsel sıkışma katsayısındaki artışın belirginleştiği ve dolayısıyla oturmaların daha uzun sürelerde ve daha büyük miktarlarda gerçekleşebileceği öngörülmektedir. Buna karşılık, katkı malzemeleri ile iyileştirilmiş zeminlerde m_v değerleri her yükleme kademesinde doğal zemine kıyasla anlamlı şekilde daha düşük seviyelerde kalmıştır. Bu gözlem, katkı malzemelerinin hacimsel sıkışma eğilimini azalttığını ve D-Ç döngülerinde karşılaşılabilecek oturma potansiyelini sınırlandırdığını göstermektedir. Çevrim sayısının artması ile katkılı zeminde m_v değerlerinde kısmi bir artış gözlense de doğal zemine kıyasla belirgin farkın korunması, iyileştirmenin çevrim sayısının artmasıyla D-Ç çevrimleri altında dahi etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 11. 1.-3. çevrim m_v katsayıları



Şekil 12. 5.-10. çevrim m_v katsayıları

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada yüksek plastisiteli kil zeminin konsolidasyon parametreleri, kiremit tozu ve akasya zamkı katkıları ile iyileştirilmiş hâliyle ve farklı donma–çözülme çevrimlerine maruz bırakılarak deneysel olarak incelenmiştir. Sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Konsolidasyon katsayısı değerleri doğal zeminde düşük ve düzensiz bir seyir göstermiş olup, bu durum boşluk suyu drenajının kısıtlı olduğunu ortaya koymaktadır. Katkı uygulanan zeminlerde ise C_v değerleri artış göstermiştir. Özellikle orta yükleme kademelerinde (200-400 kPa) doğal zeminde ortalama 0,20 cm²/dk ölçülen C_v değerleri, %3 KT + %1 AZ kombinasyonunda 0,50 cm²/dk seviyelerine ulaşarak konsolidasyon hızını yaklaşık %150 oranında artırmış ve zeminin drenaj kabiliyetini önemli ölçüde iyileştirmiştir.
- Hacimsel sıkışma katsayısı açısından doğal kil zeminde yüksek değerler elde edilmiş, bu da zeminin fazla oturma eğilimi gösterebileceğini işaret etmektedir. Katkı malzemelerinin uygulanması, zeminin oturma potansiyelini ciddi oranda düşürmüştür. Doğal zeminde ilk yükleme kademelerinde (50-100 kPa) 0,058 cm²/kg olan m_v değeri, KT+AZ kombinasyonu ile 0,033 cm²/kg seviyesine düşerek hacimsel değişimlerde yaklaşık %43 oranında bir azalma sağlamıştır. Yüksek gerilme kademelerinde ise doğal zeminin 0,030 cm²/kg olan m_v değeri, katkılı numunede 0,013 cm²/kg'a düşerek hacimsel değişimlerde %56'lık bir azalma gerçekleştirilmiştir.
- D-Ç çevrimleri sonrasında C_v değerleri doğal zeminde azalan bir seyir göstermiş olup, bu durum tekrarlı döngülerin gözenek yapısını bozarak boşluk suyu drenajını kısıtladığını ortaya koymaktadır. Katkı uygulanan zeminlerde ise çevrimsel bozulmaları sınırlandırılarak C_v değerlerinde katkısız zeminde elde edilen değerlere göre artış gözlenmiştir. Özellikle en kötü performans 10. çevrim sonrasında düşük yükleme kademesinde (50 kPa) doğal zeminde 0,20 cm²/dk ölçülen C_v değeri, %3 KT + %1 AZ kombinasyonunda 0,31 cm²/dk seviyelerine ulaşarak konsolidasyon hızını yaklaşık %55 oranında artırmıştır. Yüksek gerilme kademelerinde ise %29'luk bir iyileşme (0,14 cm²/dk'den 0,18 cm²/dk'ye) sağlayarak zeminin donma-çözülme koşullarındaki drenaj kabiliyetini önemli ölçüde korumuştur.

- D-Ç çevrimleri doğal kil zeminde gözenek yapısını bozarak hacimsel sıkışma değişimlerinde belirgin düşüş yaratmıştır. 10. çevrim sonunda doğal zeminin m_v değeri başlangıca göre artarak 0,072 cm²/kg'a ulaşırken, katkılı numunelerde bu değer çevrimsel bozulmalara rağmen 0,055 cm²/kg seviyesinde kalmıştır. Bu bulgu, D-Ç çevriminin ardından bile katkılı zeminin doğal zemine kıyasla yaklaşık %23 daha az sıkışabilirlik gösterdiğini ve D-Ç etkilerine karşı yapısal bütünlüğünü kısmen de olsa koruyabildiğini göstermektedir.
- Sonuç olarak, kiremit tozu ve akasya zamkı kombinasyonunun donma-çözülme durumunda konsolidasyon parametrelerini iyileştirmede alternatif malzemeler olabileceklerini göstermektedir.

5. KAYNAKLAR

1. Javed, S.A. & Chakraborty, S. (2020). *Effects of waste glass powder on subgrade soil ımprovement.* World Scientific News, 30-42
2. Tunç, U., Bağrıaçık, B. ve Yıldız, A. (2021). Akasya zamkı (arabik gam) ile iyileştirilen nehir kumu ve geri dönüştürülmüş kumun mühendislik özelliklerinin araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36*(2), 571-579.
3. Güven, B., Günek, Ş. ve Kurt Albayrak, Z.N. (2023). Kilin mukavemeti ve donma-çözülme sonrası mukavemeti üzerinde biyopolimer ve lif katkısının ortak etkisinin araştırılması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 26*(4), 951-961.
4. Orman, A. (2021). Düşük ve yüksek plastisiteli kil zeminlerde yüksek fırın cürufu, mermer tozu ve polipropilen fiberin zemin iyileştirilmesine katkısının incelenmesi. *Yüksek lisans tezi.* Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
5. Teber, D. ve Akoğuz, H. (2024). Kireç ve sodyum aljinat biyopolimeri ile iyileştirilen yüksek plastisiteli kil zeminin donma-çözülme özelliklerinin araştırılması. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 14*(3), 1371-1383.
6. Tunç, U., Bağrıaçık, B., Aslan, H., Altay, G. ve Şenol, A. (2022). Arabik gam katkılı doğal kil zeminin konsolidasyon sonuçlarının değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37*(3), 731-740.
7. Poyraz, S. ve Ural, N. (2022). Atık porselen karonun (APK) kil zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9*(2), 771-782.
8. Yılmaz, F. (2020). Uçucu kül ve mermer tozu katkılarının zeminin stabilizasyonuna ve donma-çözülmesine etkisinin araştırılması. *Academic Platform Journal of Engineering and Science, 8*, 56-61.
9. Aksoy, H. S. ve Yıldırım, A. (2023). PPF lifi ve PET talaşı ile güçlendirilmiş kaolin kilinin kayma mukavemetinin incelenmesi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 13*(2), 266-275.
10. Bağrıaçık, B. & Güner, E.D. (2020). An experimental investigation of reinforcement thickness of improved clay soil with drinking water treatment sludge as an additive. *KSCE Journal of Civil Engineering, 24*(12), 3619-3627.
11. Singh, A., Ratre, D., Shrisant, T., Kerketta, A., Chandrakar, D. & Garg, A.K. (2024). Utilization of waste rubber tyre in soil stabilization. *International Journal of Scientific Research in Engineering & Technology, 4*(2), 138-141.
12. Uçkaç, A.T., Rahat, E. ve Eskişar Tefçi, T. (2024). Atık cam katkılı bir zemin geopolimerizasyonu. *19. Ulusal Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Konferansı Bildiriler Kitabı,* 1-10. Ankara, Türkiye, Hacettepe Üniversitesi.
13. Chavan, P., Nawalkar, D., Pakhale, P., Khajone, K., Solanke, R., Dharpal, K. & Saraf, S. S. (2025). Stabilization of clayey soil by using wastes materials. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management (IJSREM), 9*(4), 1-9.
14. TS 1900-1. (2006). *İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini.* Türk Standardları Enstitüsü, 112, 99.
15. Özbahçeci Gökdeniz, İ. (2024). Donma-çözülme etkisi altındaki farklı katkılar ile iyileştirilen kil zeminlerin geoteknik açıdan değerlendirilmesi. *Yüksek lisans tezi.* Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
16. Özbahçeci Gökdeniz, İ. ve Bağrıaçık, B. (2024). Kiremit tozu ve biyopolimerle iyileştirilmiş kil zeminin mukavemet parametrelerinin incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *39*(3), 771-784.
17. TS 1900-2. (2006). *İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini.* Türk Standartları Enstitüsü, 112, 64.

18. İbiş, N., Artuk, F., Zaimoğlu, A.Ş. ve Oltulu, M. (2025). Sıvılaştırılmış PET atıklarıyla iyileştirilen kil zeminlerin kıvam limitleri ve donma-çözülme davranışının incelenmesi. *Ege 14. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Konferansı Bildiri Kitabı,* 262-272.

19. Othman, M.A. & Benson, C.H. (1993). Effect of freeze-thaw on the hydraulic conductivity and morphology of compacted clay. *Canadian Geotechnical Journal, 30*(2), 236-246.

20. Zaimoğlu, A.Ş., Hattatoğlu, F. ve Akbulut, R.K. (2013). Yüke maruz ince daneli zeminlerin donma-çözülme davranışı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19*(3), 117-120.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

Multi-Algorithm-Based Optimization of LQR Controller Parameters for a Triple Inverted Pendulum System

Berivan KOÇ [1,a], **Handan GÜRSOY-DEMİR** [2,b]

[1]*Iskenderun Technical University, Institute of Graduate Studies, Department of Computer Engineering, Hatay, Türkiye*
[2]*Iskenderun Technical University, Department of Computer Engineering, Hatay, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0003-0174-4872; [b]**ORCID**: 0000-0001-5486-454X*

Article Info
Received : 01.05.2026
Accepted : 08.09.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1941490

Corresponding Author
Handan GÜRSOY-DEMİR
handan.gursoy@iste.edu.tr

Keywords
Triple inverted pendulum
LQR
Metaheuristic algorithms
Parameter optimization
Optimal control

***How to cite:** KOÇ, B., GÜRSOY-DEMİR, H., (2026). Multi-Algorithm-Based Optimization of LQR Controller Parameters for a Triple Inverted Pendulum System. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 663-678.*

ABSTRACT
This study addresses the Linear Quadratic Regulator (LQR)-based control of a triple inverted pendulum system with nonlinear, unstable, and multivariable dynamics. Since LQR performance depends on the selection of the Q and R weighting matrices, a total of nine parameters are optimized using metaheuristic algorithms. Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), Grey Wolf Optimization (GWO), Whale Optimization Algorithm (WOA), and Artificial Circulation System Algorithm (ACSA) are employed. The optimal LQR parameters obtained from each algorithm are compared under identical simulation conditions, and the performance is evaluated using ISE, ITAE, overshoot, settling time, and control effort. The results show that metaheuristic algorithms are effective in LQR parameter selection and improve the stabilization performance compared with the classical LQR controller. Among the investigated methods, ACSA-LQR achieves the best cart position performance, whereas GWO-LQR offers a favorable balance between control performance and convergence consistency.

Üçlü Ters Sarkaç Sistemi için LQR Denetleyici Parametrelerinin Çoklu Algoritma Tabanlı Optimizasyonu

Makale Bilgileri
Geliş : 01.05.2026
Kabul : 08.09.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1941490

Sorumlu Yazar
Handan GÜRSOY-DEMİR
handan.gursoy@iste.edu.tr

Anahtar Kelimeler
Üçlü ters sarkaç
LQR
Meta-sezgisel algoritmalar
Parametre optimizasyonu
Optimal kontrol

***Atıf şekli:** KOÇ, B., GÜRSOY-DEMİR, H., (2026). Üçlü Ters Sarkaç Sistemi İçin LQR Denetleyici Parametrelerinin Çoklu Algoritma Tabanlı Optimizasyonu. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 663-678.*

ÖZ
Bu çalışmada, doğrusal olmayan, kararsız ve çok değişkenli yapıya sahip üçlü ters sarkaç sisteminin Lineer Kuadratik Regülatör (LQR) tabanlı denetimi ele alınmıştır. LQR denetleyicinin başarımı Q ve R ağırlık matrislerinin seçimine bağlı olduğundan, dokuz parametre meta-sezgisel algoritmalarla optimize edilmiştir. Genetik Algoritma (GA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Gri Kurt Optimizasyonu (GWO), Balina Optimizasyon Algoritması (WOA) ve Yapay Dolaşım Sistemi Algoritması (ACSA) kullanılmıştır. Her bir algoritmadan elde edilen optimal LQR parametreleri aynı benzetim koşulları altında karşılaştırılmış ve denetleyici performansı ISE, ITAE, aşım, yerleşme süresi ve kontrol çabası ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, meta-sezgisel algoritmaların LQR parametre seçiminde etkili olduğunu ve dengeleme performansını klasik LQR'ye göre iyileştirdiğini göstermektedir. İncelenen yöntemler arasında ACSA-LQR araba konumu düzenlemesinde en başarılı sonuçları elde ederken, GWO-LQR kontrol performansı ve yakınsama tutarlılığı açısından daha dengeli bir çözüm sunmuştur.

1. INTRODUCTION

Inverted pendulum systems are among the most widely used benchmark problems in control theory due to their inherently unstable, nonlinear, and multivariable dynamics. These systems are extensively employed to evaluate the effectiveness of both classical and modern control methods, particularly because of their sensitivity around the equilibrium point and strict stability requirements [1-3].

Compared with single-link systems, multi-link inverted pendulum structures exhibit considerably more complex dynamics. These systems involve a high degree of nonlinearity, strong coupling among states, and increased system order. In this context, the triple inverted pendulum system stands out as a highly challenging control problem. The increase in system order strengthens the tendency toward instability and further complicates the control problem. Therefore, the triple inverted pendulum system is regarded as a critical platform for testing advanced and optimal control methods.

Among classical control methods, PID-based approaches are widely preferred due to their simple structure and ease of implementation. However, in multi-link and high-order nonlinear systems, they may be insufficient to provide the desired transient and steady-state performance. In such systems, state-feedback control structures offer more effective solutions. In this context, the Linear Quadratic Regulator (LQR), one of the fundamental methods of optimal control theory, stands out because it obtains the optimal control law by minimizing a quadratic cost function that considers both system performance and control effort.

The performance of the LQR controller directly depends on the proper selection of the weighting matrices Q and R. In the literature, these parameters are mostly determined using heuristic approaches or trial-and-error methods. However, this approach is time-consuming and, in most cases, produces non-optimal results. This issue becomes even more pronounced in high-dimensional systems such as the triple inverted pendulum, where parameter tuning turns into a complex optimization problem.

In the literature, LQR-based control approaches have been successfully applied to different inverted pendulum configurations. Early studies mostly focused on single-link systems and demonstrated the capability of the LQR method to balance the pendulum in the upright position [1,2]. With the transition to more complex systems, the LQR method has also been applied to double and triple inverted pendulum systems. For example, self-tuning LQR approaches have been developed for double inverted pendulum systems [4], while the stabilization of three-link systems has been addressed in various studies [5,6]. These studies show that, with appropriate parameter selection, LQR can also be an effective control method for high-order systems.

Nevertheless, the main issue in classical LQR design is the selection of the Q and R weighting matrices. Determining these matrices by trial and error in many studies may lead to non-optimal transient responses, high control effort, or weak robustness performance. Therefore, in recent years, metaheuristic algorithms have begun to be used for the systematic tuning of LQR weights. Önen et al. compared GA, PSO, and ABC algorithms for LQR controller design on a double inverted pendulum system; they derived the nonlinear model using the Lagrange method, linearized it around the equilibrium point, and tested different optimization structures [7]. Bilgiç et al. tuned the LQR weights using the Bees Algorithm on an experimental linear inverted pendulum setup and showed that the method could improve the pendulum angle and cart position responses on a real system [8].

GA- and PSO-based LQR optimization approaches have also been applied to rotary and double inverted pendulum systems, and it has been reported that they provide better transient performance and lower control effort compared with classical methods [9-11]. Xiong and Wan proposed a PSO-based LQR algorithm for a double inverted pendulum system, while Shen demonstrated the applicability of GA-based LQR design for a double inverted pendulum [10,11]. For three-link inverted pendulum systems, however, the literature is more limited, and GA-based LQR studies mostly come to the forefront. Shen performed LQR weighting matrix optimization using GA for a three-link inverted pendulum [12]. Abdullah et al. developed a Genetic LQR approach for a three-link inverted pendulum by defining the GA chromosome through the diagonal elements of the Q matrix and the R value [6].

Within the scope of more recent studies, it is observed that advanced metaheuristic algorithms such as Grey Wolf Optimization (GWO) have also been experimentally validated in LQR-based inverted pendulum

control [13]. However, when the literature is examined in general, it is noteworthy that the majority of studies focus on single or double pendulum systems or consider only a single optimization algorithm. Comprehensive studies in which multiple metaheuristic algorithms are compared under the same conditions on the same triple inverted pendulum model appear to be limited.

Motivated by this literature gap, this study proposes an LQR-based control structure for the triple inverted pendulum system and optimizes the weighting matrices using different metaheuristic algorithms. In this context, in addition to GA, PSO, GWO, and the Whale Optimization Algorithm (WOA), the Artificial Circulation System Algorithm (ACSA), which effectively provides an exploration–exploitation balance and is relatively new in the literature, is also evaluated. An optimization problem consisting of nine parameters is considered, including eight Q weighting coefficients and one scalar R control weight and the performance of the algorithms is comparatively analyzed in terms of time-domain criteria, error indices, and control signal behavior.

The principal contribution of this study lies in establishing a unified framework for the metaheuristic tuning of the LQR weighting parameters of a triple inverted pendulum system. In contrast to approaches that focus on a single algorithm or optimize only a restricted subset of controller parameters, all eight diagonal elements of the (Q) matrix and the scalar (R) parameter are simultaneously determined using GA, PSO, GWO, WOA, and ACSA under identical computational conditions. Furthermore, to the best of the authors' knowledge, this study is the first to investigate ACSA for LQR weighting parameter optimization in an inverted pendulum system. The resulting controllers are assessed through error indices, transient-response characteristics, control effort, actuator demand, convergence behavior, and variability across independent runs. This framework enables a consistent evaluation of both optimization efficiency and closed-loop control performance, thereby providing a broader basis for selecting suitable LQR parameters for highly coupled and high-order unstable systems.

The remainder of the paper is organized as follows: Section 2 presents the mathematical model and state-space representation of the triple inverted pendulum system. Section 3 discusses the LQR controller design and the effects of weighting matrices on system performance. Section 4 explains the metaheuristic optimization algorithms used in the study. Section 5 presents the simulation results and comparatively analyzes the methods. Finally, Section 6 summarizes the study and discusses possible future work.

2. MATHEMATICAL MODEL OF THE PLANT

The triple inverted pendulum system is a high-order, nonlinear, and inherently unstable mechanical system consisting of three pendulum elements connected in series on a cart capable of linear motion. The system is defined by the cart position, pendulum angles, and their corresponding velocity components. Due to the multi-pendulum structure, the system dynamics exhibit a complex behavior involving mass interactions, angular coupling, gravitational effects, moments of inertia, and damping terms. Therefore, the triple inverted pendulum system is considered a highly challenging benchmark system for testing advanced control methods.

In this study, the mathematical model of the triple inverted pendulum system is derived using generalized coordinates. The generalized coordinate vector of the system is defined in Equation 1:

$$q = [x\ \alpha\ \beta\ \gamma]^T \tag{1}$$

Here, x represents the linear position of the cart, while α, β, and γ denote the angular displacements of the first, second, and third pendulums, respectively. The velocity vector corresponding to these variables is given in Equation 2,

$$\dot{q} = \left[\dot{x}\ \dot{\alpha}\ \dot{\beta}\ \dot{\gamma}\right]^T \tag{2}$$

The equations of motion of the triple inverted pendulum system can be expressed in a compact matrix form in terms of generalized coordinates as given in Equation 3:

$$M(q)\ddot{q} = F(q, \dot{q}, u) \tag{3}$$

Here, $M(q)$ represents the position-dependent mass/inertia matrix of the system, while $F(q,\dot{q},u)$ denotes the nonlinear force/moment vector that includes the effects of gravity, centrifugal forces, Coriolis terms, damping, and control input. This vector can be generally expressed as (Equation 4).

$$F(q,\dot{q},u) = \tau - C(q,\dot{q}) - G(q) - D\dot{q} \tag{4}$$

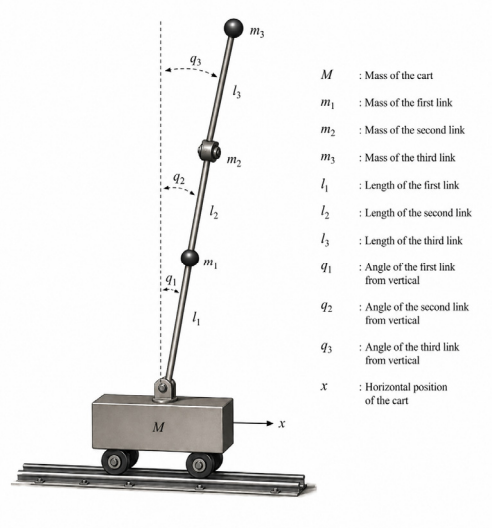


Figure 1. Triple inverted pendulum

Here, τ represents the input force applied to the system; $C(q,\dot{q})$ denotes the centrifugal and Coriolis effects; $G(q)$ represents the gravity-induced terms; and $D\dot{q}$ expresses the linear and angular damping effects. The trigonometric terms present in the elements of the mass matrix indicate the angular coupling between the pendulums, while the velocity-dependent terms in the force vector reveal the nonlinear dynamic characteristics of the system. In the triple inverted pendulum system, the control input is only the horizontal force applied to the cart. Therefore, the input vector is expressed as given in Equation 5.

$$\tau = [u\ 0\ 0\ 0]^T \tag{5}$$

Accordingly, the control input directly affects the linear motion of the cart; however, due to the dynamic coupling between the pendulums, it creates an indirect effect on all angular variables. This situation is one of the main factors that makes the control of the triple inverted pendulum system challenging. The nonlinear acceleration vector is obtained as given in Equation 6:

$$\ddot{q} = M^{-1}(q)F(q,\dot{q},u) \tag{6}$$

This equation constitutes the fundamental nonlinear dynamic model used in numerical simulations and the linearization process.

The physical parameters of the triple inverted pendulum system used in this study are given in Table 1. The parameters consist of the cart mass, pendulum masses, pendulum lengths, moments of inertia, damping coefficients, and gravitational acceleration.

Table 1. Mechanical parameters of the triple inverted pendulum on a cart

Parameter	Cart (i=0)	Arm-1 (i=1)	Arm-2 (i=2)	Arm-3 (i=3)	Unit
Mass (m_i)	0.969	0.204	0.150	0.070	kg
Length (L_i)	–	0.25	0.20	0.15	m
Moment of inertia (I_i)	–	0.001688	0.001100	0.000300	kg·m²
Cart damping d_0	0.5	–	–	–	N·s/m
Damping coefficient (d_i)	–	0.01	0.01	0.01	N·m·s/rad

This mathematical modeling approach enables the nonlinear and highly coupled dynamics of the system to be represented in a compact form. The obtained model both describes the physical behavior of the system and provides a basis for LQR controller design through linearization.

3. LQR CONTROLLER DESIGN

The Linear Quadratic Regulator (LQR) is one of the optimal control methods based on state feedback [8]. The main objective of this method is to minimize a performance index that simultaneously considers the deviation of the system states from the equilibrium point and the magnitude of the control signal. Therefore, the LQR approach provides a balanced controller design in terms of both stability and control energy.

Since the triple inverted pendulum system has a high-order, coupled, and unstable structure, it is difficult to achieve the desired performance using classical control methods based only on output error. In contrast, the LQR controller incorporates all system state variables into the feedback structure and provides simultaneous control over the cart position, pendulum angles, and their corresponding velocity components. This feature makes the LQR method a strong controller candidate for multivariable systems such as the triple inverted pendulum.

The linearized system model is expressed in the state-space form given in Equation 7 as follows:

$$\dot{X} = AX + Bu \tag{7}$$

Here, X denotes the system state vector, u denotes the control input, A denotes the system matrix, and B denotes the input matrix. In this study, the state vector is defined as follows (Equation 8):

$$X = [x \quad \dot{x} \quad \alpha \quad \dot{\alpha} \quad \beta \quad \dot{\beta} \quad \gamma \quad \dot{\gamma}] \tag{8}$$

The control law in the LQR controller is expressed as given in Equation 9:

$$u(t) = -KX(t) \tag{9}$$

Here, K is the LQR feedback gain matrix. This gain matrix is calculated to minimize the selected performance index. The performance index used in the LQR method is given in Equation 10 as follows:

$$J = \int_0^\infty (X^T QX + u^T Ru)dt \tag{10}$$

In this expression, the Q matrix represents the weights assigned to the system states, while the R matrix represents the weight assigned to the control input. Larger values in the Q matrix provide stricter control of the corresponding state variable, whereas increasing the R value limits the magnitude of the control signal. Therefore, the selection of the Q and R matrices has a direct effect on the system response.

In this study, the Q matrix is selected in diagonal form and defined by eight weighting coefficients corresponding to the eight state variables (Equation 11):

$$Q = \text{diag}(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7, q_8) \tag{11}$$

Here, q_1 denotes the weighting coefficient for the cart position, q_2 for the cart velocity, q_3 for the first pendulum angle, q_4 for the angular velocity of the first pendulum, q_5 for the second pendulum angle, q_6 for the angular velocity of the second pendulum, q_7 for the third pendulum angle, and q_8 for the angular velocity of the third pendulum.

The control weight is defined as a scalar (Equation 12):

$$R = r \tag{12}$$

The LQR gain is obtained by solving the continuous-time algebraic Riccati equation, as given in Equation 13:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \tag{13}$$

Here, P is the symmetric positive-definite Riccati solution matrix. After this matrix is obtained, the feedback gain is calculated as follows (Equation 14):

$$K = R^{-1}B^T P \tag{14}$$

Thus, the closed-loop system dynamics are expressed as follows (Equation 15):

$$\dot{X} = (A - BK)X \tag{15}$$

The stability of the closed-loop system depends on the eigenvalues of the $(A - BK)$ matrix being located in the left half-plane. Therefore, the appropriate selection of Q and R directly affects not only the transient response performance but also the closed-loop stability.

In this study, the main parameters to be optimized for the LQR controller are the diagonal elements of the Q matrix and the scalar R control weight. Thus, the controller design is considered as a nine-dimensional parameter optimization problem, consisting of eight Q weights and one R weight. Instead of the classical trial-and-error approach, these weighting coefficients are determined using metaheuristic algorithms. In this way, it is aimed to improve the stabilization performance of the triple inverted pendulum system, enhance time-domain criteria such as overshoot and settling time, and obtain a more balanced control signal.

4. METAHEURISTIC OPTIMIZATION-BASED LQR PARAMETER TUNING

4.1. Definition of the Optimization Problem

The performance of the LQR controller directly depends on the appropriate selection of the Q and R weighting matrices. However, especially in high-order, coupled, and unstable systems such as the triple inverted pendulum, determining these weights by trial and error is both time-consuming and heuristic. Therefore, in this study, the diagonal elements of the Q matrix and the scalar R control weight of the LQR controller are determined using metaheuristic optimization algorithms.

In this context, each candidate solution is defined as a nine-dimensional parameter vector in Equation 16:

$$z = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7, q_8, r],\ R = r \tag{16}$$

Each q_i value in this vector represents the corresponding diagonal element of the Q matrix used in the LQR controller, and r denotes the scalar control weight of the R matrix (Equation 17):

$$Q = \text{diag}(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7, q_8) \tag{17}$$

During the optimization process, for each candidate solution, the Q matrix was first constructed, then the LQR gain matrix K was calculated, and the time response of the triple inverted pendulum system was obtained. The objective function defined based on the obtained system response was then computed, and the algorithms were executed to minimize this value.

As seen in Table 2, the optimization problem includes the simultaneous determination of both the weights assigned to the state variables and the weight assigned to the control input. Through this structure, the LQR design aims not only to reduce state errors but also to regulate the control effort in a balanced manner. Running all algorithms under the same bounds and operating conditions enables a fair comparison of the obtained results.

Table 2. Parameters and search bounds used in LQR optimization

Parameter	Value
Optimization dimension	9 (8Q + 1R)
Optimized parameters	*q1, q2, q3, q4, q5, q6, q7, q8, r*
Lower bound	[1, 10, 10, 10, 1, 1, 1, 1, 0.1]
Upper bound	[500, 2000, 1500, 1000, 300, 300, 300, 300, 100]
Simulation time	10 s
Time step	0.01 s
Population size	25
Number of iterations	50
Number of runs	20

In addition to the common optimization settings presented in Table 2, each metaheuristic algorithm was implemented using its own characteristic control parameters. The initial candidate solutions were generated using a uniform random distribution within the specified search bounds. Candidate solutions exceeding the allowable limits during the update process were restricted to the corresponding lower or upper bounds. The algorithm-specific parameter settings used in the implementation are summarized in Table 3.

Table 3. Algorithm-specific parameter settings used in the optimization process

Algorithm	Algorithm-specific parameter settings
GA	Roulette-wheel selection; selection pressure ($\boldsymbol{\beta = 8}$); arithmetic crossover; crossover probability ($\boldsymbol{p_c = 0.8}$); mutation probability ($\boldsymbol{p_m = 0.3}$); mutation rate ($\boldsymbol{\mu = 0.1}$); Gaussian mutation standard deviation ($\boldsymbol{\sigma = 0.1}$(UB − LB))
PSO	Initial inertia weight ($\boldsymbol{w = 0.7}$); inertia damping coefficient ($\boldsymbol{w}_{\text{damp}} \boldsymbol{= 0.99}$); cognitive coefficient ($\boldsymbol{c_1 = 1.5}$); social coefficient ($\boldsymbol{c_2 = 1.5}$); maximum velocity ($\boldsymbol{V_{max} = 0.2}$(UB − LB))
GWO	Control parameter (*a*) linearly decreased from 2 to 0; random coefficients ($\boldsymbol{r_1, r_2} \in \boldsymbol{[0, 1]}$); search process guided by the ($\boldsymbol{\alpha}$), ($\boldsymbol{\beta}$), and ($\boldsymbol{\delta}$) wolves
WOA	Control parameter (*a*) linearly decreased from 2 to 0; auxiliary parameter ($\boldsymbol{a_2}$) decreased from (-1) to (-2); spiral constant ($\boldsymbol{b = 1}$); switching probability ($\boldsymbol{p = 0.5}$)
ACSA	Neural regulator ratio ($\boldsymbol{NH}_{\text{rate}} \boldsymbol{= 0.10}$); step factor ($\boldsymbol{S = 0.01}$); neural coefficients ($\boldsymbol{E_{a,n} = 1.8}$) and ($\boldsymbol{E_{s,n} = 0.002}$); hormonal coefficients ($\boldsymbol{E_{a,h} = 0.66}$) and ($\boldsymbol{E_{s,h} = 0.33}$)

4.2. Genetic Algorithm (GA)

Genetic Algorithm is a population-based optimization method inspired by natural selection and genetic inheritance mechanisms [14-15]. In the algorithm, each individual represents a candidate solution. In this study, each individual consists of the eight *Q* weighting coefficients and the scalar *R* control weight of the LQR controller.

In GA, the initial population is generated randomly, and the fitness value of each individual is calculated using the objective function. Then, selection, crossover, and mutation operations are applied to generate new individuals. The selection process increases the probability of transferring more successful individuals to the next generation, while crossover enables information exchange between existing good solutions. Mutation preserves diversity in the solution space and reduces the risk of the algorithm becoming trapped in a local optimum.

4.3. Particle Swarm Optimization (PSO)

Particle Swarm Optimization is a population-based optimization algorithm inspired by the collective movement behavior of bird flocks and fish schools [16-17]. In PSO, each particle represents a candidate solution in the search space, and the position of the particle corresponds to the parameter vector being optimized. In this study, the particle position z consists of the LQR weighting coefficients.

Each particle is updated by considering its own best position found so far and the best position found by the entire swarm. The velocity and position update equations of PSO are given in Equations 18-19 as follows:

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1 r_1 \left(p_i^k - z_i^k\right) + c_2 r_2 \left(g^k - z_i^k\right) \tag{18}$$

$$z_i^{k+1} = z_i^k + v_i^{k+1} \tag{19}$$

Here, $\boldsymbol{v_i}$ denotes the particle velocity, $\boldsymbol{z_i}$ denotes the particle position, $\boldsymbol{p_i}$ denotes the personal best position of the particle, and $\boldsymbol{g}$ denotes the global best position of the swarm. The parameter w is the inertia weight, c1 and c2 are the cognitive and social learning coefficients, and r1 and r2 are random numbers in the range [0,1].

4.4. Grey Wolf Optimization (GWO)

Grey Wolf Optimization is a metaheuristic optimization algorithm inspired by the social hierarchy and hunting strategy of grey wolves [18]. In the algorithm, the best solution is denoted as α, the second-best solution as β, the third-best solution as δ, and the remaining candidate solutions as ω. The search process is guided by the α, β, and δ solutions. In the original GWO study, this hierarchical structure and the encircling/attacking behaviors are modeled as the main search mechanisms [18-19].

In GWO, the encircling behavior is expressed by Equations 20-21 as follows:

$$D = \left|C \cdot X_p(k) - X(k)\right| \tag{20}$$

$$X(k+1) = X_p(k) - A \cdot D \tag{21}$$

Since the exact position of the prey is unknown, the three best candidate solutions, α, β, and δ, are assumed to guide the search process. Accordingly, the distance vectors between a search agent and the leading wolves are calculated as

$$D_j = \left|C_j \cdot X_j - X\right|, \quad j \in \{\alpha, \beta, \delta\} \tag{22}$$

Then, the candidate positions guided by each leading wolf are obtained using Equation (23).

$$X_j' = X_j - A_j \cdot D_j, \quad j \in \{\alpha, \beta, \delta\} \tag{23}$$

Finally, the updated position of each search agent is calculated by averaging these three candidate positions, as given in Equation (24).

$$X(k+1) = \frac{X_\alpha' + X_\beta' + X_\delta'}{3} \tag{24}$$

In this study, each grey wolf represents a candidate LQR parameter vector. Therefore, the position vector X is defined in Equation (25).

$$X = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7, q_8, r] \tag{25}$$

where q1–q8 are the diagonal elements of the Q weighting matrix and r is the scalar control weighting parameter. During the optimization process, each candidate vector is evaluated using the objective function defined for the closed-loop triple inverted pendulum system, and the best parameter set is selected according to the minimum cost value.

4.5. Whale Optimization Algorithm (WOA)

The Whale Optimization Algorithm is inspired by the hunting behavior of humpback whales, particularly the spiral hunting strategy known as the bubble-net method [20]. In WOA, candidate solutions represent whales, while the best solution represents the position of the prey. The algorithm performs the search in the solution space using encircling, spiral updating, and random search mechanisms. In the original WOA study, the algorithm was tested on mathematical benchmark problems and engineering design problems.

The encircling behavior is expressed by Equations 26-27 as follows:

$$D = \left|C \cdot X_p(k) - X(k)\right| \tag{26}$$

$$X(k+1) = X_p(k) - A \cdot D \tag{27}$$

Here, X_p represents the position of the prey or the best solution obtained so far, and X represents the current position of a whale. The coefficient vectors A and C are defined as follows (Equations 28-29):

$$A = 2ar_1 - a \tag{28}$$

$$C = 2r_2 \tag{29}$$

Here, the coefficient a is linearly decreased from 2 to 0 over the course of iterations, while r_1 and r_2 are random vectors in the range [0,1]. In this study, the vector X corresponds to the vector z containing the LQR weighting coefficients.

In addition to the encircling mechanism given in Equations (26)–(29), WOA also models the bubble-net attacking behavior of humpback whales using a spiral updating strategy. In this mechanism, the distance between the current whale and the best solution is calculated using Equation (30).

$$D' = \left|X_p(k) - X(k)\right| \tag{30}$$

Then, the spiral position update is performed according to Equation (31).

$$X(k+1) = D' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + X_p(k) \tag{31}$$

where b is a constant defining the shape of the logarithmic spiral, and l is a random number in the interval $[-1,1]$. During the optimization process, WOA switches between the encircling and spiral updating mechanisms according to a probability value p. In addition, when $|A| \geq 1$, the algorithm performs a random search around a randomly selected whale to enhance exploration. In this study, each whale represents a candidate LQR parameter vector z containing the eight Q weighting coefficients and the scalar R control weight.

4.6. Artificial Circulation System Algorithm (ACSA)

The Artificial Circulation System Algorithm is a new-generation metaheuristic optimization algorithm inspired by the biological circulatory system and its hormonal/neural regulation mechanisms [21]. ACSA employs a population-based search strategy and updates the positions of candidate solutions using a distinctive update mechanism. In the literature, the algorithm has been reported to provide competitive results in terms of global search, local search, and exploration–exploitation balance [21,22].

In this study, ACSA is used to determine the LQR weighting coefficients. Each candidate solution is considered as an individual/agent in the circulatory system, and each agent is represented by an eight-dimensional Q weighting vector and the scalar R control weight. The use of ACSA in this study is important for evaluating the performance of a new-generation optimization algorithm on a highly unstable control problem such as the triple inverted pendulum. To the best of the authors' knowledge, ACSA has not previously been investigated for LQR weight optimization in inverted pendulum systems. Therefore, its application to the triple inverted pendulum system constitutes one of the novel aspects of this study.

The general candidate solution structure for ACSA is given in Equation 32:

$$X_i = [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,D}], \qquad D = 9 \tag{32}$$

In this study, $D=9$, where the first eight dimensions correspond to the diagonal elements of the LQR Q matrix, and the ninth dimension corresponds to the scalar R control weight.

4.7. Objective Function and Performance Metrics

For a fair comparison of the optimization algorithms, the same objective function and performance metrics were used for all methods. Thus, the effectiveness of GA, PSO, GWO, WOA, and ACSA in determining the LQR parameters was evaluated under consistent and comparable conditions.

The objective function was defined to simultaneously consider the cart position error, pendulum angle errors, control energy, maximum angular deviation, settling time, and steady-state errors. In this way, the optimization process was directed not only toward reducing error values but also toward obtaining LQR parameters that yield low oscillation, fast settling, and reasonable control effort.

$$J = w_1 J_x + w_2 J_\theta + w_3 J_u + w_4 OS_\theta + w_5 T_s + w_6 E_x + w_7 E_\theta \tag{33}$$

Here, J_x denotes the integral of squared cart position error, J_θ represents the total squared error integral of the three pendulum angles, J_u denotes the squared integral of the control force, OS_θ is the total maximum angular deviation, T_s is the total settling time, E_x is the final cart position error, and E_θ is the final total angular error. The terms OS_θ and E_θ were calculated in degrees, and w_i represents the weighting coefficients used in the objective function.

In this study, the weighting coefficients were selected as $w_1 = 80,\ w_2 = 150,\ w_3 = 0.06,\ w_4 = 35,\ w_5 = 35,\ w_6 = 150, and\ w_7 = 25$. These coefficients were determined through preliminary simulation studies and trial-and-error analyses to balance the contributions of the objective-function terms with different numerical scales. Higher weights were assigned to the cart position error, pendulum angle error, and final cart position error to prioritize stabilization and position regulation, whereas a relatively small coefficient was assigned to the control-energy term to prevent it from dominating the objective function. The same weighting coefficients were used for all optimization algorithms to ensure a fair comparison.

In addition to the objective function used during optimization, several time-domain performance metrics were calculated to evaluate the closed-loop responses of the controllers. The Integral of Squared Error (ISE) measures the accumulated squared error over the simulation period and gives greater emphasis to large deviations. For a given error signal $e(t)$, ISE is defined as

$$ISE = \int_0^T e^2(t)\ dt \tag{34}$$

The Integral of Time-weighted Absolute Error (ITAE) penalizes errors that persist for a longer time and is therefore useful for evaluating the settling behavior of the system. ITAE is expressed by Equation (35) as follows:

$$ITAE = \int_0^T t|e(t)|\ dt \tag{35}$$

In addition to ISE and ITAE, the maximum absolute cart displacement, maximum control input, root-mean-square control input, and control energy were also considered. These metrics are given as (Equations 36-39)

$$Max.|x| = max\,|x(t)| \tag{36}$$

$$Umax = max\,|u(t)| \tag{37}$$

$$u_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2(t)\ dt} \tag{38}$$

$$E_u = \int_0^T u^2(t)\ dt \tag{39}$$

where $x(t)$ is the cart position, $u(t)$ is the control input, and T is the total simulation time. These metrics enable the controllers to be evaluated not only in terms of cart position regulation and angular stabilization, but also with respect to control effort and actuator requirements.

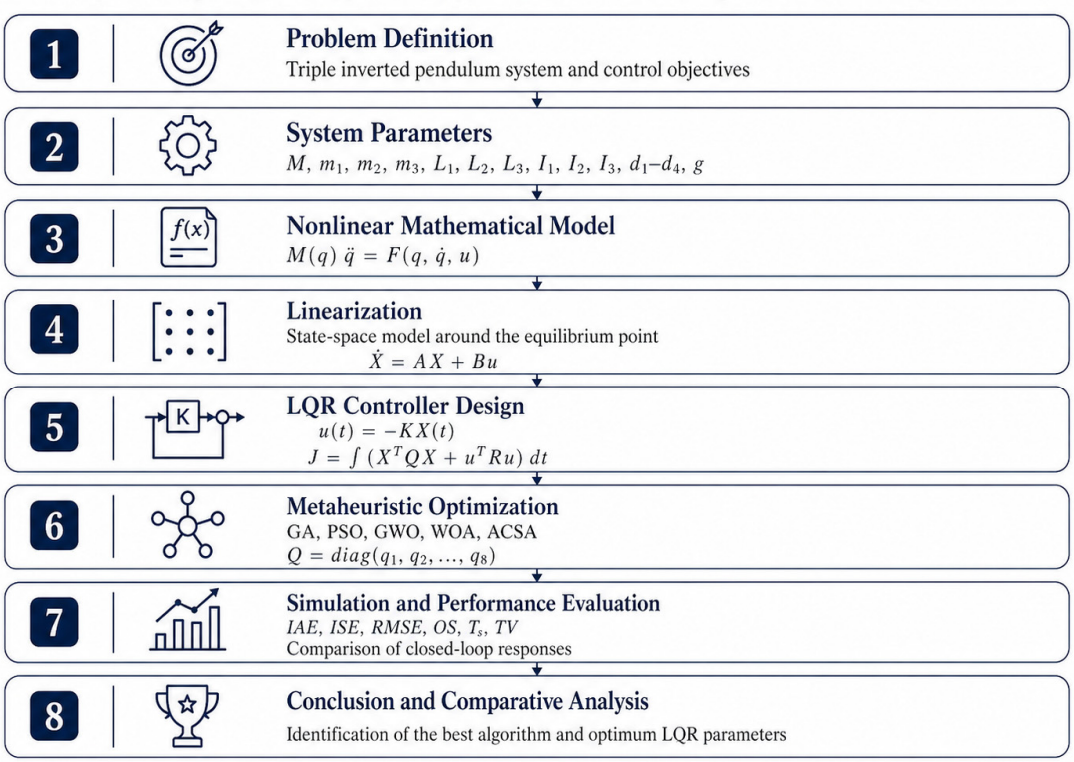


Figure 2. General workflow of the proposed LQR–MHA-based controller design

The overall workflow of the proposed LQR–MHA-based controller design is illustrated in Figure 2. As shown in the figure, the study consists of nonlinear modeling, linearization, LQR controller design, metaheuristic optimization, and performance evaluation stages.

5. SIMULATION RESULTS AND COMPARATIVE ANALYSIS

In this section, the closed-loop performances of classical LQR, GA-LQR, PSO-LQR, GWO-LQR, WOA-LQR, and ACSA-LQR controllers on the triple inverted pendulum system are compared. All simulations were carried out under identical initial conditions, system parameters, and simulation duration. The performance of the controllers was evaluated based on the responses of the three pendulum angles, cart position, and control force, while the numerical comparison was supported by performance metrics such as ISE, ITAE, maximum deviation, and control energy.

The cart position response presented in Figure 3 shows that the metaheuristic-optimized LQR controllers improve the transient behavior of the system compared with the classical LQR. The classical LQR exhibits a larger cart displacement and a slower return toward the equilibrium position. In contrast, the GA-LQR, PSO-LQR, GWO-LQR, WOA-LQR, and ACSA-LQR controllers reduce the cart displacement and provide a faster recovery. The responses of the optimized controllers are generally close to each other, with ACSA-LQR exhibiting the most favorable cart position response and the remaining optimized responses showing generally close behavior. Although a small positive overshoot is observed after the initial recovery, all optimized controllers converge smoothly to the equilibrium position without noticeable oscillations. Overall, the results indicate that optimizing the LQR weighting matrices improves cart position regulation and enhances the transient response of the system.

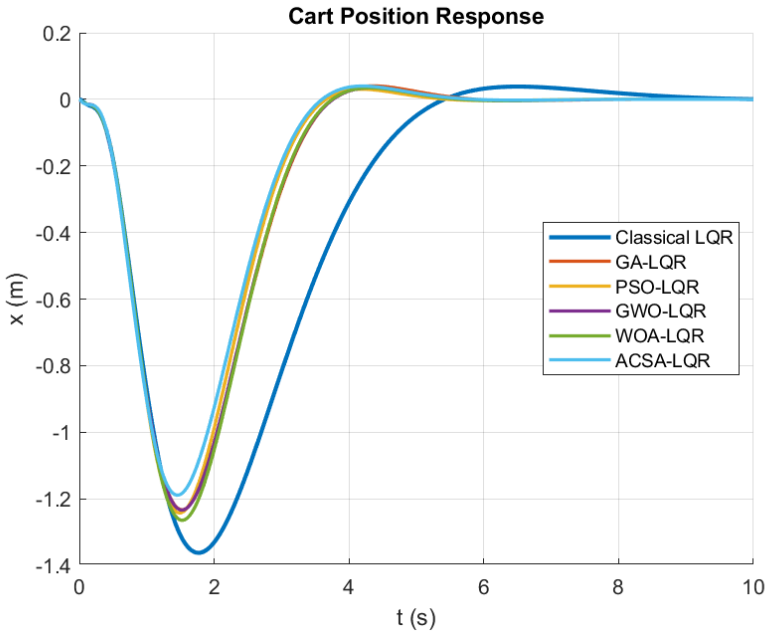


Figure 3. Cart position response

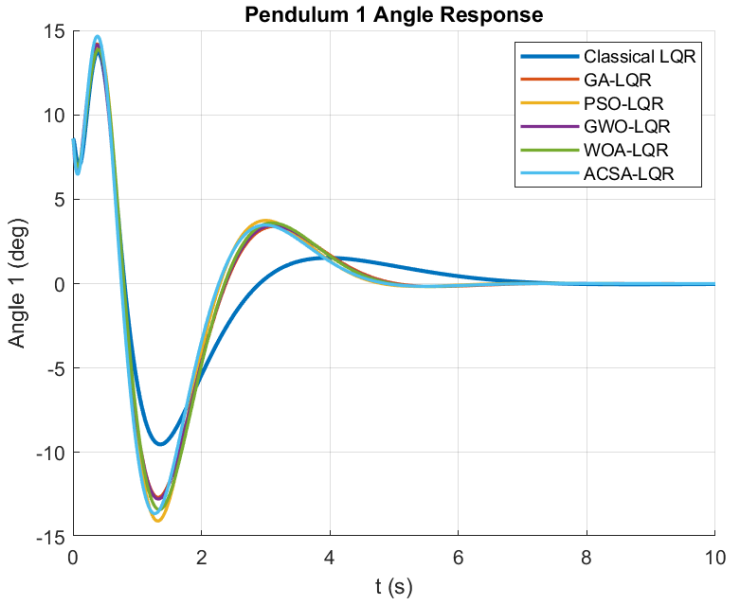


Figure 4. First pendulum angle response

As shown in Figure 4, all controllers successfully stabilize the first pendulum angle around the equilibrium position. The classical LQR exhibits a smoother but slower response, whereas the optimized LQR controllers provide faster convergence. Although GA-LQR, PSO-LQR, GWO-LQR, WOA-LQR, and ACSA-LQR produce slightly larger initial angular oscillations, their responses settle more rapidly. Overall, the optimized controllers improve the convergence speed while maintaining stable angle regulation.

The second and third pendulum angle responses are shown in Figure 5. In both cases, all controllers successfully stabilize the system around the equilibrium position. The optimized LQR controllers generally provide faster damping and shorter settling times compared with the classical LQR. Although minor differences are observed in the initial oscillations, all responses decay smoothly and remain within a limited angular range. Overall, the results indicate that metaheuristic-based LQR tuning improves the convergence characteristics of the second and third pendulum angles.

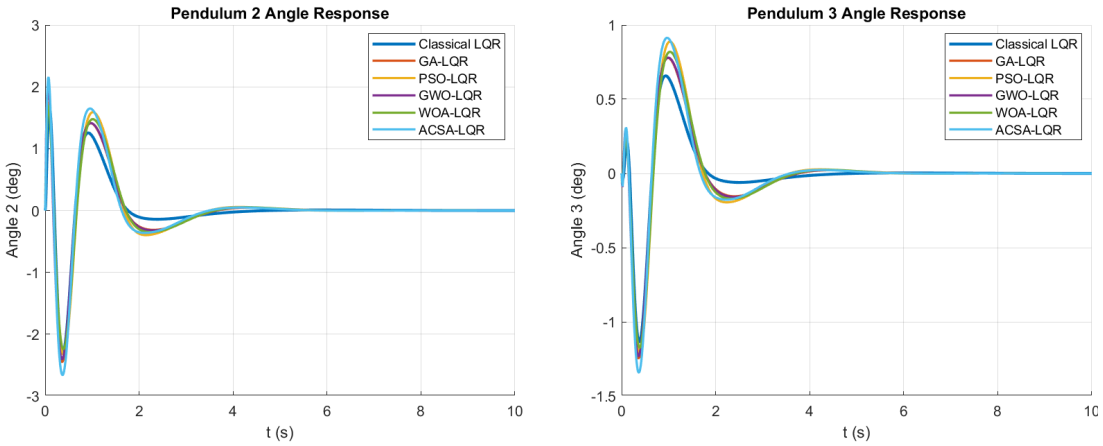


Figure 5. Responses of the second and third pendulum angles

Figure 6 presents the control input responses of the classical and optimized LQR controllers. All controllers generate a relatively high control action at the initial instant, followed by a rapidly damped force response that converges toward zero. The optimized LQR controllers exhibit slightly higher transient control amplitudes than the classical LQR, which is consistent with their faster stabilization behavior observed in the state responses. However, after the initial transient phase, all control signals remain smooth and settle without sustained oscillations. Overall, the results indicate that the metaheuristic-optimized LQR controllers achieve improved transient performance at the expense of a moderately increased initial control action.

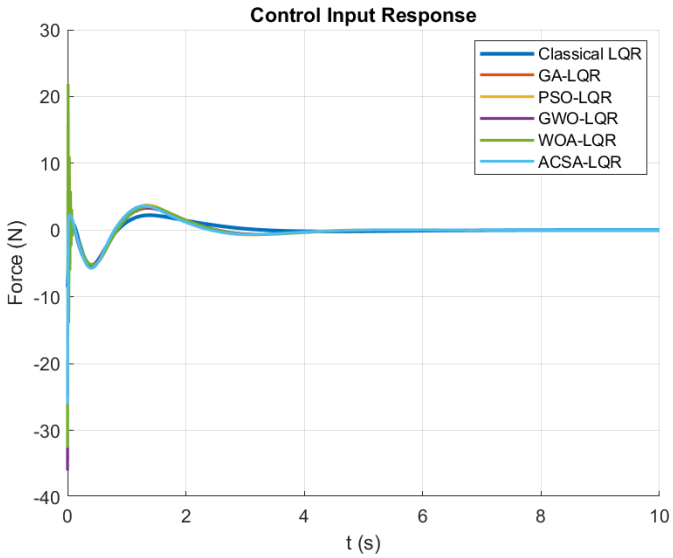


Figure 6. Control force response

The convergence curves in Figure 7 show the optimization behavior of GA, PSO, GWO, WOA, and ACSA over 20 independent runs. In the individual run plots, GA, PSO, GWO, and WOA generally exhibit a decreasing cost trend, indicating progressive improvement of the LQR weighting parameters during the optimization process. GWO exhibits relatively fast convergence and closely clustered final cost values, indicating more consistent performance across the independent runs. WOA also converges rapidly, although its final solutions show greater run-to-run variation. GA and PSO exhibit comparatively higher variability, while GA generally requires more iterations to approach its final cost level. ACSA reaches stable cost values within the early iterations; however, the considerable dispersion among its individual runs suggests greater sensitivity to the initial search conditions. The mean convergence curves show that WOA, PSO, and GWO achieve lower average final cost values, whereas GA converges more gradually and ACSA exhibits limited average improvement after the initial iterations.

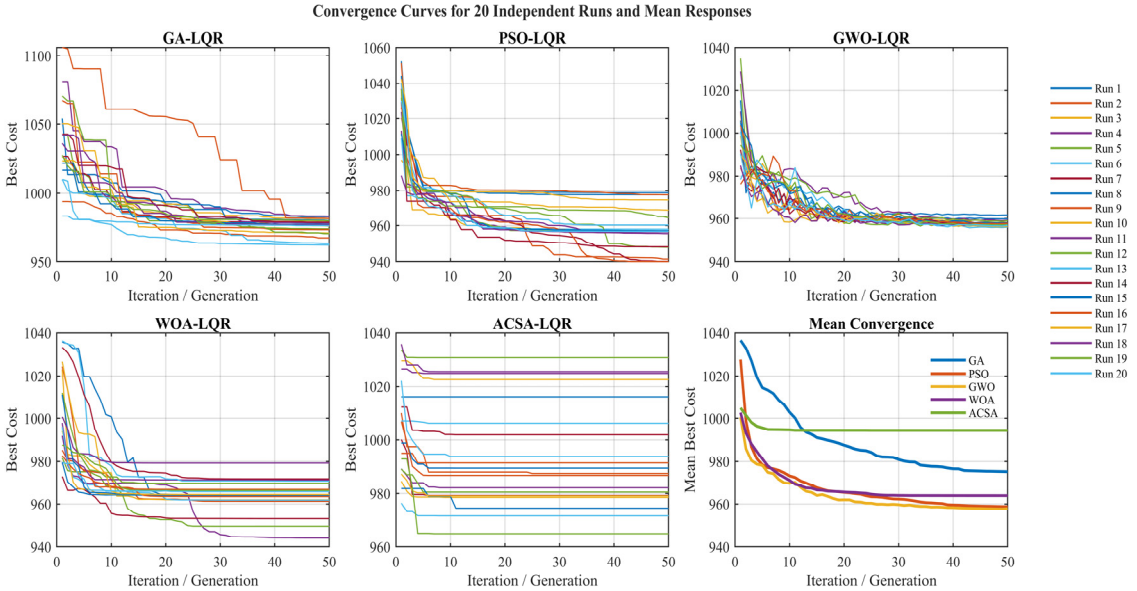


Figure 7. Convergence behavior of the metaheuristic algorithms over 20 independent runs and mean convergence responses

The main performance metrics of the controllers are presented in Table 4. The results demonstrate that metaheuristic-based optimization substantially enhances the cart position regulation performance of the LQR controller. Among all methods, ACSA-LQR achieves the lowest ISE_x, $ITAE_x$, and maximum absolute cart displacement, indicating the most effective cart position response. PSO-LQR also provides strong position regulation performance, while GA-LQR and GWO-LQR achieve competitive results across the evaluated position metrics. These improvements are accompanied by moderate increases in angular error and control effort, reflecting the expected trade-off between faster position recovery and control action. Among the optimized controllers, GA-LQR requires the lowest peak control input, RMS control input, and control energy, thereby offering an efficient balance between position regulation and control effort. Overall, the results confirm the effectiveness of metaheuristic optimization in improving LQR performance. ACSA-LQR provides the best cart position regulation, while GWO-LQR offers a competitive overall performance by achieving favorable position control with moderate control effort. GA-LQR, on the other hand, requires the lowest control effort among the optimized controllers.

Table 4. Performance comparison of classical LQR and metaheuristic-optimized LQR controllers

Controller	ISE_x	ISE0	$ITAE_x$	Max. |x|	Max. |u|	u_{RMS}	E_u
Classical LQR	3.3022	0.0482	8.0585	1.3624	8.5204	1.1980	14.0029
GA-LQR	1.9462	0.0635	3.9825	1.2330	22.3684	1.5144	20.4541
PSO-LQR	1.8607	0.0699	3.6317	1.2425	32.2746	1.9015	30.9848
GWO-LQR	1.9382	0.0639	3.9175	1.2340	36.0235	1.8277	26.9491
WOA-LQR	2.0061	0.0671	3.9592	1.2646	32.6038	1.9377	32.2693
ACSA-LQR	1.7097	0.0672	3.5088	1.1891	26.0289	1.6184	22.8301

Overall, the results demonstrate that metaheuristic-based optimization of the LQR weighting matrices improves the closed-loop performance of the triple inverted pendulum system, particularly in terms of cart position regulation. ACSA-LQR achieves the best cart position performance by providing the lowest ISE_x, $ITAE_x$, and maximum displacement values. However, the convergence analysis shows that ACSA exhibits considerable run-to-run variability, whereas GWO provides the most consistent optimization behavior and PSO and WOA show moderate repeatability. Therefore, ACSA-LQR should be interpreted as the most effective controller with respect to the evaluated closed-loop performance metrics, rather than as the most robust optimization method in terms of convergence consistency. These findings highlight the importance of evaluating controller performance together with optimization repeatability, angular response, control effort, and actuator limitations.

6. CONCLUSIONS

In this study, classical LQR and metaheuristic-optimized LQR approaches were comparatively investigated for the control of the triple inverted pendulum system. The simulation results show that optimizing the LQR weighting matrices substantially improves the closed-loop performance compared with the classical LQR. All optimized controllers reduce the cart position error and provide faster transient responses.

Among the optimized methods, ACSA-LQR achieves the best overall cart position regulation performance, with the lowest ISE_x, $ITAE_x$, and maximum absolute cart displacement values. This improvement is accompanied by increased angular error and control effort compared with the classical LQR, reflecting the trade-off between faster cart position recovery and control action. GWO-LQR provides a favorable overall balance between control performance and convergence consistency, while GA-LQR requires the lowest control effort among the optimized controllers. The convergence results further show that controller selection should not be based solely on the best final solution, since ACSA exhibits greater run-to-run variability, whereas GWO, WOA, and PSO demonstrate more consistent convergence trends.

Overall, the results indicate that metaheuristic-based tuning of LQR weighting matrices provides a systematic and effective alternative to trial-and-error-based LQR design. Nevertheless, the selection of the most suitable controller should consider position error, angular response, control effort, convergence consistency, and actuator requirements together. In this context, the proposed optimization-based LQR framework can be considered a practical and extensible approach for the control of high-order unstable systems such as the triple inverted pendulum.

7. ACKNOWLEDGMENT

This study was derived from the first author's master's thesis.

Declaration of generative AI and AI-assisted technologies in the manuscript preparation process

During the preparation of this work, the authors used ChatGPT solely for language editing and to improve readability and clarity. All scientific content, methodology, analyses, results, and conclusions were developed and verified by the authors, who take full responsibility for the final content of the published article.

8. REFERENCES

1. Wan, L.L., Lei, J. & Wu, H.X. (2014). Design of LQR controller for the inverted pendulum. *Advanced Materials Research, 1037*, 221-224.
2. Shehu, M.A., Ahmad, M.R., Shehu, A. & Alhassan, A.B. (2015). LQR, double-PID and pole placement stabilization and tracking control of single link inverted pendulum. *2015 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE)*, 218-223. IEEE.
3. Geylani, Ö. & Ata, B. (2026). Terminal and fast terminal sliding mode controls of a SISO coupled tank system: A comparative performance. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41*(1), 75-88.
4. Zhang, J. & Zhang, H. (2012). LQR self-adjusting based control for the planar double inverted pendulum. *Physics Procedia, 24*, 1669-1676.
5. Sehgal, S. & Tiwari, S. (2012). LQR control for stabilizing triple link inverted pendulum system. *2012 2nd International Conference on Power, Control and Embedded Systems (ICPCES)*. IEEE.
6. Abdullah, A.I., Alnema, Y.H.S. & Thanoon, M.A. (2022). Stabilization of three links inverted pendulum with cart based on genetic LQR approach. *Journal Européen des Systèmes Automatisés, 55*(1), 125-130.
7. Önen, Ü., Çakan, A. & İlhan, İ. (2019). Performance comparison of optimization algorithms in LQR controller design for a nonlinear system. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 27*(3), 1938-1953.
8. Bilgiç, H.H., Şen, M.A. & Kalyoncu, M. (2016). Tuning of LQR controller for an experimental inverted pendulum system based on The Bees Algorithm. *Journal of Vibroengineering, 18*(6), 3684-3694.

9. Ghoreishi, S.A. & Nekoui, M.A. (2012). Optimal weighting matrices design for LQR controller based on genetic algorithm and PSO. *Advanced Materials Research*, *433-440*, 7546-7553.

10. Xiong, X. & Wan, Z. (2010). The simulation of double inverted pendulum control based on particle swarm optimization LQR algorithm. *2010 IEEE International Conference on Software Engineering and Service Sciences*, 253-256. IEEE.

11. Shen, P. (2011). LQR control of double inverted-pendulum based on genetic algorithm. *2011 9th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, 386-389, IEEE.

12. Shen, P. (2014). Application of genetic algorithm optimization LQR weighting matrices control inverted pendulum. *Applied Mechanics and Materials, 543*, 1274-1277.

13. Abut, T. (2025). An inverted pendulum system control with fuzzy linear quadratic regulator method: Experimental validation. *Computers, Materials & Continua, 85*(2), 4023-4042.

14. Gen, M. & Lin, L. (2023). Genetic algorithms and their applications. In *Springer handbook of engineering statistics*, 635-674. London: Springer London.

15. Katoch, S., Chauhan, S.S. & Kumar, V. (2021). A review on genetic algorithm: past, present, and future. *Multimedia Tools and Applications*, *80*(5), 8091-8126.

16. Kennedy, J. & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks, 4*, 1942-1948. IEEE.

17. Türksoy, Ö. (2026). A novel energy-efficient optimization framework for AVR controllers in modern power systems. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *41*(2), 399-416.

18. Mirjalili, S., Mirjalili, S.M. & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in Engineering Software*, *69*, 46-61.

19. Bel, M. ve Demir, H.G. (2025). Çift rotorlu MIMO sistemi için sürü zekâsı tabanlı LQGI kontrolcü tasarımı. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, *41*(2), 631-646.

20. Mirjalili, S. & Lewis, A. (2016). The whale optimization algorithm. *Advances in Engineering Software*, *95*, 51-67.

21. Özcan, N., Utku, S. & Berber, T. (2025). Artificial circulation system algorithm: A novel bio-inspired algorithm. *Computer Modeling in Engineering & Sciences (CMES)*, *142*(1), 635-663.

22. Özcan, N. & Gürsoy-Demir, H. (2025). Levy flight-augmented artificial circulatory system algorithm for optimal PID tuning in DC motor control. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 156101.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

CFD Investigation of the Effect of Jet-Surface Distance on Thermal Performance in Inclined Jet Impingement Cooling

Haydar KEPEKÇİ [1,a]

[1]*Istanbul Gelisim University, Faculty of Engineering-Architecture, Department of Mechatronics Engineering, Istanbul, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0002-0037-8332*

Article Info
Received : 27.02.2026
Accepted : 16.09.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1898969

Corresponding Author
Haydar KEPEKÇİ
hikepekci@gelisim.edu.tr

Keywords
Jet impingement cooling
Inclination angle
Jet-to-wall spacing
Computational fluid dynamics
SST k–ω model

***How to cite:** KEPEKÇİ, H., (2026). CFD Investigation of the Effect of Jet-Surface Distance on Thermal Performance in Inclined Jet Impingement Cooling. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 679-692.*

ABSTRACT

This study numerically investigates the influence of geometric parameters on heat transfer in inclined jet impingement cooling. Twenty configurations were analyzed for H/D ratios of 3–6 and jet inclination angles of 0°–60° at Re = 15,000. Two-dimensional steady turbulent simulations were performed using the SST k–ω model within a CFD framework. Results show that both the H/D ratio and inclination angle significantly affect thermal performance. The average Nusselt number increased from 4.09–4.49 at H/D = 3 to 5.05–6.83 at H/D = 6. The heat transfer coefficient rose from 19.82 W/m²K at H/D = 3 and 0° to 33.08 W/m²K at H/D = 6 and 60°. Enhanced turbulence and flow mixing improved heat transfer. The most favorable thermal performance among the investigated cases was observed at H/D = 5–6 and inclination angles of 45°–60°, providing useful guidance for the geometric optimization of inclined jet impingement cooling systems.

Eğimli Jet Çarpma Soğutmasında Jet-Yüzey Mesafesinin Isıl Performans Üzerindeki Etkisinin CFD ile İncelenmesi

Makale Bilgileri
Geliş : 27.02.2026
Kabul : 16.09.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1898969

Sorumlu Yazar
Haydar KEPEKÇİ
hikepekci@gelisim.edu.tr

Anahtar Kelimeler
Jet çarpma soğutma
Eğim açısı
Jet-duvar mesafesi
Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
SST k–ω modeli

***Atıf şekli:** KEPEKÇİ, H., (2026). Eğimli Jet Çarpma Soğutmasında Jet-Yüzey Mesafesinin Isıl Performans Üzerindeki Etkisinin CFD ile İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 679-692.*

ÖZ

Bu çalışmada, eğimli jet çarpma soğutma akışlarında geometrik parametrelerin ısı transferine etkileri sayısal olarak incelenmiştir. H/D oranları 3–6 ve jet eğim açıları 0°–60° olan toplam 20 konfigürasyon, Re = 15.000 sabit tutularak analiz edilmiştir. Çözümler, iki boyutlu kararlı türbülanslı akış koşullarında SST k–ω modeli kullanılarak CFD ortamında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, H/D oranı ve eğim açısının ısı transferini belirgin biçimde etkilediğini göstermiştir. Ortalama Nusselt sayısı H/D = 3 için 4,09–4,49 aralığından H/D = 6 için 5,05–6,83 aralığına yükselmiştir. Isı transfer katsayısı ise H/D = 3 ve 0° için 19,82 W/m²K'den, H/D = 6 ve 60° için 33,08 W/m²K'ye çıkmıştır. Artan türbülans yoğunluğu ve akış karışımı ısı transferini iyileştirmiştir. İncelenen durumlar arasında en uygun termal performans, H/D = 5–6 ve 45°–60° eğim açılarında gözlemlenmiştir. Bu da eğimli jet püskürtmeli soğutma sistemlerinin geometrik optimizasyonu için faydalı bir kılavuz sunmaktadır.

1. INTRODUCTION

The reliable and efficient operation of systems with high heat flux requires an effective thermal management strategy. The increasing power densities of electronic components and rising performance expectations in engine and turbine systems have led to the limitations of traditional cooling methods [1]. In this context, jet impingement cooling is an advanced cooling technique that reduces the boundary layer thickness by directly impinging a high-speed flow onto the surface, resulting in significantly higher heat transfer coefficients than classical convective methods [2]. The basic principle of jet impingement cooling is to reduce the boundary layer thickness and increase the temperature difference between the surface and the fluid by directly impinging the high-speed flow on the target surface. This effect enables much higher local heat transfer coefficients (h) than in classical convective cooling or channel cooling systems [1]. Therefore, jet impingement cooling is widely preferred in various applications, including the cooling of gas turbine blades, thermal management of electronic circuits, cooling of automotive components, and temperature balancing in fuel cells [3].

However, heat transport performance in jet impingement systems depends not only on the jet speed or Reynolds number but also on the jet-to-wall distance (H/D ratio), jet inclination angle (θ), nozzle geometry, and surface conditions [4]. If the jet is too close to the surface, the flow impinges on the wall before it has had a chance to develop, leading to premature flow separation. Conversely, if the jet-to-wall distance is too large, the jet core weakens, and the flow energy dissipates, limiting heat transport. Similarly, when the jet impinges on the wall at an angle, the flow slides along the wall, creating secondary vortices and enhancing the turbulent surface mixing. Therefore, the combination of jet inclination angle and jet-to-wall distance plays a critical role in maximizing heat transfer within the investigated parameter range.

There are studies on this subject in literature. Xu et al. investigated the flow field and heat transfer characteristics of jets existing specially shaped orifices [5]. In this context, they classified and compared variable-diameter, irregular-geometry, and swirl nozzle types. They evaluated both experimental and CFD-based literature to examine the effects of different geometries on flow structure, turbulence intensity, and temperature distribution. According to the results obtained in the literature, the main reason for this performance increase is that specially shaped nozzles intensify the turbulence level by directly affecting the jet momentum, causing premature breakdown of the boundary layer at the target surface, and increasing the local heat transfer coefficient by creating high velocity gradients in the collision region. Consequently, they emphasized that specially shaped orifices provide significant improvements in both average heat transfer and temperature uniformity compared with conventional circular nozzles in jet-cooling applications. Alnak and Karabulut numerically demonstrated that surface geometry and jet inlet parameters are decisive in heat transfer in jet impingement applications, and that geometries such as inverted semicircles can significantly increase the average Nusselt number compared to flat surfaces [6]. Yang et al. investigated the flow structure and heat transfer characteristics of a jet impingement system with enlarged jet holes experimentally and numerically [7]. In their study, they aimed to evaluate the flow deflection behavior and its effects on heat transfer by varying the extended lengths of the jet holes (1.0d–2.5d) under flow conditions with Re = (1.0–3.0) × 10^4. As a result of their experimental and CFD-based analyses, they found that the enlarged jet holes increased the local heat transfer by approximately 36% and significantly homogenized the heat transfer distribution. They also stated that the enlarged jet configuration provided heat transfer that was more than 10% higher than that of the classical design at the same pumping power, and that this approach has high potential for future engineering applications.

Cademartori and colleagues investigated new cooling configurations for an industrial galvanizing line using the slot-jet impingement cooling technique [8]. In their research, they developed a CFD-based numerical model, validated it with experimental data, and investigated the effects of different jet numbers and jet-to-wall distances on heat transfer. The aim of their study was to understand the effects of slot-jet geometry on cooling uniformity and surface quality, and to propose an alternative design to the existing circular-jet system. Consequently, they concluded that increasing the jet-to-wall distance provides a more uniform temperature distribution, reduces mechanical stress, and results in higher product quality, making slot-jet impingement a more effective cooling strategy in galvanizing lines. Lin et al. systematically investigated the heat transfer behavior of a confined slot-jet impingement experimentally [9]. In their study, the researchers aimed to investigate the effects of different jet Reynolds numbers (Re = 190–1537) and jet-separation distance ratios (H/W = 1–8) on the stagnation and mean Nusselt numbers on the heated target surface. As a result of their investigation, they found that the heat transfer performance increased

significantly with increasing jet Reynolds number, but the effect of the separation distance was limited. In addition, they proposed two new empirical correlations for stagnation and the mean Nusselt number and found that these correlations agreed with the experimental data within 4.56% and 7.88%, respectively. Kaewchoothong et al. numerically investigated the effects of jet-target gap on flow and heat transfer in rotating impinging micro-slot jets [10]. In their study, the researchers aimed to evaluate the effect of jet-target distance on heat transfer performance using the k-ε turbulence model over the range Re = 5000–20000 and L/D ratios of 1–6. Their analysis showed that the average Nusselt number was 32.9–54.2% higher for the L/D = 1 configuration compared to other configurations, and this effect was due to the vortex density at high speed and direct flow impingement. They also stated that as the L/D ratio increases, jet flow acceleration and the TKE distribution at the wall decreases, resulting in lower Nu values and a wider stagnation zone. It has been experimentally shown by Keleş and Özmen that the heat transfer performance in jet impingement flows varies with parameters such as Reynolds number and jet-plate distance, and that increasing the Reynolds number increases the Nusselt number, while increasing the jet-plate distance reduces it [11].

Benmouhoub and Mataoui numerically investigated the turbulent flow and heat transfer behavior of a slotted jet impinging on a moving wall [12]. In their study, they aimed to evaluate the effects of different jet-to-wall velocity ratios (Rsj) and Reynolds numbers on the flow field and the Nusselt number using a CFD model based on the finite-volume method. Their analysis revealed that significant asymmetries emerge in the stagnation region with increasing Reynolds number and wall velocity, and that the average Nusselt number attains a maximum value around Rsj = 1.5. They also noted that at high velocity ratios, the flow becomes fully separated from the wall, leading to reduced heat transfer and a delay in the onset of the pressure-induced Coandă effect. Singh et al. numerically investigated the heat transfer behavior of jet impingement in a system comprising nine square jets [13]. In their study, they aimed to evaluate the effects of changes in Reynolds number (Re), inter-jet distance (S/D), and separation distance (H/D) on heat transfer by comparing different turbulence models (Standard, RNG, Realizable k-ε, and SST k-ω) with the RANS approach in the CFD-based Fluent software. As a result of their analysis, they found that the SST k-ω model showed the highest agreement with the experimental data, and the average heat transfer coefficient decreased from 210 to 193 W/m²K when the H/D ratio increased from 6 to 10. They also concluded that the heat transfer reached optimal values at S/D = 3, and that as the S/D ratio decreased, the jets merged into a single powerful jet. Shin et al. investigated the effects of channel height on flow and heat transfer in channel impingement cooling systems experimentally and numerically [14]. In their study, the researchers performed simulations using the SST k-ω turbulence model with water, covering Re = 2000–8600 and channel heights of 3-6 mm, with an array of 11 jets, each with a diameter of 0.8 mm. As a result of their investigation, they found that the average Nusselt number increases with the Reynolds number and decreases with the channel height. The developed correlation agrees with the experimental data within a 4.31% margin of error. They also stated that heat transfer in the stagnation region decreases with increasing channel height, whereas at high jet speeds, the wall-jet effect strengthens heat transfer between the stagnation zones. These findings provide important design guidance for optimizing channel impingement cooling configurations. Olsson et al. numerically investigated the heat transfer behavior of a slot jet impinging on a cylindrical tube placed on a solid surface in a semi-enclosed space [15]. In their CFD study, they employed the SST turbulence model to investigate the impact of various Reynolds numbers (23,000–100,000), jet-to-cylinder distances (H/D = 2–8), and surface curvature ratios (d/D = 0.29–1.14) on heat transfer. Their analysis revealed that both the average and stagnation Nusselt numbers increased with increasing Reynolds number and surface curvature, while the effect of the jet-to-cylinder distance was limited. They also found that heat transfer reached maximum values at the top of the cylinder and the exit region, and minimum values in the separation region. Additionally, they found that the correlations obtained could be used in industrial heat treatment designs.

Culun et al. numerically investigated the synergistic heat transfer behavior of multiple jet impingement [16]. In their study, they aimed to evaluate the effects of different jet geometries, arrangements, jet-to-jet spacing ratios (Xn/d), and jet-to-target distances (x/d) on heat transfer using ANSYS-CFX software. As a result of their analysis, they found that when Xn/d = 2, the jets behave like channel flow, in which case the stagnation effects decrease, and the heat transfer increases towards the channel exit. They also concluded that square jets provide a higher Nusselt number than circular jets, and that the jet arrangement shape is the weakest parameter for heat transfer. Kumar et al. numerically investigated the heat transfer and pressure drop behavior of a straight slot jet in a square channel using TiO_2/H_2O nanofluid [17]. In their study, they aimed to evaluate the thermohydraulic performance by varying the jet height (Hjet/Dhd = 0.3–0.6), aperture

ratio (Pspan/Dhd = 0.18–0.45), and flow rate (Pstream/Dhd = 0.88–1.30) parameters in the range Re = 8000–17000 using the RNG k-ε turbulence model. As a result of their analysis, they found that the TiO_2/H_2O nanofluid provided a significant improvement in heat transfer, with an approximately 6% higher Nusselt number and a 3% lower error rate compared to pure water. They also observed that the optimum configuration was achieved at Hjet/Dhd = 0.5, Pspan/Dhd = 0.3, and Pstream/Dhd = 0.97, at which point THPP reached its highest efficiency in the range of 0.97–1.04.

Molana and Banooni comprehensively reviewed heat transfer processes with liquid impingement jets and existing research in this area [18]. In their study, the researchers aimed to evaluate the effects of flow parameters and nanofluid additives on jet-cooling performance by compiling various Nusselt-number correlations. Their investigation revealed that the Nusselt number increases with increasing Reynolds number and nanoparticle volume fraction, while nanofluids significantly increase the pressure drop. They also noted that nanoparticle effects in multi-jet systems have not been adequately investigated, and that new models and experimental data are needed to develop this area. Uddin et al. conducted a comprehensive literature review examining the flow dynamics and heat transfer characteristics of single circular and slotted jets [19]. In their study, the researchers aimed to compare the effects of Reynolds number, nozzle geometry, and jet-target spacing on the distribution of the Nusselt number. Their review revealed that existing correlations have been developed specifically for circular jets and that sufficiently accurate models for slot-jet impingement have been lacking. Furthermore, they found that the formation of primary and secondary peaks in the Nusselt distribution is closely related to turbulent structures. They also emphasized that, given the limited number of high-accuracy LES/DNS studies, machine learning-based approaches could help improve understanding of these complex flow structures in the future.

Despite the considerable number of experimental and numerical studies, previous investigations have generally focused on individual parameters, such as nozzle geometry, Reynolds number, jet-to-wall distance, or a single jet inclination angle. Consequently, a comprehensive understanding of the combined influence of jet inclination angle and jet-to-wall distance on heat transport remains limited. Furthermore, the wide variation in Reynolds numbers among previous studies makes direct comparisons difficult. To address these limitations, the present study employs a CFD-based numerical approach to systematically investigate the combined effects of jet-to-wall distance (H/D = 3, 4, 5, and 6) and jet inclination angle (θ = 0°, 15°, 30°, 45°, and 60°) while maintaining a constant Reynolds number of 15,000. The Nusselt number, heat transfer coefficient (h), and temperature distributions are evaluated for all cases. In this context, the present study contributes to the literature by providing a systematic assessment of the combined influence of jet inclination angle and jet-to-wall distance on the thermal performance of inclined jet impingement systems.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Design

In this study, the effects of different jet-to-surface distances (H/D ratios) and inclination angles (θ) on heat transfer performance are numerically investigated. The designed model represents a two-dimensional rectangular channel configuration with a single circular jet exit. The jet exit is located at the top of the channel and directed towards the heated plane at the bottom surface. Analyses have been conducted by varying only the H/D ratio and the jet inclination angle while keeping the system geometry unchanged. Thus, the effects of the jet-to-wall distance and inlet jet inclination on the flow structure and heat transfer characteristics can be investigated independently of other geometric and operating parameters. The geometry was created using CAD-based modeling software and exported in STEP format, suitable for CFD analysis using the finite volume method. The jet exit diameter was kept constant (D = 30 mm), while the jet-to-heated wall distance was evaluated at four different levels (H/D = 3, 4, 5, and 6). For each H/D ratio, five different jet inclination angles (θ = 0°, 15°, 30°, 45°, and 60°) were imposed by changing only the inlet velocity direction while keeping the nozzle geometry unchanged. Therefore, the computational geometry remained identical across all inclination angles, and only the orientation of the inlet velocity vector was modified, yielding a total of 20 numerical cases. The heated surface length was kept constant at 120 mm, and the jet exit was positioned symmetrically with respect to the flow axis. In all models, the wall thickness and jet diameter remained constant, whereas only the inlet velocity vector orientation and the jet-to-wall distance were varied. This approach allows an isolated investigation of the effects of these parameters on

the flow regime, turbulence structure, and heat transfer coefficient. Figure 1 illustrates the computational domain together with the definition of the jet inclination angle (θ).

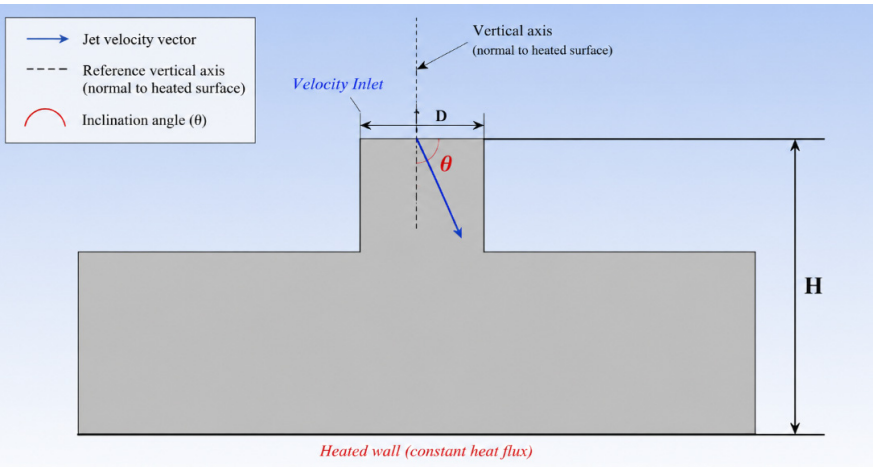


Figure 1. Schematic of the computational domain and definition of geometric parameters

2.2. Meshing

To improve the accuracy and stability of the numerical analyses, a detailed computational mesh was generated for all jet impingement geometries using the ANSYS Meshing module. The computational domain included the jet inlet, the target surface, and the surrounding walls. A structured quadrilateral mesh was employed to accurately capture the strong velocity and temperature gradients developed within the impingement region. Since quadrilateral elements can be preferentially aligned with the main flow direction, they provide improved numerical accuracy and better resolution of the boundary layer compared with unstructured meshes. In addition, local mesh refinement was applied in the jet inlet region and near the heated wall to accurately resolve the impinging jet and wall-jet flow. Inflation layers were generated along the heated wall to maintain wall y^+ values below 1, ensuring that the viscous sublayer was fully resolved. This near-wall resolution is recommended for the SST k–ω turbulence model because it enables accurate prediction of wall shear stress, boundary-layer development, and convective heat transfer without relying on wall functions. The representative computational mesh adopted in the present study is illustrated in Figure 2.

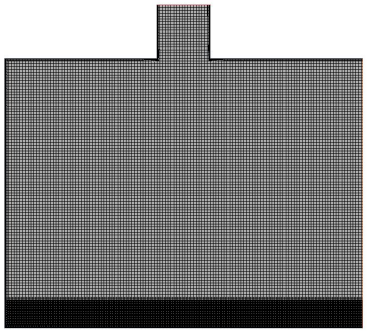


Figure 2. Computational mesh of the jet impingement domain

A mesh independence study was performed for the most critical operating condition (H/D = 6 and θ = 60°), where the highest heat transfer performance was obtained. Three different mesh densities were generated and compared using the average Nusselt number as the evaluation criterion. As presented in Table 1, the predicted average Nusselt number changed by less than 1% between the medium and fine meshes, indicating that the numerical solution was independent of the mesh density. Therefore, the fine mesh was selected for all subsequent simulations. Owing to variations in the jet-to-wall distance, the total number of mesh elements ranged from approximately 500,000 to 600,000 across the remaining cases, while maintaining the same meshing strategy.

Table 1. Mesh independence study performed for the H/D = 6 and θ = 60° configuration

Mesh	Number of elements	Average nusselt number	Relative difference (%)
Coarse	298,416	6.764	-
Medium	426,573	6.812	0.71
Fine	557,842	6.830	0.26

Element quality is one of the primary mesh quality metrics used to evaluate the geometric suitability of the computational mesh for numerical simulations. It is determined by geometric characteristics such as element shape, edge length distribution, internal angles, and node arrangement, all of which influence the accuracy and numerical stability of the solution [20]. In general, the element quality index ranges from 0 to 1, where values closer to 1 indicate elements with a geometry closer to the ideal shape. A high-quality mesh reduces discretization errors, thereby improving solution accuracy and numerical robustness. In the present study, more than 90% of the computational elements exhibited element quality values between 0.9 and 1.0, demonstrating the excellent geometric quality of the generated mesh. The detailed element quality distribution is summarized in Table 2, confirming that the adopted mesh is suitable for accurate and reliable CFD simulations.

Table 2. Element quality distribution of computational mesh

Element quality range	Number of elements	Percentage (%)
0.0 ----- 0.1	13,946	2.5
0.1 ----- 0.2	11,156	2.00
0.2 ----- 0.3	8,367	1.50
0.3 ----- 0.4	6,694	1.20
0.4 ----- 0.5	5,578	1.00
0.5 ----- 0.6	4,462	0.80
0.6 ----- 0.7	2,789	0.50
0.7 ----- 0.8	1,673	0.30
0.8 ----- 0.9	1,115	0.20
0.9 ----- 1.0	502,057	90.00

Skewness is one of the most widely used mesh quality metrics for evaluating the geometric distortion of computational mesh elements. It quantifies the deviation of an element from its ideal shape and directly influences the numerical accuracy, stability, and convergence of CFD simulations [21]. In general, skewness values range from 0 to 1, with lower values indicating higher-quality elements and lower geometric distortion. Conversely, high skewness values may increase discretization errors and reduce numerical accuracy. In the present study, the generated computational mesh exhibited an average skewness value of 0.13, indicating excellent mesh quality. Furthermore, the detailed skewness distribution presented in Table 3 shows that many of the elements possess skewness values below 0.2, confirming that the generated mesh provides excellent numerical quality for the present simulations.

Table 3. Skewness distribution of computational mesh

Skewness range	Number of elements	Percentage (%)
0.0 ----- 0.1	334,705	60.00
0.1 ----- 0.2	172,931	31.00
0.2 ----- 0.3	27,892	5.00
0.3 ----- 0.4	11,156	2.00
0.4 ----- 0.5	5,578	1.00
0.5 ----- 0.6	2,789	0.50
0.6 ----- 0.7	1,673	0.30
0.7 ----- 0.8	836	0.15
0.8 ----- 0.9	278	0.05
0.9 ----- 1.0	0	0.00

To further evaluate the near-wall mesh resolution, the area-weighted average wall y^+ on the heated surface was monitored throughout the numerical solution, as shown in Figure 3. The area-weighted average wall y^+ initially increased during the early iterations, reached a maximum value of approximately 0.32, and then gradually decreased as the solution converged. After 5000 iterations, the monitored wall y^+ stabilized at approximately 0.265, while the minimum value observed during the solution process was approximately

0.04. Since both the peak and converged wall y^+ values remained well below the SST k–ω turbulence model's recommended limit of $y < 1$, the adopted near-wall mesh provides sufficient resolution to accurately capture the viscous sublayer without relying on wall functions, thereby confirming its suitability for the present numerical simulations.

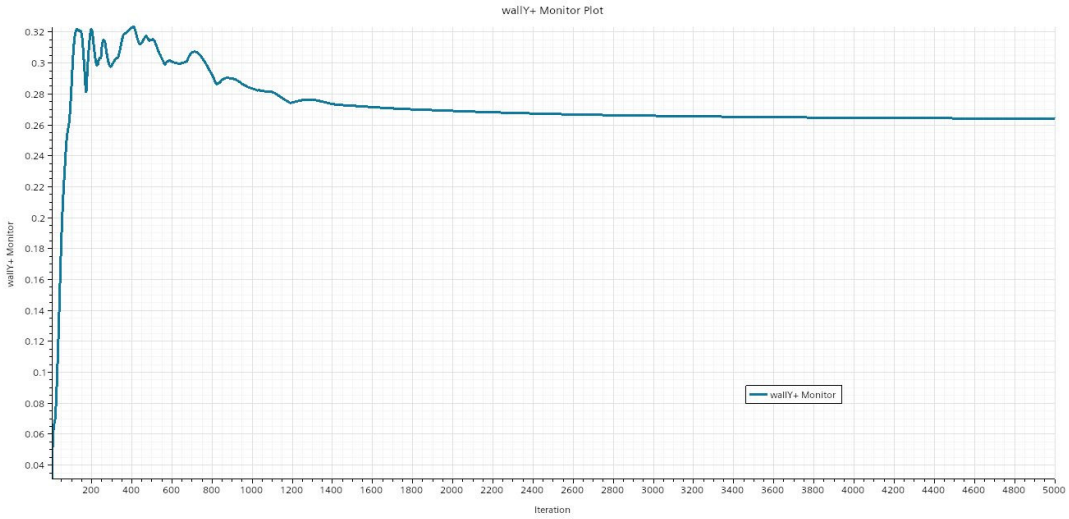


Figure 3. Convergence history of the area-weighted average wall y^+ on the heated surface (H/D = 6, θ = 60°)

2.3. CFD Modeling

In this study, numerical analyses have been performed using CFD software. Solutions have been implemented for steady-state flow conditions under pressure-based formulation. Air has been selected as the fluid medium, assumed to be incompressible and Newtonian. Radiation effects have been neglected, and only conduction and convection mechanisms have been considered. The SST k–ω turbulence model has been used in all analyses. This turbulence model has been selected because it combines the advantages of the standard k–ω model in the near-wall region with those of the k–ε model in the free-stream region. Jet impingement flows are characterized by strong adverse pressure gradients, flow separation, and complex near-wall turbulent structures. Therefore, the SST k–ω model has been widely recommended for accurately predicting wall-bounded flows and heat transfer characteristics. Furthermore, previous numerical studies [22,23] have demonstrated that the SST k–ω model provides better agreement with experimental data than commonly used eddy-viscosity models, including the Standard k–ε, RNG k–ε, and Realizable k–ε models.

The SST k–ω turbulence model solves two additional transport equations: one for the turbulent kinetic energy (k) and one for the specific dissipation rate (ω). The transport equations can be expressed as follows:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i}=P_k-\beta^*\rho k\omega+\frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\mu+\sigma_k\mu_t)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_i}=\alpha\frac{\omega}{k}P_k-\beta\rho\omega^2+\frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\mu+\sigma_\omega\mu_t)\frac{\partial\omega}{\partial x_i}\right]+2(1-F_1)\frac{\rho\sigma_{\omega^2}}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_i}\frac{\partial\omega}{\partial x_i} \quad (2)$$

where P_k is the turbulence production term, μ_t is the turbulent eddy viscosity, and F_1 is the blending function that combines the standard k–ω formulation near the wall with the k–ε formulation in the free-stream region. Owing to this blending strategy, the SST k–ω model provides improved predictions for adverse pressure gradients, flow separation, and near-wall heat transfer, making it particularly suitable for jet impingement cooling applications.

The wall convergence resolution for the turbulence solution has been provided with $y^+ < 1$. The SIMPLE algorithm has been employed for pressure-velocity coupling, and the Second-Order Upwind scheme has been utilized for discretization. Convergence criteria have been set at 10^{-6} for the energy equation and 10^{-4} for all other equations. Each simulation was continued until all residuals satisfied the prescribed

convergence criteria and the monitored thermal quantities (e.g., average Nusselt number) exhibited negligible variation with further iterations. The designed model specified the following boundary conditions: the jet exit as a velocity inlet, the exit as a pressure outlet, the target surface as a heat flux wall, and the other surfaces as adiabatic walls. Figure 4 illustrates the boundary conditions applied in the numerical model.

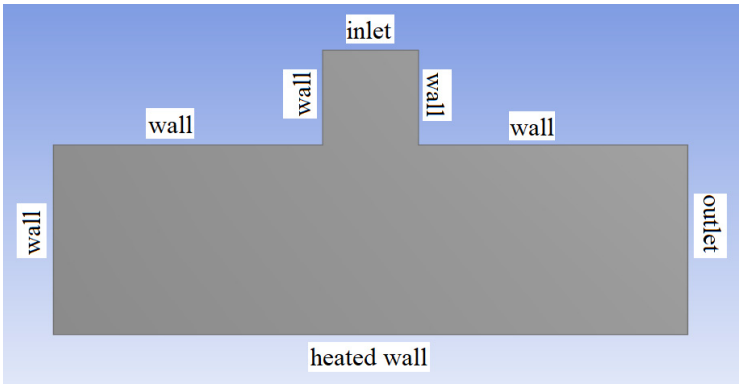


Figure 4. Boundary conditions of the computational domain

The heat flux applied to the target surface has been maintained at 500 W/m² in all analyses. The air inlet temperature has been assumed to be 300 K, and the target wall ambient temperature has been set to 300 K. A constant Reynolds number of 15,000 was selected throughout the study to isolate the effects of jet inclination angle and jet-to-wall distance on heat transfer performance without introducing additional flow-dependent variables. This Reynolds number lies within the turbulent flow regime commonly employed in previous experimental and numerical investigations of jet impingement cooling [24,25] and is representative of practical engineering applications requiring high convective heat transfer rates. The jet-wall distance has been varied at H/D = 3, 4, 5, and 6, and the jet inclination angle has been varied at 0°, 15°, 30°, 45°, and 60°. Thus, a total of 20 different analyses has been performed. The obtained solutions have been evaluated after thermal equilibrium has been reached, and for each case, the Nusselt number (Nu), heat transfer coefficient (h), and wall temperature distribution results have been calculated in the CFD-Post environment.

A two-dimensional steady-state formulation was adopted to enable a systematic comparison of different jet inclination angles and H/D ratios under identical operating conditions while maintaining a reasonable computational cost. Although jet impingement flow is inherently three-dimensional and unsteady, previous studies have shown that two-dimensional steady-state RANS simulations can provide reliable predictions of the overall flow characteristics and average heat transfer performance for single-jet impingement configurations. Therefore, the present approach was considered appropriate for evaluating the relative influence of the investigated geometric parameters rather than resolving transient three-dimensional flow structures.

Since a steady-state pressure-based solver was employed, the Courant–Friedrichs–Lewy (CFL) condition has not been applicable. Numerical stability has been assessed through the convergence of the residuals and the stabilization of the monitored solution variables.

3. RESULTS

3.1. Effects of H/D Ratio and Jet Inclination Angle on Nusselt Number and Heat Transfer Coefficient

The heat transfer coefficient (h) and Nusselt number (Nu) were compared for different jet-to-wall distance ratios (H/D) and jet inclination angles to investigate the influence of geometric parameters on heat transfer performance. Figure 5 illustrates the variation of the Nusselt number with H/D ratio for different jet inclination angles.

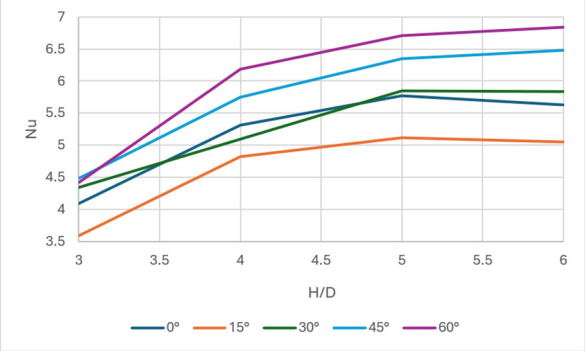


Figure 5. Nusselt number variation depending on H/D ratio for different jet inclination angles

The Nusselt number consistently increases with increasing H/D ratio for all jet inclination angles. At θ = 0°, the Nu value increases from 4.09 to 5.63 as the H/D ratio increases from 3 to 6, while at θ = 60°, it increases from 4.42 to 6.83. This behavior can be attributed to the increased jet development distance before impingement, which is likely to promote stronger turbulence and more effective momentum transfer over the heated surface.

Consequently, heat transfer is enhanced as the wall-jet region becomes more effective. Figure 4 also demonstrates the significant influence of jet inclination angle. Although only a limited improvement is observed at low inclination angles (0°–15°), the Nusselt number increases considerably at 45° and 60°. For example, at H/D = 5, the Nu value increases from 5.77 at θ = 0° to 6.70 at θ = 60°. This enhancement can be attributed to the stronger wall-parallel flow generated by the inclined jet, which is likely to enhance near-wall mixing and improve thermal transport. Overall, the combined increase in H/D ratio and jet inclination angle leads to a substantial improvement in heat transfer performance. The highest Nusselt number (Nu = 6.83) is obtained at H/D = 6 and θ = 60°, corresponding to an approximately 67% increase compared with the vertical jet configuration at H/D = 3. These findings are in good agreement with previous studies, which also reported that larger jet inclination angles and appropriate jet-to-wall distances improve the overall heat transfer performance of jet impingement cooling systems [26,27].

The variation of the Nusselt number with jet inclination angle for different H/D ratios is shown in Figure 6.

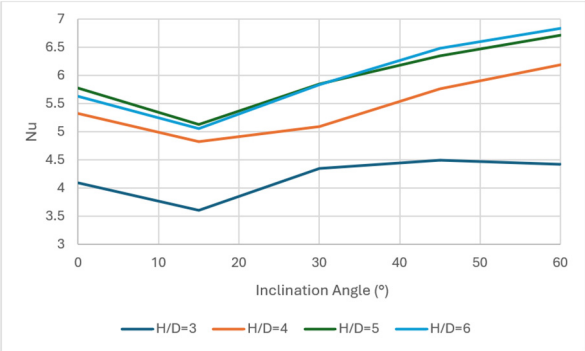


Figure 6. Effect of jet inclination angle on nusselt number for different H/D Ratios

Consistent with the results presented in Figure 4, the Nusselt number increases with increasing jet inclination angle, and this enhancement becomes more pronounced as the H/D ratio increases. At H/D = 3, the influence of jet inclination is relatively limited, with the Nu value increasing from 4.09 at θ = 0° to 4.48 at θ = 45°. In contrast, at H/D = 6, the Nusselt number increases from 5.63 at θ = 0° to 6.83 at θ = 60°, corresponding to an improvement of approximately 21%. These results indicate that the beneficial effect of jet inclination becomes more significant when the jet has sufficient distance to develop before impingement.

Moreover, the Nusselt numbers at H/D = 5 and 6 are very close, suggesting that a jet-to-wall distance of H/D = 5–6 provides the most favorable thermal performance among the investigated cases. At lower H/D

ratios, limited jet development before impingement limits overall heat transfer performance. Therefore, the combination of H/D = 5–6 and θ = 60° provides the most favorable thermal performance among the investigated cases. These observations are consistent with previous studies, which also reported that increasing the jet inclination angle enhances convective heat transfer under appropriate jet-to-wall spacing conditions [28,29].

Figure 7 shows the variation of the heat transfer coefficient (h) with jet inclination angle for different H/D ratios.

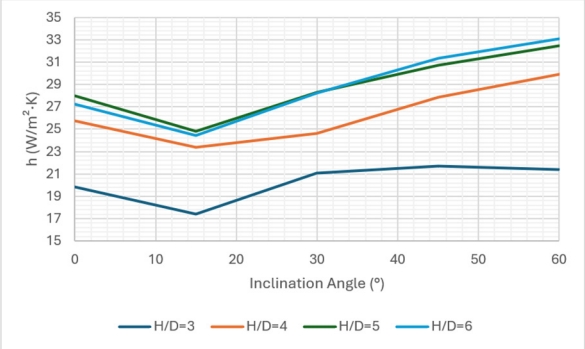


Figure 7. Effect of Jet Inclination Angle on Convective Heat Transfer Coefficient

Like the Nusselt number results, the heat transfer coefficient generally increases with increasing H/D ratio and jet inclination angle. At H/D = 3, the influence of jet inclination is limited, and the heat transfer coefficient decreases slightly from 19.8 W/m²K to 17.4 W/m²K as the inclination angle increases from 0° to 15°, followed by a gradual recovery at higher inclination angles. In contrast, the beneficial effect of jet inclination becomes more evident at larger H/D ratios. For H/D = 5, the heat transfer coefficient increases from 27.9 W/m²K to 32.46 W/m²K, while for H/D = 6 it increases from 27.72 W/m²K to 33.08 W/m²K as the inclination angle increases from 0° to 60°, corresponding to an improvement of approximately 18–20%. These trends are consistent with the Nusselt number results presented in Figs. 4 and 5, confirming that larger jet-to-wall distances enhance the effectiveness of jet inclination on heat transfer performance. Overall, the highest heat transfer coefficients are obtained at H/D = 5–6 and inclination angles of 45°–60°, indicating that these conditions provide the most favorable thermal performance among the investigated cases. The numerical results also agree with similar studies reported in the literature [28-30].

3.2. Temperature Distribution and Flow Structure Ana

Temperature contours obtained for different H/D ratios and jet inclination angles were analyzed to investigate the influence of flow structure on the surface temperature distribution. Figure 8 shows the temperature contours for H/D = 3 at jet inclination angles of θ = 0°, 15°, 30°, 45°, and 60°.

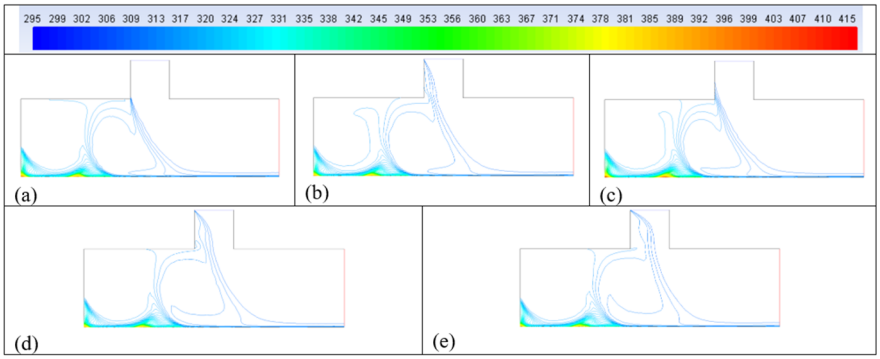


Figure 8. Temperature contours for H/D = 3 at different jet inclination angles: (a) θ = 0°, (b) θ = 15°, (c) θ = 30°, (d) θ = 45°, (e) θ = 60°

At this relatively small jet-to-wall distance, the jet impinges on the heated surface before it is fully developed, resulting in a highly localized thermal field. For the vertical jet (θ = 0°), the low-temperature

region is concentrated around the stagnation point, producing steep temperature gradients near the wall and limiting the cooling effect to a relatively small area. As the jet inclination angle increases to 15° and 30°, the cooled region gradually extends downstream, leading to a more uniform temperature distribution over the heated surface. Further increases in the inclination angle to 45° and 60° enlarge the thermal interaction region, resulting in a more homogeneous temperature field and lower wall temperatures. This behavior indicates that inclined jets improve the overall cooling performance by distributing the cooling effect over a larger surface area rather than concentrating it near the stagnation point. Consequently, the temperature contours support the Nusselt number results presented in the previous section, which showed that higher jet inclination angles provide superior overall heat transfer performance.

Figure 9 shows the temperature contours for H/D = 4 at jet inclination angles of θ = 0°, 15°, 30°, 45°, and 60°.

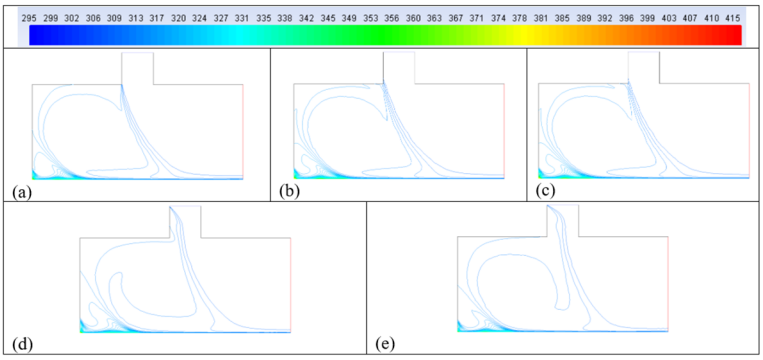


Figure 9. Temperature contours for H/D = 4 at different jet inclination angles: (a) θ = 0°, (b) θ = 15°, (c) θ = 30°, (d) θ = 45°, (e) θ = 60°

Compared with the H/D = 3 configuration, the increased jet-to-wall distance provides additional space for jet development before impingement, resulting in a more uniform temperature distribution over the heated surface. At θ = 0°, the cooling effect remains concentrated around the stagnation region, although the temperature gradients become less localized than those observed at H/D = 3. As the inclination angle increases, the cooled region progressively extends along the wall, producing a more homogeneous thermal field. The effect becomes more pronounced at θ = 45° and 60°, where the temperature contours cover a larger portion of the heated surface, indicating improved cooling uniformity. Overall, the H/D = 4 configuration provides a more balanced temperature distribution than H/D = 3, while the beneficial influence of jet inclination becomes increasingly evident. These observations are consistent with the improvements in Nusselt number reported in the previous section.

Figure 10 shows the temperature contours for H/D = 5 at jet inclination angles of θ = 0°, 15°, 30°, 45°, and 60°.

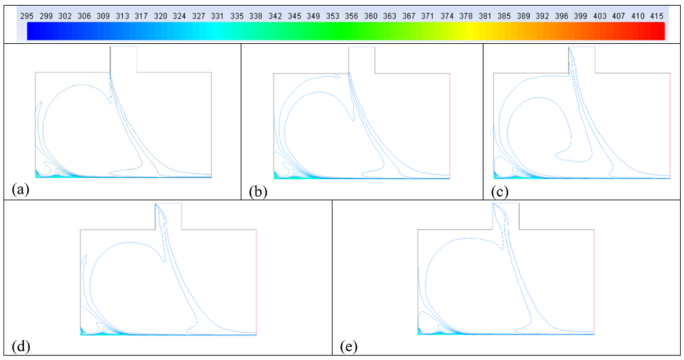


Figure 10. Temperature contours for H/D = 5 at different jet inclination angles: (a) θ = 0°, (b) θ = 15°, (c) θ = 30°, (d) θ = 45°, (e) θ = 60°

Compared with the H/D = 3 and H/D = 4 configurations, the temperature distribution becomes noticeably more uniform, indicating that the increased jet-to-wall distance allows the jet to impinge on the heated

surface under more favorable conditions. At θ = 0°, the cooling effect remains concentrated near the stagnation region, whereas increasing the inclination angle progressively enlarges the cooled area along the heated surface. The improvement becomes particularly evident at θ = 45° and 60°, where the temperature contours indicate lower wall temperatures and a more homogeneous thermal field. These observations are consistent with the increase in Nusselt number and heat transfer coefficient presented in the previous section. Overall, the H/D = 5 configuration represents one of the most favorable operating conditions, providing an effective balance between jet development and heat transfer performance.

Figure 11 shows the temperature contours for H/D = 6 at jet inclination angles of θ = 0°, 15°, 30°, 45°, and 60°.

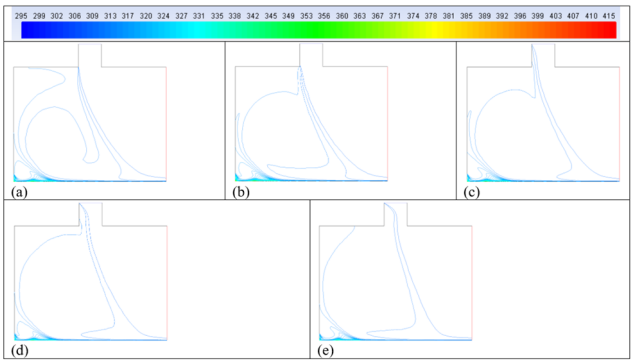


Figure 11. Temperature contours for H/D = 6 at different jet inclination angles: (a) θ = 0°, (b) θ = 15°, (c) θ = 30°, (d) θ = 45°, (e) θ = 60°

Among the investigated configurations, H/D = 6 exhibits the most uniform temperature distribution, indicating that a larger jet-to-wall distance provides additional jet development before impingement. At θ = 0°, the cooling effect remains concentrated near the stagnation region, whereas increasing the jet inclination angle progressively enlarges the cooled area along the heated surface. The temperature contours become increasingly uniform at θ = 45° and 60°, demonstrating that the inclined jet provides more effective cooling over a wider surface area. Consequently, the lowest wall temperatures are observed under these conditions, consistent with the highest Nusselt numbers and heat transfer coefficients reported in the previous section. Overall, the H/D = 6 configuration provides the most favorable thermal performance among the investigated cases, indicating that a sufficiently developed jet combined with a large inclination angle is associated with improved cooling effectiveness in the impingement system.

These findings are also consistent with recent numerical and experimental studies demonstrating that geometric configuration and airflow conditions play a decisive role in convective cooling performance and temperature uniformity [31,32].

4. CONCLUSIONS

In this study, the heat transport performance of jet impingement cooling systems has been investigated using CFD for different jet inclination angles (0°, 15°, 30°, 45°, and 60°) and jet-to-wall distances (H/D = 3, 4, 5, and 6). The numerical results indicate that both the H/D ratio and the jet inclination angle significantly influence heat transfer performance. As the H/D ratio increases, both the heat transfer coefficient (h) and the Nusselt number (Nu) increase. For H/D = 3, the average Nusselt number ranges from approximately 4.09 to 4.49, while the heat transfer coefficient varies between 19.82 and 21.05 W/m²K. In contrast, for H/D = 6, these values increase to approximately 5.05–6.83 and 24.44–33.08 W/m²K, respectively. This trend can be attributed to the longer jet development distance and the resulting improvement in flow development before impingement.

Similarly, increasing the jet inclination angle improves the predicted cooling performance. At a vertical jet configuration (0°), the lowest average Nusselt number is approximately 4.09, whereas the highest value (approximately 6.83) is obtained at an inclination angle of 60°, corresponding to an improvement of approximately 67%. The numerical results suggest that increasing the jet inclination angle is associated with stronger secondary vortical structures, thereby enhancing turbulent mixing near the heated surface and

improving convective heat transfer. According to the numerical results, the highest cooling performance is obtained at H/D = 5–6 and jet inclination angles of 45°–60°. The present study systematically evaluates the combined influence of the jet inclination angle and the H/D ratio while maintaining a constant Reynolds number, providing useful guidance for the design and optimization of inclined-jet impingement cooling systems.

Nevertheless, the present study has some limitations. The numerical analyses were performed using a two-dimensional steady-state CFD model to enable a systematic parametric investigation with reasonable computational cost. Although this approach cannot fully account for the inherently three-dimensional and unsteady characteristics of jet impingement flow, including complex vortex structures and transient turbulent fluctuations, it is considered appropriate for comparative evaluation of the investigated geometric parameters and provides meaningful insight into the thermal behavior of inclined jet impingement systems. In addition, no experimental validation was performed for the specific configuration investigated in the present study, which is a limitation of this work. Therefore, the numerical results should be interpreted within the scope of the adopted numerical model. Future studies will focus on experimental validation of the proposed configuration and on extending the model to three-dimensional transient simulations.

5. REFERENCES

1. Ekkad, S.V. & Singh, P. (2021). A modern review on jet impingement heat transfer methods. *Journal of Heat Transfer, 143*(6), 064001.
2. Wen, Y., Li, Y., Li, J. & Yu, X. (2023). Numerical investigation of jet impingement cooling with supercritical pressure carbon dioxide in a multi-layer cold plate during high heat flux. *Journal of Thermal Science, 32*, 237-253.
3. Dutta, S. & Singh, P. (2021). Opportunities in jet-impingement cooling for gas-turbine engines. *Energies, 14*(20), 6587.
4. Bu, X., Peng, L., Lin, G., Bai, L. & Wen, D. (2015). Experimental study of jet impingement heat transfer on a variable-curvature concave surface in a wing leading edge. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 90*, 92-101.
5. Xu, L., Hu, N., Lin, H., Xi, L., Li, Y. & Gao, J. (2024). A review of flow field and heat transfer characteristics of jet impingement from special-shaped holes. *Energies, 17*(1), 4510.
6. Alnak, D.E. ve Karabulut, K. (2021). Jet giriş genişliğinin ısı transferi ve akış yapısına olan etkisinin araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36*(2), 331-345.
7. Yang, X., Wu, H. & Feng, Z. (2022). Jet impingement heat transfer characteristics with variable extended jet holes under strong crossflow conditions. *Aerospace, 9*(1), 44.
8. Cademartori, S., Cravero, C., Marini, M. & Marsano, D. (2021). CFD simulation of the slot jet impingement heat transfer process and application to a temperature control system for galvanizing line of metal band. *Applied Sciences, 11*, 1149.
9. Lin, Z.H., Chou, Y.J. & Hung, Y.H. (1997). Heat transfer behaviors of a confined slot jet impingement. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 40*(5), 1095-1107.
10. Kaewchoothong, N., Nuntadusit, C. & Chatpun, S. (2025). Effect of jet-to-target spacing on flow and heat transfer characteristics for swirling impinging micro-slot jets. *Heat Transfer Engineering, 46*(1), 1371-1384.
11. Keleş, H. ve Özmen, Y. (2024). 45° eğimli ikincil jetlere sahip sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış çarpan jet dizilerinde ısı transferi karakteristiklerinin deneysel incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39*(4), 923-937.
12. Benmouhoub, D. & Mataoui, A. (2013). Turbulent heat transfer from a slot jet impinging on a flat plate. *Journal of Heat Transfer, 135*(1), 102201.
13. Singh, P., Grover, N.K., Agarwal, V., Sharma, S., Singh, J., Sadeghzadeh, M. & Issakhov, A. (2021). Computational fluid dynamics analysis of impingement heat transfer in an inline array of multiple jets. *Mathematical Problems in Engineering, 2021*(1), 6668942.
14. Shin, M.-S., Senguttuvan, S. & Kim, S.-M. (2021). Investigations of flow and heat transfer characteristics in a channel impingement cooling configuration with a single row of water jets. *Energies, 14*(1), 4327.
15. Olsson, E.E.M., Ahrné, L.M. & Tragardh, A.C. (2004). Heat transfer from a slot air jet impinging on a circular cylinder. *Journal of Food Engineering, 63*(1), 393-401.
16. Culun, P., Celik, N. & Pihtili, K. (2018). Effects of design parameters on a multi jet impinging heat transfer. *Alexandria Engineering Journal, 57*(1), 4255-4266.

17. Kumar, A., Maithani, R., Sharma, S., Srivastav, A., Alam, T., Siddiqui, M.I.H., Dobrotă, D., Cofaru, N.-F. & Ashraf, I. (2025). Impact of straight slot impingement jets on heat transfer enhancement of TiO_2/H_2O nanofluid flow in a square channel: CFD analysis. *Scientific Reports, 15*(1), 7728.
18. Molana, M. & Banooni, S. (2013). Investigation of heat transfer processes involved liquid impingement jets: A review. *Brazilian Journal of Chemical Engineering, 30*(3), 413-435.
19. Uddin, N., Kee, P.T.W. & Weigand, B. (2024). Heat transfer by jet impingement: A review of heat transfer correlations and high-fidelity simulations. *Applied Thermal Engineering, 257*(1), 124258.
20. Xie, J., Yang, X., Du, Y., Zhou, P., Cao, J., Zhou, Y. & Guan, Z. (2026). Voronoi-based high-quality mesh refinement for tetrahedral mesh generation. *Computers and Structures, 321*, 108114.
21. Kim, I., Chae, J. & You, D. (2025). Automatic mesh generation for optimal CFD of a blade passage using deep reinforcement learning. *Journal of Computational Physics, 541*, 114306.
22. Thakar, S.S., Nambiar, S., Chandavarkar, G.A. & Prabu, S.S. (2021). Investigation of impingement cooling on a heat sink using CFD simulation. *Materials Today: Proceedings, 46*(1), 8753-8760.
23. Steyn, G., Vermeulen, C. & Steyn, M. (2020). Multi-jet gas cooling of in-beam foils or specimens: CFD predictions of the convective heat-transfer coefficient. *EPJ Web of Conferences, 229*(1), 05002.
24. Peteinaris, A., Celik, A., Cukurel, B. & Terzis, A. (2026). Experimental validation of Reynolds–Prandtl scaling for confined gas jet impingement heat transfer. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 18*(7), 071007.
25. Wang, C., Luo, L., Wang, L. & Sundén, B. (2016). Effects of vortex generators on the jet impingement heat transfer at different cross-flow Reynolds numbers. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 96*(1), 278-286.
26. Lak, A., Çalışır, T. & Başkaya, Ş. (2020). Flow and heat transfer characteristics of inclined jet impingement on a flat plate. *Politechnic Journal, 23*(1), 697-706.
27. Wang, X.L., Yan, H.B., Lu, T.J., Song, S.J. & Kim, T. (2014). Heat transfer characteristics of an inclined impinging jet on a curved surface in crossflow. *Journal of Heat Transfer, 136*(1), 081702.
28. Ramezanpour, A., Shirvani, H. & Mirzaee, I. (2004). Heat transfer modelling of slot jet impinging on an inclined plate. *Heat Transfer VIII,* 485-494.
29. Karabey, A. & Yorulmaz, D. (2025). Experimental analysis of heat and flow characteristics on inclined and multiple impingement jet heat transfer using optimized heat sink. *Applied Sciences, 15*(1), 2657.
30. Akansu, Y.E., Sarioglu, M., Kuvvet, K. & Yavuz, T. (2008). Flow field and heat transfer characteristics in an oblique slot jet impinging on a flat plate. *International Communications in Heat and Mass Transfer, 35*(1), 873-880.
31. Karabulut, K. ve Alnak, Y. (2023). Kanaldaki jet akış sayısına bağlı olarak farklı model yüzeylerinden olan ısı transferi ve akış yapısının analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38*(1), 49-60.
32. Akkuş, F. ve Işık, M.Z. (2025). Boru destekli hava soğutmalı sistemlerin lityum-iyon batarya paketlerindeki termal performansının incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40*(4), 855-866.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

Assessing Sustainability of Oil Shale as an Energy Source: CO_2 Emissions and Energy Consumption Modeling (1970–2030)

Mehmet Akif KARTAL [1,a]

[1]*Bandırma Onyedi Eylül University, Distance Education Application and Research Center, Balıkesir, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0002-9156-8907*

Article Info
Received : 30.11.2025
Accepted : 16.09.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1833175

Corresponding Author
Mehmet Akif KARTAL
mkartal@bandirma.edu.tr

Keywords
Oil shale
Decarbonization
Energy consumption
CO_2 emission
Climate change

***How to cite:** KARTAL, M.A., (2026). Assessing Sustainability of Oil Shale as an Energy Source: CO_2 Emissions and Energy Consumption Modeling (1970–2030). Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 693-705.*

ABSTRACT

Oil shale, a fine-grained sedimentary rock rich in kerogen, contains the elements C, H, S, N, and O. The dataset used in this study—covering the 1970–2030 period—is based not on direct field measurements but on a scenario-based synthetic data modeling approach developed using thermodynamic parameters and calorific values. The study estimated CO_2 emissions, energy consumption, and environmental impacts associated with oil shale utilization in Turkey using linear regression, random forest, and support vector machine techniques. It is projected that a 10% increase in carbon content will raise CO_2 emissions from 20.13 Mt to 22.54 Mt by 2030. The models were evaluated using MAE and RMSE metrics; Linear Regression yielded the highest prediction accuracy (R^2 = 0.9999; MAE = 0.0304) due to the strong linear structure. The study aims to bridge the gap between data-driven modeling and energy efficiency policies.

Enerji Kaynağı Olarak Bitümlü Şeyllerin Sürdürülebilirliğinin Değerlendirilmesi: CO_2 Emisyonları ve Enerji Tüketimi Modellemesi (1970–2030)

Makale Bilgileri
Geliş : 30.11.2025
Kabul : 16.09.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1833175

Sorumlu Yazar
Mehmet Akif KARTAL
mkartal@bandirma.edu.tr

Anahtar Kelimeler
Yağlı şeyl
Dekarbonizasyon
Enerji tüketimi
CO2 emisyonu
İklim değişikliği

***Atıf şekli:** KARTAL, M.A., (2026). Enerji Kaynağı Olarak Bitümlü Şeyllerin Sürdürülebilirliğinin Değerlendirilmesi: CO_2 Emisyonları ve Enerji Tüketimi Modellemesi (1970–2030). Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 693-705.*

ÖZ

Kerojen açısından zengin, ince taneli bir tortul kaya olan bitümlü şeyl; C, H, S, N ve O elementlerini içerir. Bu çalışmada kullanılan 1970–2030 dönemi veri seti, doğrudan saha ölçümlerine değil, termodinamik parametreler ve ısı değerleriyle geliştirilen senaryo bazlı sentetik veri modellemesi yaklaşımına dayanır. Araştırmada doğrusal regresyon, rastgele orman ve destek vektör makineleri teknikleriyle Türkiye'deki bitümlü şist kullanımına bağlı CO_2 emisyonları, enerji tüketimi ve çevresel etkiler tahmin edilmiştir. Karbon içeriğindeki %10'luk artışın 2030'a kadar CO_2 emisyonlarını 20,13 Mt'den 22,54 Mt'ye çıkaracağı öngörülmektedir. Modeller MAE ve RMSE metrikleriyle değerlendirilmiş; güçlü doğrusal yapı sayesinde Lineer Regresyon en yüksek tahmin hassasiyetini (R^2 = 0,9999; MAE = 0,0304) sunmuştur. Çalışma, veri odaklı modelleme ile enerji verimliliği politikaları arasındaki boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

1. INTRODUCTION

The beginning of oil shale studies in the world dates back to the years before 1859, when oil was discovered commercially in America. Oil shale studies, which reached their maximum level in the 1800s, declined with the commercial discovery of crude oil in 1859. The work, which later gained momentum during the years of World War I, paused with the discovery of oil fields; During World War II, shale oil (synthetic oil) once again attracted attention, but studies stopped with the onset of the post-war oil price stability period [1-5].

With the oil crisis in the 1970s, oil shales came to the fore again and scientific and technological research increased in the same years. Due to the developing combustion technologies in the following years, the use of oil shales together with lignite in thermal power plants has come to the fore. Currently, the known oil shale reserves in the world are 411 billion tons. Some sources state that this amount is between 300-550 billion tons. Research has been conducted on compression, decomposition of kerogen, determination of characteristics and in-situ distillation techniques during the distillation of oil shale in Wyoming (USA), where the largest oil shale deposits are located. The formation and location of the oil shales in the Eosen aged Green River formation, which has an area of 42 700 km2, are very similar to the Beypazarı field in country of Turkey [6-9].

Oil shale work in Estonia started in 1916 and annual production reached 41 million tons in 1980. Oil shales, which appear in the literature as kukersite, are used in Estonia to obtain electricity, gas, liquefied hydrocarbons and other chemical products. 70% of the world oil shale production is carried out in Estonia. In the system called the Rohrbach Process, established in Dotternhausen in Germany, electrical energy is obtained by burning oil shale, and this energy is now used in the production of cement raw material from shales. Apart from these countries, important studies and projects are being carried out in Australia, China, Jordan, Morocco, Russian Federation and Thailand to bring oil shale into the economy and for energy production purposes [10-12].

Oil shale studies in Turkey started with the establishment of the MTA Institute, and the studies in the first years were continued for the purpose of acquire synthetic oil, as in the rest of the world. Surveys were performed in Beypazarı (Ankara), Seyitömer (Kütahya), Hatıldağ (Bolu), Himmetoğlu (Bolu), Mengen (Bolu), Ulukışla (Niğde), Bahçecik (Kocaeli), Burhaniye (Balıkesir), Beydili (Ankara), Dodurga (Çorum) Çeltek (Amasya) fields for this purpose, and as a result of these studies, 1.6 billion tons of oil shale reserves were determined in Turkey. In addition, prospection studies were performed in Boyalı (Kastamonu), Demirci (Manisa), Ilısılık (Çankırı) and Aspiras (Kastamonu) fields. Between 1986 and 1988, within the framework of the Turkish-German Technical Cooperation Agreement, detailed organic geochemistry-petrography studies and combustion tests were carried out in the Beypazarı, Seyitömer, Hatıldağ and Himmetoğlu fields [13-21].

A study by Bartis et al. (2005) examined the potential and policy issues of oil shale development in the United States. This report prepared by the RAND Corporation emphasized the strategic importance of oil shale reserves and examined the economic extractability of reserves, particularly those found in the Green River Formation in Wyoming. The study estimated that there were 60,000–80,000 million tons of oil equivalent extractable reserves in total, and also assessed the environmental impacts of the extraction processes. The findings revealed that oil shale extraction was environmentally unsustainable due to high water consumption and carbon emissions, and therefore argued that carbon capture technologies should be developed. Similarly, a report prepared for the USGS by Dyni (2006) examined the geological distribution of oil shale reserves worldwide in detail. The report confirmed that global reserves were around 411 billion tons, while reserves in Turkey had significant potential at 1.6 billion tons. However, Dyni's study highlighted that the environmental impacts of oil shale extraction should be carefully managed due to high CO2 emissions; this is directly related to our paper's CO2 emission estimates in Turkey [22-23]. Shah et al. (2024) analyzed the energy performance of waste heat recovery and utilization in oil shale mining processes. The study revealed that by addressing the high energy consumption and environmental impacts of oil shale mining, waste heat recovery systems can increase energy efficiency and reduce CO2 emissions [24]. A study on the potential of machine learning models to optimize renewable energy systems and contribute to Net Zero emission targets has provided significant improvements in energy forecasting, grid management and storage optimization. In the study, energy production and demand patterns were estimated using models such as Long Short-Term Memory (LSTM), Random Forest, Support Vector Machines

(SVMs) and ARIMA; the models were evaluated with Mean Absolute Error (MAE) and Root Mean Squared Error (RMSE) metrics. The findings revealed a 15% improvement in grid efficiency and a 10-20% increase in battery storage efficiency, while the Random Forest model was reported to provide the lowest prediction error by reducing MAE by approximately 8.5% [25-28].

1.1. CO2 Emission and Energy Consumption Calculations

Steps to Calculate the Carbon Dioxide Emission Formed When 1000 Tons of Oil Shale Material with an Average Calorific Value of 966 (kcal/kg) is Burned:

Determining the Carbon Factor:

- The average carbon factor for the oil shale is 26.3 kg CO2/GJ.

Converting Calorific Value from kcal/kg to GJ/kg:

- 1 kcal = 0.0041868 GJ.

Emission Calculation:

- Emission (kg CO2) = Amount Burned (kg) x Calorific Value (GJ/kg) x Carbon Factor (kg CO2/GJ)

Implementing the Steps with Example:

- Amount Burned = 1000 tons = 1000000 kg
- Calorific Value = 966 kcal/kg = 4.033 GJ/kg
- Carbon Factor = 26.3 kg CO2/GJ
- Emission (kg CO2) = 1000000 kg x 4.033 GJ/kg x 26.3 kg CO2/GJ = 107045900 kg CO2

In conclusion; When 1000 tons of oil shale with an average calorific value of 966 (kcal/kg) is burned, approximately 107045900 kg of carbon dioxide emissions occur.

The actual amount of emissions may vary depending on the coal content of the oil shale, combustion efficiency and other factors. For a more precise calculation, specific information such as coal content and combustion efficiency of the burned oil shale must be known. Burning oil shale releases large amounts of CO2 into the atmosphere. CO2 is one of the main causes of global warming. It is important to switch to renewable energy sources such as solar and wind energy to reduce greenhouse gas emissions.

1.2. Machine Learning and Linear Regression Methods for Predictive Modeling

In this study, machine learning approaches and linear regression techniques were used to predict carbon dioxide emissions, energy use and environmental consequences caused by bituminous shale consumption in Turkey in the period from 1970 to 2030. Thanks to its capacity to model complex and non-linear connections in large data sets, machine learning methods offer convenient tools for estimating environmental and energy parameters affected by many variables such as carbon content, combustion efficiency and bituminous shale usage patterns. Within the scope of the research, two basic machine learning methods, namely random forest and support vector machines, were applied in addition to linear regression to estimate CO2 emissions (Mt), global warming impact rate (%), gasoline and diesel consumption (Mt) and energy consumption (TWh). Random forest is an ensemble learning approach that builds a large number of decision trees during the training process and averages the predictions of these trees in regression problems. It is particularly good at processing high-dimensional data sets and capturing nonlinear relationships; Produces robust results by limiting overlearning through averaging across trees. In this study, the random forest model was introduced to estimate CO2 emissions and energy consumption based on historical bituminous shale usage figures, carbon content changes and other input variables, and demonstrated its predictive power by providing an 8.5 percent decrease in the average absolute error compared to basic methods. Support vector machines are a supervised learning algorithm that separates data points with the most appropriate hyperplane in high-dimensional space. In regression applications, known as support vector regression, it aims to keep the error within a certain tolerance while maximizing the margin between data points. Since it is relatively insensitive to outliers, it provides an advantage in modeling complex relationships in limited data sets. In the study, support vector regression was used to predict global warming impact percentage and fuel consumption indicators, and its ability to handle

nonlinear structures was utilized through kernel functions such as the radial basis function. Linear regression, on the other hand, is a statistical method that explains the relationship between the dependent variable and one or more independent variables by fitting a linear equation to the observed data; It assumes a linear relationship between predictors such as oil shale use and carbon content and target variables such as CO2 emissions. In this research, it was chosen as the basic model to estimate CO2 emissions and energy consumption, and it provided a simple and interpretable framework to understand bituminous shale usage trends. Model performances were evaluated using mean absolute error and root mean square error measures; These metrics quantified the mean forecast deviation and the root mean square error, respectively. As reported in previous studies on energy forecasting, the Random Forest model outperformed other methods and achieved reductions in MAE values compared to linear regression [25].

Carbon emission calculation tools:

Emission Calculation Tool (EPA) and World Resources Institute (WRI) Carbon Calculator can be used as carbon emission calculation tools.

Carbon emission reduction strategies:

- Increasing energy efficiency
- Switching to renewable energy sources
- Protecting forests and planting new forests
- Using carbon capture and storage Technologies

Table 1. Reserves and average calorific values of bituminous rocks in Turkey [29]

Field	**Reserve (1000 tons)**	**Average calorific value (kcal/kg)**
Çayırhan (Beypazarı, Ankara)	327648	966
Seyitömer (Kütahya)	122170	860
Hatıldağ (Göynük, Bolu)	359959	774
Himmetoğlu (Göynük, Bolu)	65968	1390
Ulukışla (Niğde)	130000	851
Mengen (Bolu)	50000	1000
Bahçecik (İzmit)	42000	1060
Burhaniye (Balıkesir)	15600	732
Beydili (Nallıhan, Ankara)	300000	800
Dodurga (Çorum)	138000	365
Çeltek (Amasya)	90000	541
Total	1641345	

Reducing the use of oil shale in Turkey and switching to more sustainable energy sources is an important step in reducing CO2 emissions and combating climate change.

Table 2. Oil shale reserves in the world, production in 1999 [30]

Countries	In place proven amount (Million tons of shale)	Winnable Proven reserve (Million tons of oil)	Average oil yield (Kg Oil/ton)	Estimated additional reserves (Million tons of oil)	Production 1999 (Million tons of oil)
ABD	3340000	60000-80000	57	62000	70000*
Australia	32400	1725	53	35260	5
Brazil	15360*	600*	70	9646	195
Estonia	1500	166*	167	150*	151
Morocco	12300	500	50-64	5400	841*
Israel	15360	600	62	450**	600*
Thailand	18668	810	50	958**	1277*
Jordan	40000	4000	100	20000	4000*

**Approximately 6.84 %of the "Place Proven Amount" value can be made by taking.*
***Up to 75 %of "Winnable Proven Reserve"*

Oil shale reserves of the countries, on-site proven amount, recoverable proven reserves, average oil yield and estimated additional reserve data according to their 1999 production are shown in Table 2.

2. RESULTS AND DISCUSSIONS

2.1. Oil Shale Usage Amounts and CO2 Emissions in Turkey (1970-2024)

In this table, oil shale usage amounts between 1970 and 2024 are modeled as an example of how CO2 emissions change over the years, based on 200000 tons, with 1970 as the reference year. As can be seen, oil shale usage amounts and CO2 emissions are increasing over time. This is a worrying trend for global warming and climate change. Although climate change and global warming are important issues, studies on their improvement are rapidly increasing [31-32].

Table 3. Oil shale and CO2 sample modeling by years

Year	Oil shale usage (Mt)	CO2 emission (Mt)	Year	Oil shale usage (Mt)	CO2 emission (Mt)
1970	0.1	0.3	2001	6.3	17.9
1971	0.2	0.6	2002	6.5	18.6
1972	0.3	0.9	2003	6.8	19.0
1973	0.4	1.0	2004	7.0	19.3
1974	0.5	2.0	2005	7.1	20.7
1975	0.6	2.6	2006	7.2	21.0
1976	0.7	3.0	2007	7.3	21.6
1977	0.8	3.4	2008	7.4	21.9
1978	0.9	4.0	2009	7.5	22.0
1979	0.10	4.5	2010	7.6	22.3
1980	2.0	5.0	2011	7.7	23.5
1981	2.2	5.5	2012	8.0	23.9
1982	2.4	6.0	2013	8.1	24.0
1983	2.6	7.0	2014	8.2	24.4
1984	3.0	8.0	2015	8.3	25.2
1985	3.2	9.0	2016	8.4	25.7
1986	3.4	10.0	2017	8.5	26.0
1987	3.6	10.5	2018	8.6	26.2
1988	3.8	11.0	2019	8.7	26.5
1989	4.0	11.5	2020	8.8	26.7
1990	4.3	12.0	2021	8.9	26.9
1991	4.6	13.0	2022	9.0	27.0
1992	4.9	13.5	2023	10.0	30.0
1993	5.0	14.0	2024	11.0	33.0
1994	5.2	14.5	2025	12.0	36.0
1995	5.4	15.0	2026	13.0	39.0
1996	5.6	15.4	2027	14.0	42.0
1997	5.8	15.8	2028	15.0	45.0
1998	6.0	16.5	2029	16.0	48.0
1999	6.1	17.0	2030	17.0	51.0
2000	6.2	17.3			

Source: Original data generated by the authors' simulation/model (model-generated estimates).

Oil shale and CO2 sample modeling by years (1970-2024) in the data shown in Table 3, the percentage of carbon content is important in terms of CO2 emissions and energy consumption. Therefore, in table 3, the carbon ratio in the oil shale is not constant and may vary depending on the type and source of oil shale used. Generally, the oil shale in Turkey contains between 40% and 60% carbon.

Carbon rates given as below:

- 1970-2000: %45
- 2001-2010: %50

- 2011-2020: %55
- 2021-2024: %60

Additionally, because data for some years were missing, statistical methods such as linear regression were used to make predictions. Dataset and variables shown in Table 4.

Table 4. Dataset and variables

Variable name	Role	Data type	Min	Max	Mean	Std. deviation
Year	Input	Integer / Continuous	1970	2030	2000.00	17.75
Oil shale usage	Input	Continuous (Mt)	0.10	17.00	6.13	4.05
CO2 emission	Input	Continuous (Mt)	0.30	51.00	18.10	12.13
Estimated CO2 emissions	**Output (Target)**	Continuous (Mt)	**3.30**	**54.10**	**21.12**	**12.13**
Estimated global warming impact percentage (%)	**Output (Target)**	Continuous (%)	**0.0165**	**0.2700**	**0.1052**	**0.0601**

Model Hyperparameters

1. Linear Regression (LR): Default Ordinary Least Squares (OLS) configuration.
2. Random Forest (RF):
   - n_estimators: 100 (Number of decision trees)
   - max_depth: 10 (Maximum tree depth)
   - random_state: 42
3. Support Vector Regression (SVR):
   - kernel: 'rbf' (Radial Basis Function)
   - C: 10.0 (Regularization parameter)
   - epsilon: 0.1 (Epsilon-tube width)

The calculated performance metrics are summarized below as Table 5:

Table 5. Comparative model performance metrics

Model	R^2 score	RMSE	MAE
Linear regression (LR)	0.9999	0.0386	0.0304
Random forest (RF)	0.9954	0.8910	0.5599
Support vector regression (SVR)	0.9914	1.2164	0,5509

Uncertainty Analysis

To evaluate the reliability and predictive stability of the developed machine learning models, the dispersion of prediction residuals was quantified using the standard deviation (SD) of errors:

- **Linear Regression (LR):** Exhibited an exceptionally low error standard deviation (SD = 0.0386 Mt, indicating negligible model uncertainty due to the strong analytical linearity inherent in the dataset.
- **Random Forest (RF):** Recorded an error standard deviation of SD = 0.8910 Mt. The uncertainty stems from the step-wise decision boundary limitations of tree-based ensembles during extrapolation.
- **Support Vector Regression (SVR):** Demonstrated the highest level of model uncertainty with SD = 1.2164 Mt, attributable to the kernel hyperparameter selection and the non-zero margin threshold (epsilon = 0.1).

Sensitivity Analysis

The relative influence of input variables (`Year`, `Oil shale Usage`, `CO2 Emission`) on the primary targets was evaluated via Pearson correlation analysis (r) and feature importance metrics:

- **CO2 Emission:** Identified as the most sensitive parameter affecting the primary target variable (r = 0.9999), indicating that variations in base emission rates dominate the model output response.
- **Oil Shale Usage:** Showed the second highest sensitivity impact (r = 0.9972), reflecting its direct thermodynamic link to total carbon release during combustion processes.
- **Year:** Exhibited a strong positive linear correlation (r = 0.9639), representing the cumulative temporal trend in environmental impact indicators over time.

2.2. Trend Analysis and Forecast Results

Oil shale Usage (Mt), CO2 Emissions (Mt), Estimated CO2 Emissions (Mt), Estimated Global Warming Impact Percentage (%) for the period extending from 1970 to 2030 are shown in Table 6.

Table 6. Oil shale and CO2 emissions modeling

Year	Oil shale usage (Mt)	CO2 emissions (Mt)	Estimated CO2 emissions (Mt)	Estimated global warming impact percentage (%)
1970	0.1	0.3	-	-
1971	0.2	0.6	-	-
1972	0.3	0.9	-	-
...	...	...	...	...
2022	9.0	27.0	30.0	0.15
2023	10.0	30.0	33.0	0.16
2024	11.0	33.0	36.0	0.18
2025	12.0	36.0	39.0	0.19
2026	13.0	39.0	42.0	0.21
2027	14.0	42.0	45.0	0.22
2028	15.0	45.0	48.0	0.24
2029	16.0	48.0	51.0	0.25
2030	17.0	51.0	54.0	0.27

Source: Original data generated by the authors' simulation/model.

Table 6 shows oil shale use, CO2 emissions, estimated CO2 emissions and global warming impact percentage from 1970 to 2030. Oil shale use and CO2 emissions have increased steadily from 1970 to 2030. In 2030, oil shale usage is estimated to be 6.1 Mt and CO2 emissions to be 20.13 Mt. The result shows that oil shale use makes a significant contribution to CO2 emissions.

If the carbon content in the Oil Shale increases by 10%, the Oil Shale Usage (Mt), CO2 Emissions (Mt), Estimated CO2 Emissions (Mt), Estimated Global Warming Impact Percentage (%) in the period from 1970 to 2030 are shown in Table 7.

Table 7. 10% increase in oil shale carbon content and its effect on CO2 emission

Year	Oil shale usage (Mt)	CO2 emissions (Mt)	Estimated CO2 emissions (Mt)	Estimated global warming impact percentage (%)
1970	0.1	0.33	0.36	-
1971	0.2	0.66	0.72	-
1972	0.3	0.99	1.08	-
...	...	...	...	...
2022	9.0	29.7	32.7	0.16
2023	10.0	33.0	36.3	0.18
2024	11.0	36.3	39.6	0.20
2025	12.0	39.6	42.9	0.21
2026	13.0	42.9	46.2	0.23
2027	14.0	46.2	49.5	0.24
2028	15.0	49.5	52.8	0.26
2029	16.0	52.8	56.1	0.28
2030	17.0	56.1	59.4	0.29

Source: Original data generated by the authors' simulation/model.

Table 7 shows CO2 emissions and global warming impact percentage from 1970 to 2030 if the carbon content in the oil shale increases by 10%. If the carbon content in the oil shale increases by 10%, it is predicted that CO2 emissions will reach 22.54 Mt in 2030 and the global warming impact percentage will increase by 0.11%. Table 7 shows that the carbon ratio in the oil shale has a significant effect on CO2 emissions.

In the analysis in Table 8, for the period from 1970 to 2030, Oil shale Usage (Mt), CO2 Emissions (Mt), Estimated CO2 Emissions (Mt), Estimated Global Warming Impact Percentage (%) and Estimated Gasoline Consumption (Mt), Estimated Diesel Consumption (Mt) and Estimated Energy Consumption (TWh) are shown in there.

Table 8. Oil shale and energy consumption

Year	Oil shale usage (Mt)	CO2 emissions (Mt)	Estimated CO2 emissions (Mt)	Estimated global warming impact percentage (%)	Estimated gasoline consumption (Mt)	Estimated diesel consumption (Mt)	Estimated energy consumption (TWh)
1970	0.1	0.3	-	-	250	100	12
1971	0.2	0.6	-	-	260	110	12.5
1972	0.3	0.9	-	-	270	120	13
...	...	...	...	...	...	...	...
2022	9.0	27.0	30.0	0.15	380	280	18
2023	10.0	30.0	33.0	0.16	390	290	18.5
2024	11.0	33.0	36.0	0.18	400	300	19
2025	12.0	36.0	39.0	0.19	410	310	19.5
2026	13.0	39.0	42.0	0.21	420	320	20
2027	14.0	42.0	45.0	0.22	430	330	20.5
2028	15.0	45.0	48.0	0.24	440	340	21
2029	16.0	48.0	51.0	0.25	450	350	21.5
2030	17.0	51.0	54.0	0.27	460	360	22

Source: Original data generated by the authors' simulation/model.

Table 8 shows oil shale usage, CO2 emissions, estimated CO2 emissions, global warming impact percentage, estimated gasoline and diesel consumption, and estimated energy consumption from 1970 to 2030. As oil shale usage increases, CO2 emissions, gasoline and diesel consumption, and energy consumption also increase. Table 8 also shows that oil shale use has a significant impact on energy consumption and CO2 emissions.

In the model analysis; oil shale usage (Mt), CO2 emissions (Mt), estimated CO2 emissions (Mt), estimated global warming ımpact percentage (%) and estimated gasoline consumption (Mt), estimated diesel consumption (Mt) and estimated energy consumption (Twh) results for the period extending from 1970 to 2030; it is obtained as a result of a 10% increase in the carbon content in the oil shale and is shown in Table 9.

Table 9. 10% Increase in oil shale carbon content and its effect on energy consumption-CO2 emission

Year	Oil shale usage (Mt)	CO2 emissions (Mt)	Estimated CO2 emissions (Mt)	Estimated global warming impact percentage (%)	Estimated gasoline consumption (Mt)	Estimated diesel consumption (Mt)	Estimated energy consumption (TWh)
1970	0.1	0.33	0.36	0.0018	250	100	12.1
1971	0.2	0.66	0.72	0.0035	260	110	12.6
1972	0.3	0.99	01.08	0.0053	270	120	13.1
1973	0.4	1.32	1.45	0.0071	280	130	13.6
1974	0.5	1.65	1.82	0.0089	290	140	14.1
1975	0.6	1.98	2.19	0.0107	300	150	14.6
1976	0.7	2.31	2.56	0.0125	310	160	15.1
1977	0.8	2.64	2.93	0.0143	320	170	15.6
1978	0.9	2.97	3.30	0.0161	330	180	16.1

Table 9. *Continued*

Year	Oil shale usage (Mt)	CO2 emissions (Mt)	Estimated CO2 emissions (Mt)	Estimated global warming impact percentage (%)	Estimated gasoline consumption (Mt)	Estimated diesel consumption (Mt)	Estimated energy consumption (TWh)
1979	1.0	3.30	3.67	0.0179	340	190	16.6
1980	1.1	3.63	4.04	0.0197	350	200	17.1
1981	1.2	3.96	4.41	0.0215	360	210	17.6
1982	1.3	4.29	4.78	0.0233	370	220	18.1
1983	1.4	4.62	5.15	0.0251	380	230	18.6
1984	1.5	4.95	5.52	0.0269	390	240	19.1
1985	1.6	5.28	5.89	0.0287	400	250	19.6
1986	1.7	5.61	6.26	0.0305	410	260	20.1
1987	1.8	5.94	6.63	0.0323	420	270	20.6
1988	1.9	6.27	7.00	0.0342	430	280	21.1
1989	2.0	6.60	7.37	0.0360	440	290	21.6
1990	2.1	6.93	7.74	0.0378	450	300	22.1
1991	2.2	7.26	8.11	0.0396	460	310	22.6
1992	2.3	7.59	8.48	0.0414	470	320	23.1
1993	2.4	7.92	8.85	0.0432	480	330	23.6
1994	2.5	8.25	9.22	0.0450	490	340	24.1
1995	2.6	8.58	9.59	0.0468	500	350	24.6
1996	2.7	8.91	9.96	0.0486	510	360	25.1
1997	2.8	9.24	10.33	0.0504	520	370	25.6
1998	2.9	9.57	10.70	0.0522	530	380	26.1
1999	3.0	9.90	11.07	0.0540	540	390	26.6
2000	3.1	10.23	11.44	0.0558	550	400	27.1
2001	3.2	10.56	11.81	0.0576	560	410	27.6
2002	3.3	10.89	12.18	0.0594	570	420	28.1
2003	3.4	11.22	12.55	0.0612	580	430	28.6
2004	3.5	11.55	12.92	0.0630	590	440	29.1
2005	3.6	11.88	13.29	0.0648	600	450	29.6
2006	3.7	12.21	13.66	0.0666	610	460	30.1
2007	3.8	12.54	14.03	0.0684	620	470	30.6
2008	3.9	12.87	14.40	0.0702	620	480	31.1
2009	4.0	13.20	14.77	0.0720	630	490	31.6
2010	4.1	13.53	15.14	0.0738	640	500	32.1
2011	4.2	13.86	15.51	0.0757	650	510	32.6
2012	4.3	14.19	15.88	0.0775	660	520	33.1
2013	4.4	14.52	16.25	0.0793	670	530	33.6
2014	4.5	14.85	16.62	0.0811	680	540	34.1
2015	4.6	15.18	16.99	0.0829	690	550	34.6
2016	4.7	15.51	17.36	0.0847	700	560	35.1
2017	4.8	15.84	17.73	0.0865	710	570	35.6
2018	4.9	16.17	18.10	0.0883	720	580	36.1
2019	5.0	16.50	18.47	0.0901	730	590	36.6
2020	5.1	16.83	18.84	0.0919	740	600	37.1
2021	5.2	17.16	19.21	0.0937	750	610	37.6
2022	5.3	17.49	19.58	0.0955	760	620	38.1
2023	5.4	17.82	19.95	0.0973	770	630	38.6
2024	5.5	18.15	20.32	0.0991	780	640	39.1
2025	5.6	18.48	20.69	0.1010	790	650	39.6
2026	5.7	18.81	21.06	0.1028	800	660	40.0
2027	5.8	19.14	21.43	0.1046	810	670	40.6
2028	5.9	19.47	21.80	0.1064	820	680	41.1
2029	6.0	19.80	22.17	0.1082	830	690	41.6
2030	6.1	20.13	22.54	0.1100	840	700	42.1

Source: Original data generated by the authors' simulation/model.

Table 9 shows oil shale usage, CO2 emissions, estimated CO2 emissions, global warming impact percentage, estimated gasoline and diesel consumption, and estimated energy consumption from 1970 to 2030 if the carbon content in the oil shale increases by 10%. If the carbon content in the oil shale increases by 10%, CO2 emissions, estimated CO2 emissions, global warming impact percentage, estimated gasoline and diesel consumption and estimated energy consumption also increase. Table 9 also shows that the carbon content in the oil shale has a significant impact on CO2 emissions, energy consumption and other parameters.

3. CONCLUSIONS

In this study, the impact of oil shale use and CO2 emissions on the energy system in Turkey in the period from 1970 to 2030 was examined. For this purpose, tables have been created showing the changes in oil shale usage, CO2 emissions, estimated CO2 emissions, global warming impact percentage, estimated gasoline and diesel consumption, and estimated energy consumption over the years. The main findings are:

- Oil shale use and CO2 emissions increased steadily from 1970 to 2030.
- In 2030, oil shale usage is estimated to be 6.1 Mt and CO2 emissions to be 20.13 Mt.
- If the carbon content in the oil shale increases by 10%, it is predicted that CO2 emissions will reach 22.54 Mt in 2030 and the global warming impact percentage will increase by 0.11%.
- Increasing oil shale use will lead to an increase in energy consumption as well as gasoline and diesel consumption.

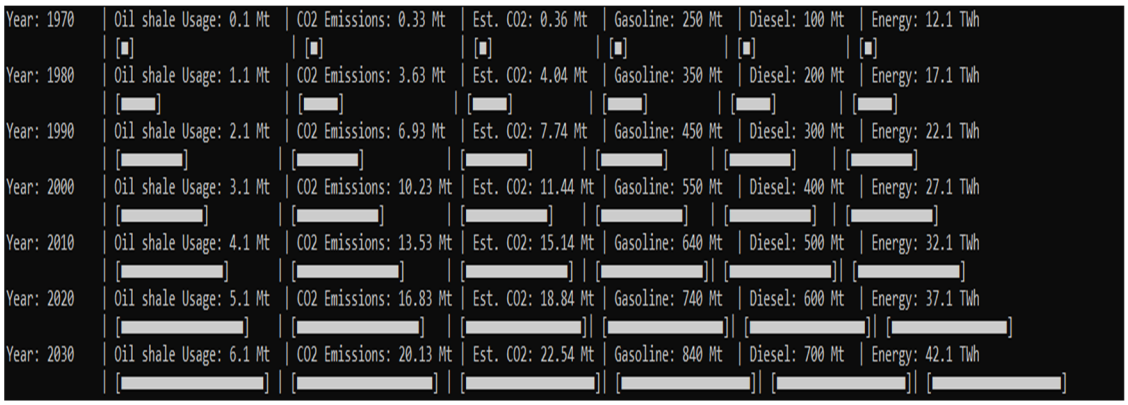


Figure 1. Comparison of oil shale usages, CO_2 emissions and energy consumptions

Figure 1 presents a group of bar charts showing the changes over time in energy consumption and CO2 emissions related to oil shale use between 1970 and 2030. The chart includes annual values for oil shale use (Mt), CO2 emissions (Mt), estimated CO2 emissions (Mt), estimated gasoline and diesel consumption (Mt), and estimated energy consumption (TWh). The data reveals that oil shale use rose from 0.1 Mt in 1970 to 6.1 Mt in 2030, while CO2 emissions increased from 0.33 Mt to 20.13 Mt in parallel. Additionally, estimated gasoline consumption increased from 250 Mt to 840 Mt, and diesel consumption rose from 100 Mt to 700 Mt. This chart visualizes the environmental impacts of oil shale mining and the trend of increasing energy consumption, emphasizing the necessity of sustainable energy policies.

Oil shale use is a significant source of CO2 emissions. These emissions contribute to global warming. Therefore, increasing oil shale use will make it harder to combat global warming. The following precautions can be taken to reduce the environmental impacts of oil shale use:

- Transition to renewable energy sources
- Increasing energy efficiency
- Development of carbon capture and storage technologies

These precautions will contribute to the fight against global warming by reducing the environmental impacts of oil shale use. Oil shale exploitation can have a number of socioeconomic impacts. These effects can be both positive and negative. The socioeconomic impacts of oil shale exploitation depend on a number

of factors. These factors; It varies depending on mining and processing technology, environmental regulations and the socioeconomic status of the region. Positive Effects include:

- Job Creation: Oil shale mining and processing can create new job opportunities. This could stimulate the regional economy and reduce the unemployment rate.
- Economic Growth: Oil shale can contribute to energy security and reduce the country's dependence on energy imports. This could stimulate economic growth.
- Tax Revenues: Taxes from oil shale production can increase government revenues. These revenues can be used in areas such as education, health and infrastructure.

Besides positive effects, there are also negative effects. Therefore, the negative effects are:

- Health Problems: Oil shale mining and processing can cause environmental problems such as air pollution and water pollution. This could negatively affect the health of people in the area.
- Social Problems: Oil shale mining can lead to social problems such as migration and housing shortage. This could reduce the quality of life of communities in the area.
- Land Use: Oil shale mining can cause destruction of agricultural lands and natural areas. This situation may disrupt the ecological balance of the region.

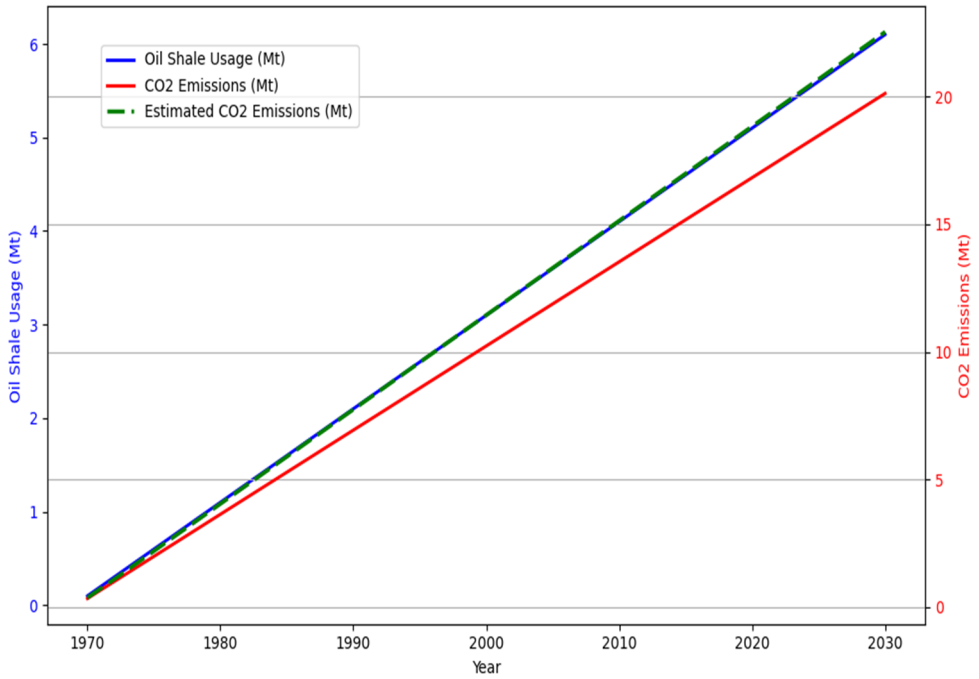


Figure 2. Oil shale usage and CO_2 emissions over time (1970-2030)

Figure 2 reveals the temporal course of bituminous shale consumption and the accompanying carbon dioxide emissions in the form of a line graph in the period between 1970 and 2030. While the use of bituminous shale, shown in the blue solid line in the graph, started from 0.1 million tons in 1970 and reached 6.1 million tons with an uninterrupted increase until 2030, CO2 emissions, represented by the red solid line, increase from 0.33 million tons to 20.13 million tons in the same time period. The green dashed line reflects the course of estimated CO2 emissions from 0.36 million tons to 22.54 million tons. The horizontal axis shows the years (1970–2030), the left vertical axis shows bituminous shale use (0–6 Mt), and the right vertical axis shows CO2 emissions (0–20 Mt). These findings indicate that the environmental burden of bituminous shale extraction is trending upward over time, and that actual CO2 emissions by 2030 could deviate from projected values by approximately 12 percent; This deviation is considered as a meaningful result that should be taken into consideration in shaping sustainable energy approaches. Altogether, the study reveals that combining machine learning with thermodynamic modeling increases emission prediction accuracy and offers actionable guidance towards improving carbon reduction and energy policies in industry. However, the scope of the research is limited by the spatio-temporal resolution of the input dataset and the limitations of the theoretical assumptions on which it is based.

4. ACKNOWLEDGMENTS

This research did not receive any specifc grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sector.

Declaration of Ethical Code

In this study, we undertake that all the rules required to be followed within the scope of the "Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive" have been complied with, and that none of the actions specified under the title of "Actions Contrary to Scientific Research and Publication Ethics" of the said directive have been carried out.

5. REFERENCES

1. TradeMap. (t.y.). *Trade statistics for international business development,* https://www.trademap.org, Erişim tarihi: 05.10.2025.
2. Laherrere, J. (2005). *Review of oil shale data.* www.hubbertpeak.com/laherrere/OilShaleReview.pdf, Erişim tarihi: 06.10.2025.
3. Probstein, R.F. & Hicks, R.E. (1982). *Synthetic fuels.* Mc Graw Hill Chemical Engineering Series, 322-373.
4. Tissot, B.P. & Welte, D.H. (1984). *Petroleum formation and occurrence*. Springer-Verlag, Berlin.
5. USA Department of Energy (2004). *Strategic significance of America's oil shale resource.* Vol.II, Section 2.1.
6. Toraman, Ö.Y. & Uçurum, M. (2009). Alternative fossil energy source: Bituminous shale. *Tübav Science Journal, 2*(1), 37-46.
7. Ballice, L., Yüksel, M., Sağlam, M. ve Hanoğlu, C. (1995). Mevcut enerji ve kimyasal hammadde kaynakları arasında bitümlü şistlerin yeri ve önemi. *Ekoloji, (14)*, 9-13.
8. Şengüler, İ. (2007). Asphaltite and bituminous shale potential and energy value in Turkey. *VI. Energy Symposium-Global Energy Policies and the Turkish Reality, Proceedings Book*, 186-195, Ankara.
9. Youngquist, W. (2005). *Survey of energy resources: Oil shale.* https://www.resilience.org/stories/2005-04-23/survey-energy-resources-oil-shale/, Erişim tarihi: 06.10.2025.
10. Orru, M., Vaizene, V., Pastarus, J.R., Systra, Y. & Valgma, I. (2013). Possibilities of oil shale mining under the Selisoo mire of the Estonia oil shale deposit. *Environmental Earth Sciences, 70*(7), 3311-3321.
11. EASAC Report (2007). A study on the EU oil shale industry-viewed in the light of the Estonian experience. *A Report by EASAC to the Committee on Industry,* Research and Energy of the EU Parliament.
12. Arvo, O. (2007). Estonian oil shale properties and utilization in power plants. *Energetika, 4*(2), 8-18.
13. Tech-Worm (2025). *Bitümlü şeyller (bitümlü şistler) nedir?.* https://www.tech-worm.com/bitumlu-seyller-bitumlu-sistler-nedir/, Erişim tarihi: 01.11.2025.
14. Güleç, K. & Önen, A. (1993). Turkish oil shales: reserves, characterization and utilization. *Proceedings of the 1992 Eastern Oil Shale Symposium*, University of Kentucky, Institute for Mining and Minerals Research, Lexington, USA, 12-24.
15. Taka, M. (1988). *Himmetoğlu (Göynük-Bolu) sahasının bitümlü şeyl olanakları ve sondajları.* MTA Raporu, No. 08533 (Yayınlanmamış).
16. Taka, M., Şengüler, İ. & Şener, M. (1992). *Geology and utilization possibilities of bituminous shales in Dodurga (Çorum) region.* MTA General Directorate Compilation Report, No. 9529, 1-27, Ankara.
17. Taka, M. & Işık, A. (1988). *Geology and economic opportunities of Bahçecik (İzmit) bituminous shale field.* MTA General Directorate Compilation Report, No. 8748, 1-17, Ankara.
18. Gözoğul, R. (1983). Seyitömer bitümlü şistinin mineral asit ekstraksiyonu ile zenginleştirilmesi. *Yüksek lisans tezi.* Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
19. The National Oil Shale Association (NOSA) (2013). *Oil shale energy to fuel our future.* www.oilshaleassoc.org, Erişim tarihi: 03.11.2025.
20. WikiVisually (t.y.). *Oil shale industry.* https://wikivisually.com/wiki/Oil_shale_industry, Erişim tarihi: 23.08.2026.
21. Sümer, A. (1981). *Burhaniye (Balıkesir) bitümlü şist sahasının jeolojisi ve ekonomik olanakları.* MTA General Directorate Compilation Report, No. 7150, 1-19, Ankara.

22. Bartis, J.T., LaTourrette, T., Dixon, L., Peterson, D. & Cecchine, G. (2005). *Oil shale development in the United States: Prospects and policy issues*. RAND Corporation.
23. Dyni, J.R. (2006). *Geology and resources of some world oil-shale deposits.* U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5294.
24. Wang, H., Guo, Z., Kong, X., Zhang, X., Wang, P. & Shan, Y. (2024). Application of machine learning for shale oil and gas "Sweet Spots" prediction. *Energies, 17*(9), 2191.
25. Oladapo, B.I., Olawumi, M.A. & Omigbodun, F.T. (2024). Machine learning for optimising renewable energy and grid efficiency. *Atmosphere, 15*(10), 1250.
26. Fu, L., Ren, Z., Si, W., Ma, Q., Huang, W., Liao, K., Huang, Z., Wang, Y., Li, J. & Xu, P. (2022). Research progress on CO2 capture and utilization technology, *Journal of CO2 Utilization*, 66, 102260.
27. Kartal, M.A. (2024). Data-driven decarbonization: Optimizing P+R in Istanbul with machine learning energy modeling and ITS. *Frontiers in Energy Research, 12*, 1395814.
28. Kartal, M.A., Atakök, G. & Ersoy, S. (2024). Cooling and multiphase analysis of heated environmentally friendly R152a (C2H4F2) fluid coming from the production process according to NIST indicators. *Applied Sciences, 14*(10), 4143.
29. Şengüler, İ. (1999). Bitümlü şeyleri GAP bölgesinde toprak güçlendirici olarak kullanma imkânlarının araştırılması ve geliştirilmesi, *Maden Tetkik Arama Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, (1-2), 1-6.
30. GEO ExPro (t.y.). *Oil shale.* https://geoexpro.com/oil-shale-an-alternative-energy-resource/, Erişim tarihi: 20.08.2026.
31. Kartal, M.A. ve Feyzioğlu, A. (2025). Mobil yaşam alanlarında karbon ayak izinin azaltılması: Enerji verimliliği ve çift tanklı su ısıtıcı modelleri. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *40*(4), 899-914.
32. Tantekin, A. & Özdil, N.F. (2022). Energy analysis in a solar house with building-integrated photovoltaic (BIPV) system. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37*(3), 685-697.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

Adıyaman İli ve Civarında Açılan Kuyulardan Edinilen Jeomekanik Parametreler Kullanılarak Kampaniyen Yaşlı Sayındere Formasyonunda Rezervuar Üretkenliğinin Analizi ve Bölgedeki Yeni Keşif Stratejileri (Güneydoğu Anadolu, Türkiye)

Mert AÇIKALIN [1,a], **Ulvi Can ÜNLÜGENÇ** [2,b], **Ulaş İnan SEVİMLİ** [3,c]

[1]*TPIC | Turkish Petroleum International Anonim Şirketi, Ankara, Türkiye*
[2]*Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye*
[3]*ASAT | Antalya Su ve Atıksu İdaresi Genel Müdürlüğü, Antalya, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0009-0006-0965-8716; [b]**ORCID**: 0000-0002-4092-7041; [c]**ORCID**: 0000-0003-1168-2150*

Makale Bilgileri
Geliş : 29.09.2025
Kabul : 17.07.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1791884

Sorumlu Yazar
Mert AÇIKALIN
macikalin@tpic.gov.tr

Anahtar Kelimeler
Sayındere formasyonu
Jeomekanik modelleme
Sh en yüksek
Mü değeri (μ)

Atıf şekli: *AÇIKALIN, M., ÜNLÜGENÇ, U.C., SEVİMLİ, U.İ., (2026). Adıyaman İli ve Civarında Açılan Kuyulardan Edinilen Jeomekanik Parametreler Kullanılarak Kampaniyen Yaşlı Sayındere Formasyonunda Rezervuar Üretkenliğinin Analizi ve Bölgedeki Yeni Keşif Stratejileri (Güneydoğu Anadolu, Türkiye). Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 707-721.*

ÖZ

Bu çalışma, Türkiye'nin Güneydoğu kesimlerinde benzer tektonik yerleşke üzerinde oluşan havzalarda yer alan petrol sahaları arasındaki üretim farklılıklarının nedenlerini araştırmak ve bir keşif modeli geliştirmektir. Çalışmada, Kampaniyen yaşlı Sayındere Formasyonunun S3 litofasiyesi hedef rezervuar seviyesine odaklanılmıştır. Litofasiyes analizi, sekans stratigrafisi ve sismik yorumlamaya ek olarak, kuyu verileri ve jeomekanik modelleme entegre edilmiştir. Çalışmanın ana odak noktasında, "kritik stres altındaki çatlak sayısı" ($\mu \geq 0.85$) adlı parametrenin, kuyuların tektonik yerleşkelerine (doğrultu atımlı fay, ters fay-yükselen blok, vb.) göre üretim değerleriyle olan kantitatif ilişkisi ortaya konmuştur. Tektonik rejim-üretim değerleri korelasyonları sonucu, doğrultu atımlı fay rejiminde R^2=0.91 ve ters fay-yükselen blokta R^2=0.71 olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucu, en yüksek yatay stres (Shmax) değerlerinin Adıyaman'ın Kuzeyinde, güneyine göre daha yüksek olduğu ve bu durumun kırık/çatlak karakterini kontrol ettiği belirlenmiştir. Çalışma alanındaki karot, log, DST ve XRMI verileri ile mostraların çatlak verileri birlikte değerlendirildiğinde asimetrik petrol sahalarında yapısal kıvrımların tepe noktalarında petrol keşfinin muhtemel olduğu anlaşılmıştır.

Analysis of Reservoir Productivity in the Campanian-Aged Sayındere Formation Using Geomechanical Parameters Derived from Wells Drilled in Adıyaman Province and Surrounding Areas, and New Exploration Strategies in the Region (Southeastern Anatolia, Türkiye)

Article Info
Received : 29.09.2025
Accepted : 17.07.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1791884

Corresponding Author
Mert AÇIKALIN
macikalin@tpic.gov.tr

Keywords
Sayındere formation
Geomechanical modelling
Sh maximum
Mu value (μ)

How to cite: *AÇIKALIN, M., ÜNLÜGENÇ, U.C., SEVİMLİ, U.İ., (2026). Analysis of Reservoir Productivity in the Campanian-Aged Sayındere Formation Using Geomechanical Parameters Derived From Wells Drilled in Adıyaman Province and Surrounding Areas, and New Exploration Strategies in the Region (Southeastern Anatolia, Türkiye). Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 707-721.*

ABSTRACT

This study investigates the causes of production variability across oil fields in similar tectonic settings in southeastern Turkey to develop a predictive exploration model, focusing on the "S3" lithofacies of the Sayındere Formation as the reservoir interval through an integrated multidisciplinary approach. The analysis quantifies the relationship between critically stressed fracture count ($\mu \geq 0.85$) and well production across various tectonic settings." Regression analyses revealed a strong quantitative relationship between critically stressed fractures and production performance, yielding $R^2 = 0.91$ in strike-slip fault regimes and $R^2 = 0.71$ in reverse fault-uplifted block regimes. Additionally, the maximum horizontal stress (Sh_{max}) in northern Adıyaman was found to be higher than in the south, directly influencing fracture characteristics. Ultimately, by integrating core, log, DST, XRMI, and outcrop data, the study concludes that new wells should preferentially be drilled in asymmetric oil fields and at the crests of structural folds where oil discovery is possible.

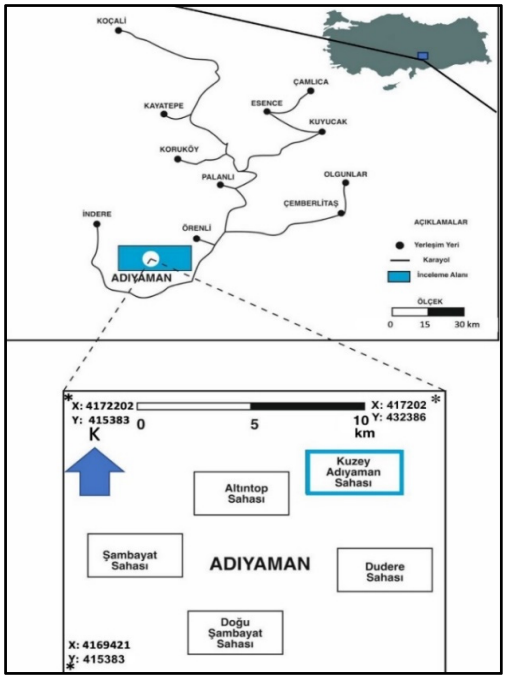
1. GİRİŞ

Türkiye Güneydoğusu, Arap ve Anadolu levhalarının çarpışma zonunun ön ülkesinde yer alması nedeniyle karmaşık bir tektonik evrim geçirmiş ve bu durum, bölgede özellikle çarpışma süturunun güney kesimlerinde yer alan önülke alanlarında zengin hidrokarbon yataklarının oluşumu için önemli havzaların gelişmesine ortam sağlamıştır [1,2]. Özellikle, Adıyaman ve Şanlıurfa bölgelerinde, Kretase ve Tersiyer (Paleosen-Eosen) yaşlı çatlaklı-kırıklı karbonatlı ve kırıntılı istifler önemli petrol rezervuarlarına ev sahipliği yapmaktadır [3,4]. Petrol, günlük hayatın birçok alanında tüketilen maddelerin hammaddesi olması ve benzer eşleniği ile ikamesi henüz bulunmayan bir doğal enerji kaynağı olarak kabul görmekte olduğundan dolayı petrol rezervuarlarının geliştiği çatlak ve kırıklı istiflerin ayrıntılı sebep sonuç analizi ile çalışılması önem arz etmektedir [5].

Söz konusu çatlaklı-kırıklı karbonatlı-kırıntılı istifler, bölgedeki sıkışma tektoniğine bağlı olarak Kretase'den günümüze kadar gelişmiştir. Tektonik aktivitelere bağlı olarak gelişen özellikle Sayındere Formasyonu çatlak sistemindeki gelişimin, yakın zamanda yaşanan 6 Şubat 2023 tarihli Kahramanmaraş depremi sonrasında da Güneydoğu Anadolu bölgesinde yaklaşık 4 metreye ulaşan yerkabuğundaki blok ötelenmesinin gerçekleştiği alanlarda mevcut kırıkların gelişmesini sürdürdüğünü düşündürmektedir [6]. Adıyaman-Antakya hattı boyunca uzun süren depremde şiddet değerleri 10-11 arasına ulaşmış olup maksimum yer ivmesi Fevzipaşa'daki (İslahiye) bir istasyon tarafından 1.62 g olarak kaydedilen en yüksek değer olmuştur [6,7].

Bölgedeki birçok petrol sahasının uzun yıllardır üretime devam etmesine rağmen, benzer jeolojik ortamlara sahip komşu sahalar arasında gözlemlenen belirgin üretim farklılıklarının nedeni tam olarak anlaşılamamıştır. Bu bağlamda, Şambayat Sahası'nın nispeten daha yüksek verimliliği, bu çalışmanın temel çıkış noktasını oluşturmaktadır.

Geleneksel arama yöntemleri, çoğunlukla yapısal kapanların haritalanması ve stratigrafik özelliklerin belirlenmesine odaklanmıştır. Ancak, özellikle karbonatlı ve çatlak-kontrollü rezervuarlarda, rezervuar performansını ve dolayısıyla üretim potansiyelini belirleyen ana faktör, kayacın statik özelliklerinden (gözeneklilik) ziyade, dinamik akış kapasitesini (permeabilite) kontrol eden kırık-çatlak sistemlerinin jeomekanik davranışıdır. Bu nedenle, üretim farklılıklarını açıklamak ve keşif başarısını artırmak için, çatlak sistemlerinin yeraltı stres koşulları altındaki durumunu niceliksel olarak analiz eden yeni bir modele gereksinim duyulmaktadır.



Şekil 1. Adıyaman ili ve civarındaki kritik stres çalışmalarının yapıldığı inceleme alanının yer bulduru haritası

Bu çalışma, işte bu ihtiyaçtan hareketle, Kuzey Adıyaman bölgesindeki mevcut petrol sahalarında (Şekil 1) Kampaniyen yaşlı Sayındere Formasyonu'nun S3 litofasiyesi özelinde, çok disiplinli (multidisipliner) bir araştırma yaklaşımını gerektirmektedir [8]. Çalışmanın temel amacı, litofasiyes analizi, sekans stratigrafisi ve sismik yorumlamanın ötesine geçerek, "kritik stres altındaki çatlak" kavramını merkezine alan jeomekanik bir model geliştirmek ve bu modeli kullanarak üretim potansiyeli yüksek yeni hedef alanları tahmin etmektir. Bu kapsamda, kuyu logları (XRMI vb.), karot verileri, sismik veriler, kuyulardan ve mostradan ölçülen çatlak verileri entegre edilmiş; kuyular, içinde bulundukları tektonik yerleşkelere (doğrultu atımlı fay, ters fay-yükselen blok, vb.) göre sınıflandırılarak, her bir grupta jeomekanik parametreler ile üretim değerleri arasındaki istatistiksel korelasyonlar (regresyon analizi) araştırılarak yorumlanmıştır.

2. YÖNTEM

2.1. Çalışma Alanı ve Veri Seti

Bu çalışma, Türkiye'nin Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde, Adıyaman ili civarındaki Kuzey Adıyaman Sahasında sürdürülmüştür. Çalışmada aşağıdaki veri setleri sistematik bir şekilde kullanılmıştır:

- ***Sismik Veri:*** Bölgeye ait 3B sismik yansıma küpleri yapısal haritalama ve fay kinematiğinin çözümlenmesi amacıyla kullanılmıştır.
- ***Kuyu Verileri:*** Toplam 12 adet kuyudan alınan gama ışını (GR), sonic, yoğunluk (RHOB), nötron (NPHI) ve direnç (LLD, LLS) logları ile XRMI (X-treme Resolution MicroImager) gibi görüntüleme logları temel verileri oluşturmuştur.
- ***Karot ve İnce Kesit Verileri:*** Şambayat Sahası'ndan temin edilen karotlar üzerinde çatlak analizleri yapılmış ve ince kesitlerde litolojik ve diyajenetik incelemeler gerçekleştirilmiştir.
- ***Üretim Verileri:*** İlgili kuyuların günlük petrol üretim değerleri, regresyon analizlerinde bağımlı değişken olarak kullanılmıştır.
- ***Mostra Verileri:*** Bölgedeki yüzey verilerinden ölçülen çatlak düzlem verileri ve yoğunluk verileri, kuyu verileri ile deneştirilmiştir [8].

2.2. Metodoloji

Çalışmada üç aşamalı bir metodoloji izlenmiş olup bunlar sırasıyla 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3'te açıklanmıştır.

2.2.1. Tektono-Stratigrafik Çerçevenin Oluşturulması

Sismik kesitler ve kuyu log korelasyonları kullanılarak bölgenin stratigrafik çerçevesi sekans stratigrafisi prensiplerine göre oluşturularak, hedef birim olan Kampaniyen yaşlı Sayındere Formasyonu'nun "S3" litofasiyesi haritalanmıştır [9].

2.2.2. Jeomekanik Modelleme ve Stres Analizi

- Her bir litoloji için yoğunluk (ρ) ve kalınlık (h) değerleri kuyu loglarından hesaplanmış ve toplam dikey stres (Sv) hesaplanmıştır.
- XRMI logları ve sismik fay çözümlemeleri kullanılarak maksimum yatay stres (Shmax) yönü belirlenmiştir.
- Coulomb kırılma kriteri temel alınarak, her bir kuyu için "$\mu \geq 0.85$ koşulunu sağlayan kritik stres altındaki çatlakların sayısı" parametresi, [8]'deki metodolojiden yararlanılarak hesaplanmıştır.

2.2.3. Tektonik Sınıflandırma ve İstatistiksel Analiz

- Çalışılan kuyular, bulundukları tektonik yerleşkeye göre 5 farklı tektonik grup içerisinde değerlendirilmiştir: 1) Doğrultu atımlı fay, 2) Ters fay-yükselen blok, 3) Ters fay-düşen blok, 4) Normal fay-yükselen blok, 5) Normal fay-düşen blok.

- Her bir tektonik grup için, yukarıda belirlenen jeomekanik parametre (kritik çatlak sayısı) ile kuyu üretim değerleri arasında basit doğrusal regresyon analizi yapılmış ve R^2 (açıklanmış varyans) korelasyon katsayıları hesaplanmıştır [8].

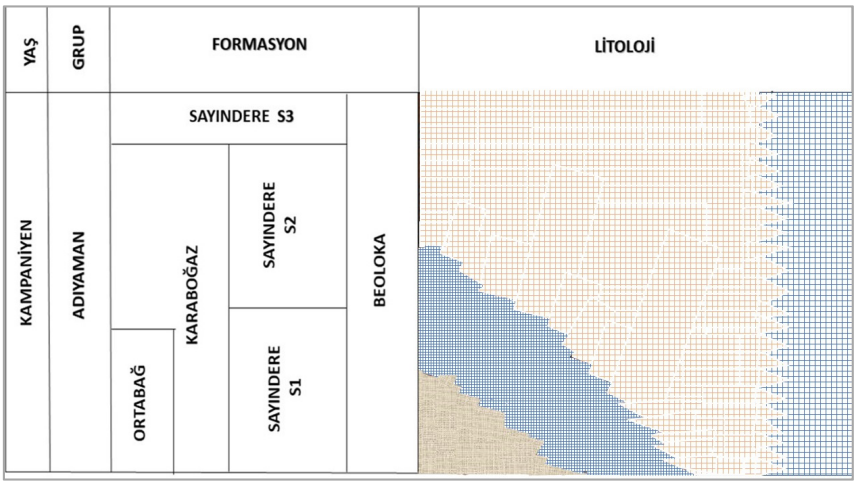
3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. İnceleme Alanının Jeolojisi

3.1.1. Adıyaman Grubu

Adıyaman Grubu, Adıyaman il merkezinin yaklaşık 32 km güneyinde, Karababa Dağı ve çevresinde yüzeylemektedir. Grup, alttan üste doğru; Orta Kampaniyen yaşlı Karaboğaz Formasyonu, Orta Kampaniyen yaşlı Ortabağ Formasyonu, Kampaniyen yaşlı Sayındere Formasyonu ve Geç Kampaniyen–Erken Maestrihtiyen yaşlı Beloka Formasyonu'ndan oluşmaktadır [10] (Şekil 2).

"Adıyaman Grubu" adı, ilk kez Gossage [11] tarafından Adıyaman ili çevresinde yüzeyleyen Pliyosen–Kuvaterner yaşlı klastik çökeller için "Adıyaman Çakıl Grubu (Adıyaman Gravel Group)" biçiminde kullanılmıştır [11]. Daha sonra Çoruh [12], Adıyaman ili civarında mostra veren Karababa, Karaboğaz ve Sayındere formasyonları ile bu birimlerin Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nin doğusundaki zaman eşlenikleri olan Ortabağ ve Beloka formasyonlarını tek bir grup altında değerlendirmiş ve böylece "Adıyaman Grubu"nu tanımlayan ilk araştırmacı olmuştur [10].



Şekil 2. Adıyaman Grubunun genelleştirilmiş stratigrafik kesiti [10]'den alınmış ve Sayındere Formasyonu fasiyeslerini (S1, S2 ve S3) gösterecek şekilde yeniden renklendirilmiştir.

Sayındere Formasyonu (Ks)

Sayındere Formasyonu, ilk kez Gossage [11] tarafından Adıyaman–Gölbaşı karayolu üzerinde, Gölbaşı'na yaklaşık 10 km mesafede yer alan Sayındere'nin batı kesimlerinde tanımlanmış ve "Germav Grubu'nun alt kısmı (Lower part of the Germav Group)" içerisinde " Sayındere plaket yapılı yassı kireçtaşı formasyonu (Sayındere platy limestone formation)" adıyla anılmıştır [10]. Birim, Mardin, Batman ve Siirt illeri çevresi hariç, Güneydoğu Anadolu'nun büyük bir kısmında yayılım göstermektedir. İnceleme alanında ve çevresinde Sayındere Formasyonu; Adıyaman ilinin güneyindeki Karababa Dağı, Penbeğli İnişdere antiklinali, Besni antiklinali, Sayındere vadisi ile Adıyaman ili Gölbaşı ilçesinin doğusunda yüzeylenmektedir. Birimin tip kesit yeri, Adıyaman-Gölbaşı karayolu üzerinde, Gölbaşı ilçesine 10 km uzaklıktaki Sayındere'nin batı kesimi olup, başlıca gri-grimsi beyaz renkli, ince-çok ince tabakalı, zayıf dayanımlı ve yer yer marnlı killi kireçtaşıyla temsil edilmektedir (Şekil 2) [10].

Genel olarak, birimin taban dokanağı yayılım alanının orta ve batı kesimlerinde Karaboğaz Formasyonu ile geçişlidir [10]. Karaboğaz Formasyonu'nun bulunmadığı bölgelerde ise birim, Mardin Grubu birimleri üzerinde uyumsuz olarak bulunmaktadır. Sayındere Formasyonu, çalışma alanının kuzey kesimlerinde Kastel Formasyonu, güneyde ise Bozova Formasyonu ile yanal ve düşey geçişli dokanaklıdır.

Sayındere Formasyonu başlıca gri-grimsi beyaz renkli, ince-çok ince tabakalı, zayıf dayanımlı, yer yer marnlı killi kireçtaşı olarak tanımlanmakta olup, stratigrafik konumu, litolojik özellikleri ve oluşum ortam şartları göz önüne alınarak 3 farklı fasiyese ayrılmıştır [8]. Bunlar; i) organik maddece zengin karbonatlı çamurtaşı fasiyesi (S1), ii) biyoklastik istiftaşı fasiyesi (S2) ve iii) gözenekli karbonat türbidit fasiyesidir (S3). Sayındere Formasyonu'nun killi kesif kireçtaşı litolojisi (S1) organik maddece zengin kireçtaşı (S2), karbonat türbiditlerinin olduğu seviyeler (S3) olarak açıklanmış olup, fasiyes sınırlarında geçiş gösteren litolojiler, her iki metrede bir alınan kırıntılı tabak numuneleri binoküler mikroskop ile beyaz ışık altında incelenmiştir [8].

Bu çalışmada, kuzey-güney yönlü Eosen-Miyosen tektonizması sürecindeki sıkıştırmadan dolayı Kuzey Adıyaman Sahasında değişen Shmax olası değerleri, yine Kuzey Adıyaman Sahasında açılan kuyulardan alınan XRMI logları değerlendirilerek öngörülmüştür. Sayındere Formasyonu içerisindeki çatlakların bilinen doğrultu ve eğim değerleri, Eşik Enerji Stresi Analizi için veri girdisi olarak kullanılmış ve çatlak oluşumu için gereken Shmax değerleri ilgili algoritmaların makroları kullanılarak) hesaplanmıştır [8].

3.2. Arap Levhası ve Anadolu Levhacığı Arasındaki Tektonik İlişkiler

Arap Levhasının kuzey kenarının Anadolu Levhacığı'nın altına kuzeye doğru dalmasıyla [10] bölgede oluşan doğu-batı uzanımlı Kastel Çukurluğu (Şekil 3a), aşağıda belirtilen iki ana birim tarafından doldurulmuştur:

i) Kretase yaşlı allokton birimler: Koçali Ofiyoliti ve Karadut Karmaşığı gibi kuzeyden gelen ve naplar halinde güneye doğru sürüklenen allokton birimlerdir [13]. Güneydoğu Anadolu'da yürütülen çalışmada allokton birimlerden Koçali Karadut Karmaşığı yüzeylemektedir [15-17] (Şekil 3b).

ii) Kastel Formasyonu: Geç Kampaniyen-Erken Maastrihtiyen döneminde Kretase alloktonlarından türeyen kırıntılı sedimanter kayaçlardan oluşan bir birimdir [2,18].

Kastel Formasyonu, Kastel Çukurluğu içerisinde çökelirken, güneydeki platform alanında eş zamanlı olarak, Kastel Formasyonu ile aynı zamanda Bozova Formasyonu çökelmiştir (Şekil 3a). Bozova Formasyonu, marn ve killi kireçtaşı litolojisine sahip olup, çatlaklarının yoğun geliştiği durumlarda hidrokarbon rezervuarı olarak değerlendirilebilmektedir.

Kretase Tektonizması ve İlgili Çökelme Süreçleri

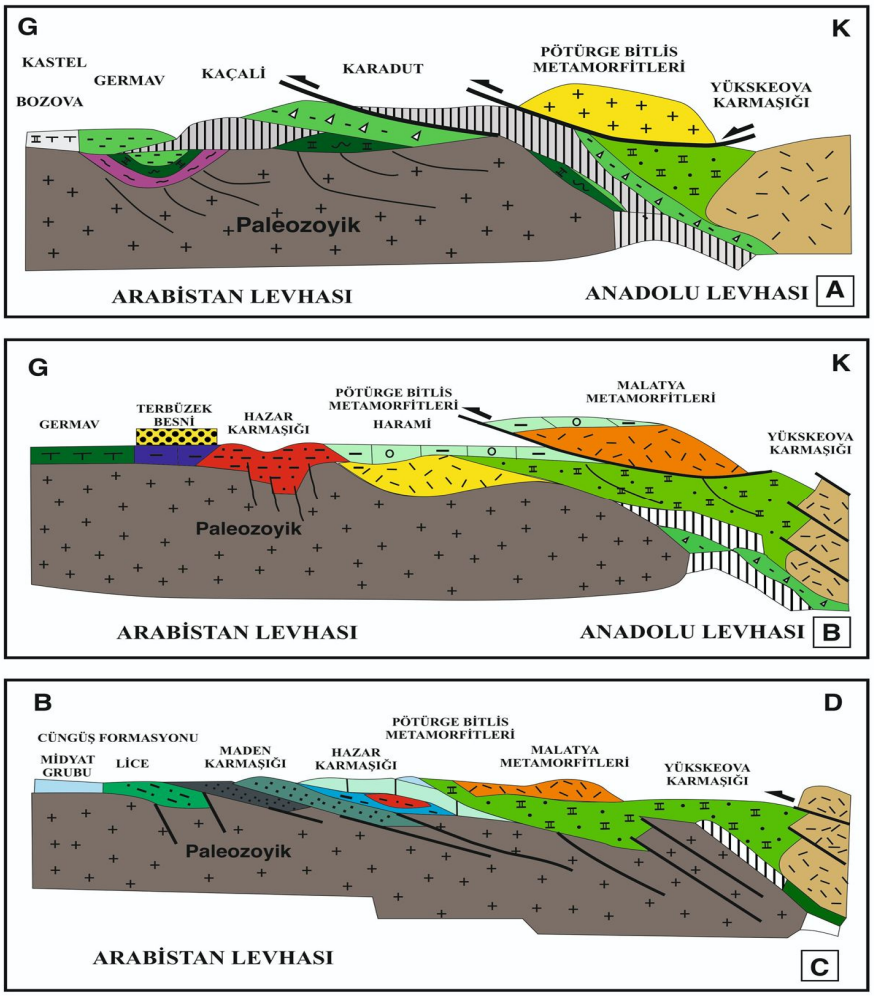
Kastel Formasyonu, bölgede allokton birimlerin yerleşmesi sırası ve hemen sonrasında gelişmiş bir birim olup, bölgede bir ön-çukur (foredeep benzeri bir çukur) oluşmuştur. Bu çukurluk alanda da alloktonların aşınmasından gelen klastik malzeme ile doldurulmuştur. Kretase boyunca süregelen tektonik hareketler sonucunda, kuzeyden naplar halinde ilerleyen Kretase alloktonları (Koçali Ofiyoliti ve Karadut Karmaşığı), Erken Maastrihtiyen döneminin sonunda Arap Levhası kuzey kenarı üzerine yerleşmiştir. Formasyonun ilk oluşan kısımları, zamanla ilerleyen veya kayarak çöken allokton kütlelerin altında kalmıştır. Bu nedenle, Kastel Formasyonu günümüzde yalnızca alloktonların önünde değil, aynı zamanda altında ve üstünde de gözlenebilmektedir [28].

Erozyon ve yerçekimi kuvveti nedeniyle harekete bağlı ayrışma sonucu gevşeyen malzeme, yüksek yerlerden alçak yerlere doğru Kastel çukurluğundaki taşınmasıyla başlıca kırıntılı birimlerin birikimi ile Kastel Formasyonu oluşmuştur. Kastel Formasyonu'nun karasal fasiyesi konumunda olan Terbüzek Formasyonu ise başlıca çakıltaşlarıyla temsil edilmektedir (Şekil 3b).

Geç Maastrihtiyen-Paleosen Döneminde

Güneydeki platform alanında, Kastel Formasyonu'nun üzerine uyumlu olarak Paleosen yaşlı Germav Formasyonu çökelmiştir. Germav Formasyonu, şeyl, marn ve kumtaşı ardalanmasından oluşan bir istif ile temsil edilmektedir (Şekil 3b). Bölgenin kuzey kesimlerinde, Geç Kretase yaşlı Besni Formasyonu çökelmiştir. Bu birim, genellikle sığ denizel kireçtaşı litolojisi ile temsil edilmektedir (Şekil 3b).

Tarihsel jeolojik süreçlerde Sh_{max} en yüksek (max) değerindeki değişkenlikler, gerilme analizlerine yönelik makro girişlerine dikkati çekmek amacıyla numaralandırılmış (Şekil 3 ve Şekil 4) olup, bu şekillerdeki Sh_{max} en yüksek (max) değerleri her bir jeolojik zaman için farklı altı ayrı değer üzerinden hesaplanmıştır.



Şekil 3. a) Bozova, Kastel ve Germav formasyonlarının Üst Kretase-Paleosen dönemlerindeki dokanak ilişkilerini gösterir şematize jeoloji enine kesiti **b**) Besni ve Germav formasyonlarının Üst Maastrihtiyen-Paleosen dönemlerindeki dokanak ilişkilerini gösterir şematize jeoloji enine kesiti, **c**) Maden Karmaşığı ve Çüngüş Formasyonunun Eosen"deki dokanak ilişkilerini gösterir şematize jeoloji enine kesiti [2,27,20]'den değiştirilerek yeniden çizilmiştir

Tektonik Hareketler ve Sonuçları

Bölgedeki ilk önemli tektonik hareket, Geç Kretase döneminde Neotetis Okyanusu'nun güney kolunun Anadolu Levhacığının altına, kuzeye doğru dalmasıyla kapanmaya başlaması ile meydana gelmiştir. Bu kapanma sonucunda:

- Bitlis-Pötürge mikro-levhası ile Arap Levhası kuzey kenarı çarpışmış,
- Okyanus kabuğu (Koçali Ofiyoliti) ve derin deniz çökelleri (Karadut Karmaşığı), Kampaniyen sonu ile Maastrihtiyen başında bölgeye yerleşmiştir [4, 18, 20].
- Eosen dönemindeki yeniden aktive olan tektonik hareketler aşağıda belirtilen sonuçları oluşturmuştur:
- Platform alanlarında sedimantasyonda bir duraklama yaşanmış, bu bölgelerde aşınma meydana gelmiştir.
- Şaryaj alanlarında, Kretase alloktonlarından türeyen kırmızımsı renkli karasal sedimanlardan oluşan Gercüş Formasyonu çökelmiştir [18, 20]. Bu süreçlerin bir sonucu olarak, bölgede hem yüzeyde

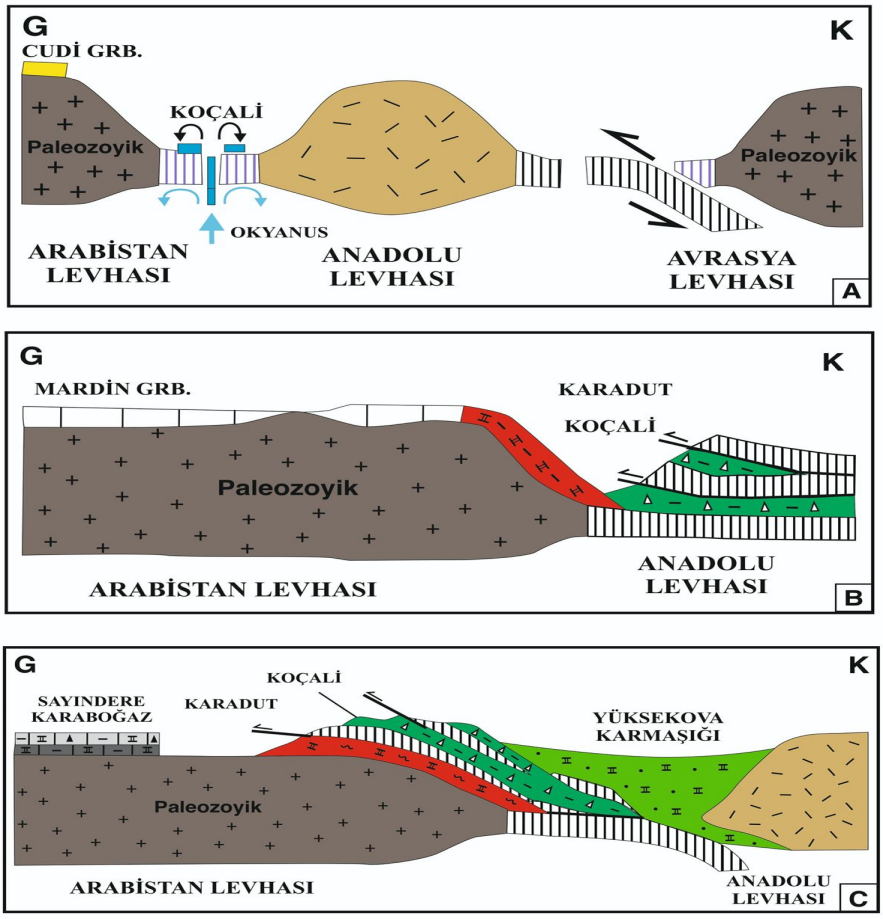
hem de yer altında belirgin jeolojik ve stratigrafik özellikler şekillenmiştir. Pilot Dev Sahada açılan kuyular arası stratigrafik veri setleri önceki metotlara göre belirlenmiştir [21]. Özellikle çatlak ve fay yapıları, hidrokarbon potansiyelinin değerlendirilmesi açısından önemli bir veri seti oluşturmuştur.

Eosen ve Oligosen Döneminde Güneydoğu Anadolu Bölgesi Çökelim Süreçleri

Eosen dönemi boyunca Güneydoğu Anadolu Bölgesinde dikkat çeken en önemli oluşum, Midyat Grubu karbonatlarının çökeldiği sığ denizel ortamlardır. Eosen-Oligosen döneminde, çökelme koşullarının uygun olduğu alanlarda bu karbonatlar yoğun bir şekilde oluşmuştur [22-24,26,28].

Rezervuar seviyesi olan Sayındere Formasyonu + Mardin Grubundaki En yüksek yatay stres değerleri, Arap levhasının Anadolu levhacığının altına dalmasına (Şekil 3c) bağlı değişen ortamsal şartlar ve jeodinamik değişkenlere göre her bir petrol üretim sahasında değişkenlik göstermektedir.

Diğer yandan Adıyaman İli ve civarında açılan kuyularda Koçali-Karadut ofiyolitik melanjı gözlenirken (Şekil 3a), en yüksek yatay stres değerleri, Güneyden Kuzeye doğru levhaların sıkışma etkilerine bağlı olarak artmaktadır [8].



Şekil 4. a) Triyas-Jura yaşlı Cudi Grubu karbonatlarının Paleozoyik temel üzerindeki uyumsuz konumu **b)** Mardin Grubu'na ait birimlerin Jura döneminden Kretase'ye kadar geçen dönemi şematize eden taslak jeolojik enine kesiti, **c)** Geç Kretase'de Karaboğaz ve Sayındere formasyonlarının temel üzerindeki konumlarını yansıtan şematize taslak jeolojik enine kesiti [2,28,17]'den değiştirilerek yeniden çizilmiştir

3.3. Bulgular

Tektonik yerleşkelere göre yapılan gruplandırma ve regresyon analizleri, çatlak-üretim ilişkisinin tektonik rejime bağlı olarak belirgin değişiklikler sunduğunu ortaya koymuştur (Çizelge 1-5).

Stratigrafik ve Litolojik Kontrol

Yapılan litofasiyes ve ince kesit analizleri, en yüksek üretim performansı gösteren kuyularda, Sayındere Formasyonu'nun "S3 fasiyesi" içerisinde yer aldığını doğrulamıştır. Bu fasiyes, organik maddece fakir olmasına rağmen yoğun çatlak gelişimine bağlı olarak yüksek ikincil gözeneklilik ve geçirimlilik sergileyen bir kireçtaşı birimidir.

Dikey Basınç Hesaplamalarındaki Litoloji Etkisi

Toplam dikey stres (σv) analizi, farklı litolojilerin basınç etkilerini değerlendirmek için gerçekleştirilmiştir. Her bir litoloji için yoğunluk (ρ) ve kalınlık (h) değerleri hesaplanarak, derinlerde kalan formasyonlar üzerindeki toplam litolojik yük belirlenmiştir. Yapılan hesaplama sadece kumtaşıyla sınırlı olmayıp, örneğin Şelmo Formasyonunda (Şekil 5) bulunan farklı litolojiler için de aynı yöntem uygulanmıştır:

- Kumtaşı (SV_1)
- Miltaşı (SV_2)
- Şeyl (SV_3)
- Çakıltaşı (SV_4)
- Kireçtaşı (SV_5)
- Jips (SV_6)

Her bir litolojinin yoğunluk (ρ) ve kalınlık (h) değerleri ayrı ayrı hesaplanmış ve bu değerlerin toplamı, altındaki formasyon üzerindeki toplam dikey stresi belirlemek için kullanılmıştır.

Toplam Dikey Stres Hesabı

$$\sigma v = \sum_{i=1}^{6} (SV_i) = p_i . g . h_i$$

Farklı litolojilere ait dikey stres değerleri toplandığında, bir üst formasyonun (örneğin Şelmo Formasyonu) bir alt formasyon (örneğin Kapıkaya Formasyonu) üzerindeki toplam dikey stresi elde edilmiştir. Bu yöntem, formasyonun farklı bileşenlerinin basınca katkısını detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır.

Maksimum Yatay Stres (σmax)

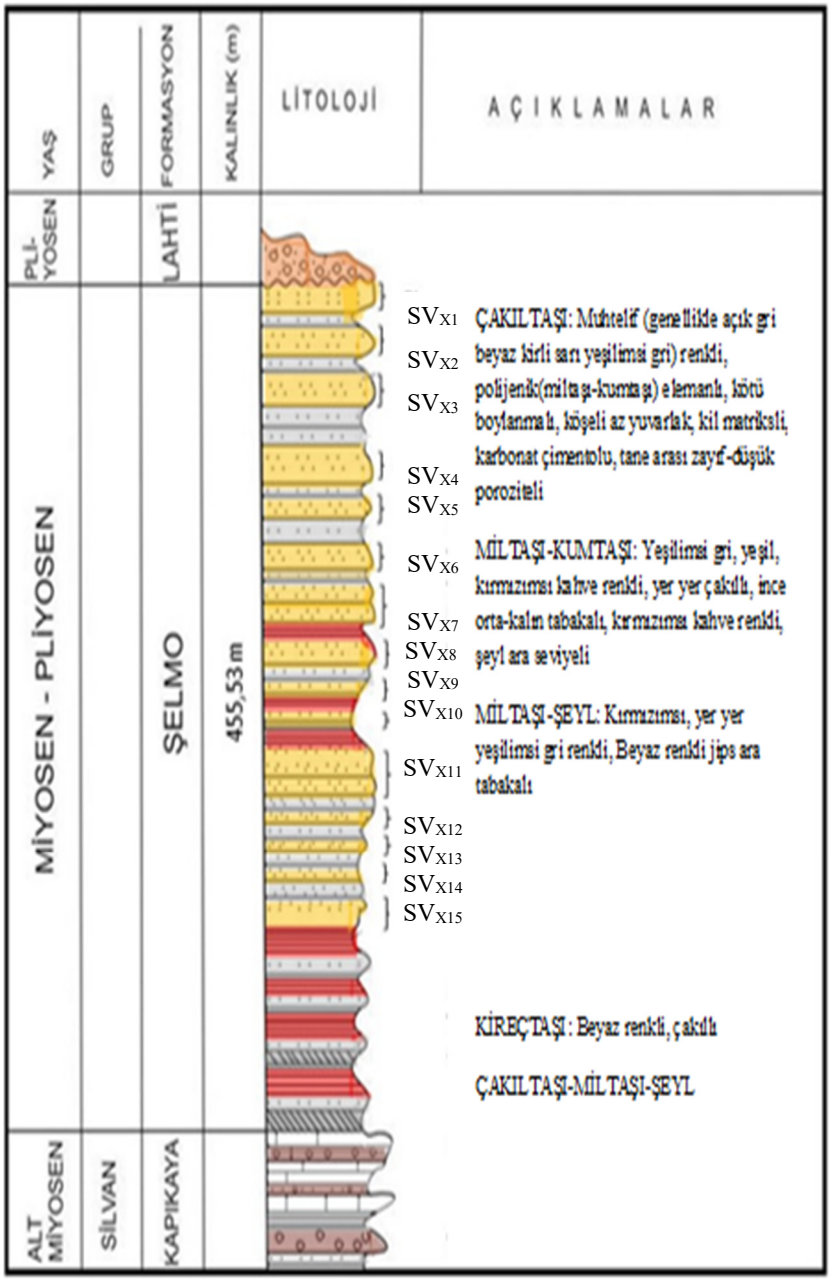
σmax, bölgedeki tektonik sıkışmanın ana yönünü temsil etmektedir (Şekil 4a,b,c; Şekil 6). Bölgede yapılan analizler, Kuzey Adıyaman sahalarındaki σmax'ın Kuzey–Güney yönünde olduğunu göstermiştir. Dalma-batma zonunun yer aldığı kuzeye doğru gidildikçe stres bileşeninin şiddetinin arttığı tespit edilmiştir.

Shmax, yer altındaki en büyük yatay sıkışma yönünü ifade eder. Bu doğrultu, bölgesel tektonik rejim ve yerel stres alanları tarafından belirlenir. Sh maksimuma paralel gelişen kırıklar genellikle açık, iletken ve akışkan göçü açısından avantajlıdır. Bu nedenle, özellikle petrol ve gaz rezervuarlarının üretim potansiyelini doğrudan etkiler.

Türkiye'de Kuzey Adıyaman Sahası ile güneyde kalan sahalar arasında Sh maksimum yönünün Kuzey–Güney doğrultusunda olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, dalma-batma zonuna doğru yaklaştıkça stres değerinin artmasıyla bu etkinin kuzeye doğru daha da arttığı görülmektedir.

Sismik ve kuyu verileri üzerinde yapılan analizler, Arap Levhasının kuzeye doğru dalma-batmasına bağlı olarak, maksimum yatay stres (Sh_{max}) değerlerinin kuzeydeki Adıyaman sahalarında diğer komşu sahalara göre belirgin şekilde yüksek olduğunu göstermiştir. Bu bulgu, bölgedeki tektonik sıkışmanın kuzeyden güneye doğru giderek azalan bir gradyana sahip olduğunu işaret etmektedir.

Adıyaman İli ve civarındaki 5 petrol sahasına (Şekil 1) ait Shmax değerleri daha önce ayrı ayrı hesaplanmıştır [11]. Söz konusu Shmax değerleri, makalede özetlenen kritik stres rezervuar analizlerinde (Çizelge 1, Çizelge 2, Çizelge 3, Çizelge 4, Çizelge 5) kullanılmıştır.



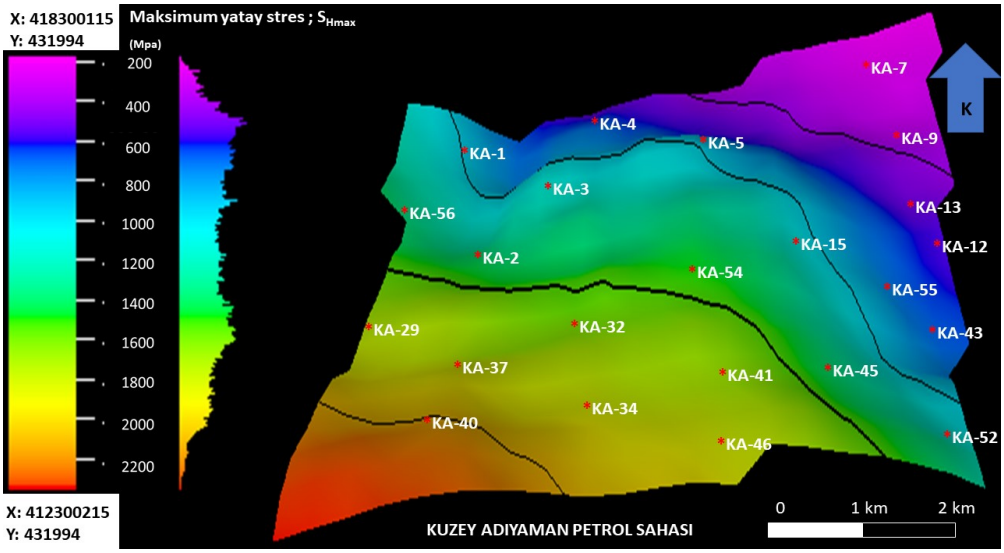
Şekil 5. Şelmo Formasyonu'nun stratigrafik dikme kesiti [11,29]'dan değiştirilerek yeniden hazırlanmıştır

Minimum Yatay Stres (Sh_{min})

Sh_{min}, yer altındaki en düşük yatay sıkışma yönünü ifade eder ve Sh maksimuma dik doğrultuda gelişir. Bu yönde gelişen kırıklar çoğunlukla küçük ölçekli, sıkışık ve kapalı olup, diyajenetik etkiler nedeniyle düşük geçirgenlik gösterir ve akışkan dolaşımını sınırlar [27].

Kırıkların Sh Yönleri ile Bağıntısı

Sh maksimum yönüne paralel gelişen kırıklar açık ve üretime elverişli olma eğilimindedir. Buna karşılık, Sh maksimuma dik (Sh minimum yönüne paralel) doğrultuda oluşan çatlaklar, daha küçük ölçekte ve kapalıdır. Bu kapalı çatlaklar, deformasyonla gelişen kıvrımlara bağlı olarak gelişir ve düşük iletkenlik gösterir [31]. Sıkışmaya bağlı gelişen sıkışma paternleri, üç boyutlu büklüm geometrilerine bakılarak tahmin edilir [32]. Kuzey Adıyaman sahasında açılan kuyuların XRMI log verilerinden yararlanarak daha önce hesaplanan [8] Shmax değerlerinin bir örneği Şekil 6'da paylaşılmıştır.



Şekil 6. Kuzey Adıyaman petrol sahası Sayındere formasyonu S3 fasiyesinde eosen-miyosen tektonizması sırasında gelişen en yüksek yatay stres (Shmax) değerlerinin dağılım haritası [8]

Kuyuların Tektonik Konumlara Göre Sınıflandırılması ve Sonuçları

Çalışılan kuyular, tektonik yerleşimlerine göre sınıflandırılmıştır (doğrultu atımlı fay, ters fay, normal fay, yükselen/düşen blok). Regresyon analizleri sonucunda:

- Doğrultu atımlı fay rejimi: r = 0,91 (en yüksek korelasyon), Ters fay düşen blok: $R^2 = 0,52$
- $\mu \geq 0,85$ olduğunda regresyon katsayıları:
- Doğrultu atımlı rejim → 0,56, Ters fay yükselen blok → 0,71
- Ters fay düşen blok → 0,62, Normal fay yükselen blok → 0,57.Normal fay düşen blok → 0,63

Bu sonuçlara göre, en yüksek regresyon katsayısı $R^2 = 0,71$ ile ters fay yükselen blok rejiminde elde edilmiştir (Çizelge 1., Çizelge 2., Çizelge 3., Çizelge 4., Çizelge 5. ve Çizelge 6.)

Çizelge 1. Adıyaman Bölgesinde doğrultu atımlı faylarla denetlenen kuyuların [8] kritik stres ve rezervuar analizi (Çalışma metodu [14]'den yararlanılmıştır)

Doğrultu atımlı fay rejimi; RXR=0,56		**Kuyu adları**											
	Değişken	DD-11	Ş-7	KA-13	KA-20	DD-3	KA-17	KA-18	KA-26	DD-6	KA-19	KA-30	KA-31
1	**P** Kuyu performansı (Tam açıkken bbl/gün)	225	123,0	259,1	427,9	329,5	349,8	374,8	304	225,8	400,8	115,3	80,3
2	**L** Kuyu rezervuar temas uzunluğu (M)	0,5	6,0	4,9	3,2	2,5	3,8	3,6	2,2	1,9	3,4	1,7	1,6
3	**M** 1-3 Toplam çatlak tip sayısı	1	4,0	10,3	6,7	5,1	8,0	7,6	4,6	3,9	7,1	3,6	3,4
4	**A** Üretken çatlaklar	0,4	2,0	3,8	2,4	1,9	2,9	2,8	1,7	1,4	2,6	1,3	1,2
5	**B** Üretken çatlakların 11 no'lu kuyuya oranı	0,2	1,5	1,6	1,0	0,8	1,3	1,2	0,7	0,6	1,1	0,6	0,5
6	**C** Kritik stres altındaki Mü değeri 0,6'dan büyük olan üretken çatlakların sayısal yoğunluğu (çatlak /metre)	0,5	4,3	4,8	3,1	2,4	3,7	3,5	2,1	1,8	3,3	1,7	1,6
7	**D** Kritik stres altındaki Mü değeri 0,5'den büyük olan 1. +2. tip çatlakların sayısal yoğunluğu (çatlak /metre)	0,5	4,5	4,9	3,2	2,5	3,8	3,6	2,2	1,9	3,4	1,7	1,6
8	**E** Kritik stres altındaki Mü değeri 0,6'dan büyük olan 1.+2. tip üretken çatlakların sayısal yoğunluğu (çatlak /metre)	0,3	3,2	3,6	2,3	1,8	2,8	2,6	1,6	1,4	2,5	1,3	1,2
9	**F** Kritik stres altındaki Mü değeri 0,7'den büyük olan 1.+2. tip çatlakların sayısal yoğunluğu (çatlak /metre)	1	9,7	10,7	7,0	5,4	8,4	7,9	4,8	4,1	7,4	3,8	3,5

Doğrultu atımlı fay rejiminde jeomekanik verilerin birbirleri arasındaki pozitif ve negatif korelasyonları incelendiğinde;

Güçlü Pozitif Korelasyon:
Rezervuar Temas Uzunluğu (r = +0.92), **1-3 Toplam Çatlak Tip Sayısı** (r = +0.91)
Üretken Çatlaklar (r = +0.89), ***Zayıf Negatif Korelasyon:***
Mü >0.7 Olan Çatlak Yoğunluğu (r = -0.22)

Doğrultu atımlı fay rejimlerinde, Yüksek rezervuar temas uzunluğu ve çatlak sayısı, performansı %90+ doğrulukla artmaktadır. Ancak, çok yüksek stresin (Mü>0.7) çatlak verimliliğini düşürdüğü hesaplanmıştır.

Çizelge 2. Adıyaman Bölgesinde ters faylarla yükselen bloktaki kuyuların [8] kritik stres ve rezervuar analizi (Çalışma metodu [14] kayak olarak kullanılmıştır)

Ters fay yükselen blok rejimi; RXR=0,71		**Kuyu adları**											
	Değişken	DŞ-9	KA-1	KA-2	DŞ-4	Ş-16	KA-24	KA-5	KA-6	KA-9	KA-3	KA-4	KA-29
1 P	Kuyu performansı (Tam açıkken bbl/gün)	4,8	348,7	327,8	49,5	421,4	436,7	272,3	256	212,6	308,2	289,7	154,5
2 L	Kuyu rezervuar temas uzunluğu (M)	0,8	10,3	9,7	1,3	1,3	2,5	8,1	7,6	6,3	9,1	8,6	1,8
3 M	1-3 Toplam çatlak tip sayısı	1,7	21,6	20,3	2,8	2,6	5,2	16,9	16	13,2	19,1	18,0	3,8
4 A	Üretken çatlaklar	0,6	10,0	9,0	1,0	1,0	1,9	6,2	5,8	4,8	7,0	6,6	1,4
5 B	Üretken çatlakların 11 no'lu kuyuya oranı	0,3	3,4	3,2	0,4	0,4	0,8	2,6	2,5	2,1	3,0	2,8	0,6
6 C	Kritik stres altındaki Mü değeri 0,6'dan büyük olan üretken çatlakların sayısal yoğunluğu (çatlak /metre)	0,8	10,0	9,4	1,3	1,2	2,4	7,8	7,3	6,1	8,8	8,3	1,8
7 D	Kritik stres altındaki Mü değeri 0,5'den büyük olan 1. +2. tip çatlakların sayısal yoğunluğu (çatlak /metre)	0,8	10,3	9,7	1,3	1,3	2,5	8,1	7,6	6,3	9,1	0,5	1,8
8 E	Kritik stres altındaki Mü değeri 0,6'dan büyük olan 1.+2. tip üretken çatlakların sayısal yoğunluğu (çatlak /metre)	0,6	7,5	7,1	1,0	0,9	1,8	5,9	5,5	4,6	6,6	6,3	1,3
9 F	Kritik stres altındaki Mü değeri 0,7'den büyük olan 1.+2. tip çatlakların sayısal yoğunluğu (çatlak /metre)	1,8	22,6	21,2	2,9	2,8	5,4	47,6	17	13,7	19,9	18,7	4,0

Güçlü Pozitif Korelasyon: ***Rezervuar Temas Uzunluğu*** (r = +0.93); ***Mü >0.6 Olan Çatlaklar*** (r = +0.89).
Negatif Korelasyon: ***Mü >0.7 Olan Çatlaklar*** (r = -0.37)

Ters fay yükselen blok rejiminde; özellikle KA-1 (348 bbl/gün) ve KA-2 (327 bbl/gün) kuyuları özelinde: Yüksek temas uzunluğu (10,34 m, 9,72 m) ve optimum stres (Mü=0.6; 1.-3. Tip Toplam Çatlak Sayısı: 21.6; 20.3)) ile en yüksek değerde hidrokarbon üretim verimliliği olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 3. Adıyaman Bölgesinde ters fayların taban bloğundaki kuyuların [8] kritik stres ve rezervuar analizi (Çalışma metodu [14]'ün önceki sonuçları dikkate alınmıştır)

Ters fay yükselen blok rejimi; RXR=0,62		**Kuyu adları**										
	Değişken	DŞ-11	Ş-1	KA-16	DŞ-1	AL-17	KA-7	KA-8	KA-27	KA-28	KA-41	KA-10	KA-11
1 P	Kuyu performansı (Tam açıkken bbl/gün)	60	68,8	325,8	34,1	30,8	240,6	226,2	248	198,6	173,8	199,8	218,8
2 L	Kuyu rezervuar temas uzunluğu (M)	1,3	1,5	4,1	1,2	1,2	7,1	6,7	2,1	2,0	0,4	5,9	5,6
3 M	1-3 Toplam çatlak tip sayısı	2,8	3,2	8,6	2,5	2,6	14,9	14,0	4,3	4,1	0,8	12,4	11,6
4 A	Üretken çatlaklar	1,0	1,2	3,1	0,9	1,0	5,5	5,1	1,6	1,5	0,3	4,5	4,3
5 B	Üretken çatlakların 11 no'lu kuyuya oranı	0,4	0,5	1,3	0,4	0,4	2,3	2,2	0,7	0,6	0,1	1,9	1,8
6 C	Kritik stres altındaki Mü değeri 0,6'dan büyük olan üretken çatlakların sayısal yoğunluğu (çatlak /metre)	1,3	1,5	4,0	1,2	1,2	6,9	6,5	2,0	1,9	0,4	5,7	5,4
7 D	Kritik stres altındaki Mü değeri 0,5'den büyük olan 1. +2. tip çatlakların sayısal yoğunluğu (çatlak /metre)	1,3	1,5	4,1	1,2	1,2	7,1	6,7	2,1	2,0	0,4	5,9	5,6
8 E	Kritik stres altındaki Mü değeri 0,6'dan büyük olan 1.+2. tip üretken çatlakların sayısal yoğunluğu (çatlak /metre)	1,0	1,1	3,0	0,9	0,9	5,2	4,9	1,5	1,4	0,3	4,3	4,1
9 F	Kritik stres altındaki Mü değeri 0,7'den büyük olan 1.+2. tip çatlakların sayısal yoğunluğu (çatlak /metre)	2,9	3,3	8,9	2,6	2,7	15,6	14,6	4,5	4,2	0,8	12,9	12,2

Güçlü Pozitif Korelasyon: **Üretken Çatlak Yoğunluğu (Mü >0.6)** (r = +0.88), **1-3 Toplam Çatlak Sayısı** (r = +0.86). ***Zayıf İlişki***: ***11 No'lu Kuyu Oranı*** (r = +0.24)

Ters fay düşen blok rejiminde, KA-16 (325 bbl/gün) yüksek üretken çatlak yoğunluğu (3.95 çatlak/metre) ile kendi grubu dahilindeki en iyi performansa sahip kuyu olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4. Adıyaman bölgesinde normal faylanma sonucunda yükselen blokta yer alan kuyuların [8] kritik stres ve rezervuar analizi (Çalışma metodu [14]'ün önceki sonuçlarından destek alınmıştır)

Normal fay yükselen blok rejimi; RXR=0,57		**Kuyu adları**											
	Değişken	KA-22	KA-23	DŞ-21	KA-14	KA-15	KA-25	Ş-5	KA-27	KA-28	DD-5	DD-8	KA-21
1 P	Kuyu performansı (Tam açıkken bbl/gün)	485	515,6	12,8	280,5	302,7	366,4	335,1	248	198,6	268,1	253,6	5,3
2 L	Kuyu rezervuar temas uzunluğu (M)	2,8	2,7	0,8	4,6	4,4	2,3	2,3	2,1	2,0	0,5	0,5	0,9
3 M	1-3 Toplam çatlak tip sayısı	5,9	5,5	1,6	9,7	9,1	4,9	4,8	4,3	4,1	1,1	1,0	1,9
4 A	Üretken çatlaklar	2,2	2,0	0,6	3,5	3,3	1,8	1,7	1,6	1,5	0,4	0,4	0,7
5 B	Üretken çatlakların 11 no'lu kuyuya oranı	0,9	0,9	0,3	1,5	1,4	0,8	0,7	0,7	0,6	0,2	0,2	0,3
6 C	Kritik stres altındaki Mü değeri 0,6'dan büyük olan üretken çatlakların sayısal yoğunluğu (çatlak /metre)	2,7	2,6	0,7	4,5	4,2	2,3	2,2	2,0	1,9	0,5	0,5	0,9
7 D	Kritik stres altındaki Mü değeri 0,5'den büyük olan 1. +2. tip çatlakların sayısal yoğunluğu (çatlak /metre)	2,8	2,7	0,8	4,6	4,4	2,3	2,2	2,1	2,0	0,5	0,5	0,9
8 E	Kritik stres altındaki Mü değeri 0,6'dan büyük olan 1.+2. tip üretken çatlakların sayısal yoğunluğu (çatlak /metre)	2,1	1,9	0,6	3,4	3,2	1,7	1,7	1,5	1,4	0,4	0,4	0,7
9 F	Kritik stres altındaki Mü değeri 0,7'den büyük olan 1.+2. tip çatlakların sayısal yoğunluğu (çatlak /metre)	6,2	5,8	1,7	10,1	9,5	5,1	5,0	4,5	4,2	1,2	1,1	2,0

Güçlü Pozitif Korelasyon: **Rezervuar Temas Uzunluğu** (r = +0.96); **1-3 Toplam Çatlak Sayısı** (r = +0.94) ***Nötr Parametre:*** **Mü >0.5 Olan Çatlak Yoğunluğu** (r = +0.08)

Normal fay yükselen blok rejiminde, performans doğrudan rezervuar erişimiyle ilişkili olduğu hesaplanmıştır. Bu rejimde açılan kuyulardan; KA-23 (515 bbl/gün) ve KA-22 (485 bbl/gün) yüksek temas uzunluğu (2.65-2.82 m) ile öne çıkmaktadır.

Çizelge 5. Adıyaman bölgesinde normal faylanmalarla tavan blok üzerinde yer alan kuyuların [8] kritik stres rezervuar analizi (Çalışma metodu [14]'ün önceki sonuçları referans alınmıştır)

Normal fay yükselen blok rejimi; RXR=0,63		**Kuyu adları**										
	Değişken	DŞ-6	KA-12	Ş-2	AL-2	AL-9	AL-11	DŞ-12	DŞ-23	DŞ-2	DŞ-4	DŞ-5	Ş-1
1 P	Kuyu performansı (Tam açıkken bbl/gün)	8,3	238,6	58,6	199,0	176,1	177,9	173,1	248	198,6	16,9	12,4	371,0
2 L	Kuyu rezervuar temas uzunluğu (M)	0,9	5,2	1,4	0,4	0,4	0,4	0,4	2,1	2,0	1,0	1,0	11,0
3 M	1-3 Toplam çatlak tip sayısı	1,8	11,0	3,0	0,9	0,9	0,9	0,8	4,3	4,1	2,1	1,9	23,0
4 A	Üretken çatlaklar	0,7	4,0	1,1	0,3	0,3	0,3	0,3	1,6	1,5	0,8	0,7	11,0
5 B	Üretken çatlakların 11 no'lu kuyuya oranı	0,3	1,7	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,7	0,6	0,3	0,3	4,0
6 C	Kritik stres altındaki Mü değeri 0,6'dan büyük olan üretken çatlakların sayısal yoğunluğu (çatlak /metre)	0,8	5,1	1,4	0,4	0,4	0,4	0,4	2,0	1,9	1,0	0,9	9,0
7 D	Kritik stres altındaki Mü değeri 0,5'den büyük olan 1. +2. tip çatlakların sayısal yoğunluğu (çatlak /metre)	0,9	5,2	1,4	0,4	0,4	0,4	0,4	2,1	2,0	1,0	1,0	11,0
8 E	Kritik stres altındaki Mü değeri 0,6'dan büyük olan 1.+2. tip üretken çatlakların sayısal yoğunluğu (çatlak /metre)	0,6	3,8	1,0	0,3	0,3	0,3	0,3	1,5	1,4	0,7	0,7	8,0
9 F	Kritik stres altındaki Mü değeri 0,7'den büyük olan 1.+2. tip çatlakların sayısal yoğunluğu (çatlak /metre)	1,9	11,4	3,1	1,0	0,9	0,9	0,8	4,5	4,2	2,2	2,0	24,0

Güçlü Pozitif Korelasyon: **Üretken Çatlaklar** (r = +0.85), **Mü >0.6 Olan Çatlak Yoğunluğu** (r = +0.82) ***Negatif Korelasyon***: **Mü >0.7 Olan Çatlak Yoğunluğu** (r = -0.41)

Normal fay düşen blok rejiminde, düşük stres altında (Mü <0.6) açılan çatlaklar performansı 2.5 kat artırırken (ör: KA-12: 238 bbl/gün), yüksek stresli çatlaklar verimi düşürdüğü gözlemlenmiştir. (DŞ-6: 8.34 bbl/gün).

Çizelge 6. Tektonik rejimlerdeki ortalama kuyu performanları ile keomekanik değişkenleri özetler çizelge

Tektonik rejim	Kuyu ortalama performansı (bbl/gün)	Jeomekanik değişken özeti
Normal fay (Yükselen)	338.5 (KA-23: 515, KA-22: 485)	Rezervuar temas uzunluğuyla en güçlü korelasyon (R^2 = +0.96)
Doğrultu atımlı	272.1 (KA-20: 427, KA-18: 374)	Yüksek çatlak çeşitliliği (+0.91) ve düşük stres avantajı (μ<0.7)
Ters fay (Yükselen)	256.2 (KA-24: 436, KA-1: 348)	Temas uzunluğu (R^2 =+0.93) + μ=0.6 optimizasyonu (R^2 = +0.89)
Ters fay (Düşen)	192.9 (KA-16: 325, KA-11: 218)	μ>0.6, üretken çatlak yoğunluğunda en yüksek etki (R^2 =+0.88)
Normal fay (Düşen)	148.2 (KA-12: 238, Ş-1: 371)	Düşük performans varyasyonu; yüksek stres riski (μ>0.7'de R^2 = -0.41)

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Petrol-doğalgaz aramacılığında: i) En uygun verimli rezervuar çatlaklarını oluşturacak olan blok konumları ii) Jeomekanik değişkenlerin de gözetilmesi gerektiğini bilimsel olarak kanıtlamıştır. Açılacak olan yeni kuyularda söz konusu iki özelliğin birlikte değerlendirildiğinde petrol-doğalgaz keşif ve üretim olasılığını arttırmak açısından önem arz etmektedir.

Bu çalışmada Kampaniyen yaşlı Sayındere Formasyonu çatlak sistemi üzerinde jeomekanik analizler yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre üretken seviyelerin çatlaklı rezervuar modellemesi Sayındere Formasyonu fasiyes analizi sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak yapılmıştır. Söz konusu çalışmada Sayındere Formasyonu S3 fasiyesinin daha önce Şambayat Petrol Sahası'nda perforasyon ile üretilmiş olan çatlak yoğunluğu ile petrol üretim oranı bakımından en yüksek performansı gösteren birim olduğu regresyon analizi sonucu ile ayrıca teyit edilmiştir. Söz konusu regresyon analizi yapılırken çatlak yoğunluğu ile platform karbonatlar arasındaki bağıntıyı ortaya koyan önceki çalışmalar [32-34] yeni sonuçlarla karşılaştırmada ölçüt olarak kullanılmıştır.

Yapılan analizler sonucunda;

- Doğrultu atımlı fay rejimindeki kuyularda kritik çatlak sayısı ile üretim arasında en yüksek korelasyon (R^2=0,91), ters fay-yükselen blok rejiminde ise yüksek korelasyon (R^2=0,71) belirlenmiştir.
- Diğer tektonik rejimlerde korelasyon orta-düşük düzeyde kalmıştır (R^2=0,57–0,63). Tüm rejimlerde rezervuar temas uzunluğu ve üretken çatlak sayısının üretim performansıyla pozitif ilişkili olduğu görülmüştür.
- Mü>0,7 seviyesindeki yüksek stresin çoğu rejimde performansı düşürdüğü, ters fay rejimlerinde ise optimum stres düzeyinin Mü=0,6 olduğu belirlenmiştir. Bu doğrultuda düşük stresli bölgelerde hidrolik çatlatma, yüksek stresli bölgelerde dikey sondaj uygulanması ve ortalama üretim performansı %35 daha yüksek olan ters fay-yükselen blok rejimlerinin hidrokarbon aramacılığında önceliklendirilmesi önerilmektedir.

Katkı Belirtme

Bu çalışma, Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı'nın 02.03.2021 tarihli, E-32573851-773.99-91584 sayılı Genel Müdürlük onayı doğrultusunda; Petrol Kanunu'nun gizlilik hükümleri ve Ortaklık çalışma prensiplerine uygun olarak hazırlanmıştır. TPAO arşivinden alınan veriler, Petrol Kanunu'nun gizlilik hükümleri ve Ortaklık çalışma prensiplerine bağlı kalınarak makale çalışmasında kullanılmış ve verilerin orijinal halleri değiştirilmiştir.

5. KAYNAKLAR

1. Perinçek, D. (1978). *Çelikhan-Sincik-Koçali (Adıyaman İli) alanının jeolojik incelenmesi ve petrol olanaklarının araştırılması.* TPAO Arama Grubu, Rapor No. 1250, 212, Ankara.
2. Dewey, J.F., Hempton, M.R., Kidd, W.S., Şaroglu, F. & Şengör, A.M.C. (1986). Shortening of continental lithosphere: the Neotectonics of Eastern Anatolia-A young collision zone. In: Coward, M.P., Ries, A.C., (Eds), Collision Tectonics. *Geol. Soc. Lond., Spec. Publ. 19*, 3-36.
3. Temple, P. & Yalçın, K. (1958). *Lice section* (Esso Standart (Turkey) Inc.): TPAO Arama Grubu, Arşiv No. 953, Ankara.
4. Thomas, E., Aytuna, S. & Özcan, O. (1986). *Geological field report, Southeast Turkey, Akpınar license: Arco internetional oil and gas company report.* TPAO Arama Grubu, Rapor No. 2247, 62 S., Ankara.
5. Makbule E. (2019). Petrol endüstrileri ve petrol ihraç eden ülkeler. *Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 1*(3), 29-41
6. Akıncı, A.C. ve Ünlügenç, U.C. (2023). 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri: Sahadan jeolojik veriler, değerlendirme ve Adana için etkileri. *Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38*(2), 553-569.
7. USGS, (2023). M 7.8 - *Pazarcik earthquake, Kahramanmaraş Earthquake Sequence.* https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000jllz/executive Erişim tarihi: Mart 2023.
8. Açıkalın, M. (2024). Kuzey Adıyaman Petrol Sahası'nda rezervuar karakteristiklerin süreksizliklerle olan ilişkilerinin belirlenmesi ve komşu petrollü sahalarla korelasyonunun yapılması (Adıyaman/Türkiye). *Doktora tezi.* Çukurova Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği, 256, Adana.
9. Van Wagoner, J.C., Posamentier, H.W., Mitchum, R.M, Vail, P.R., Sarg, J.F., Loutit, T.S. & Hardenbol, J. (1988). An overview of the fundemantals of sequence stratigraphy and key definitions: *In Wilgus, C.K., Hastings, B.S, Kendall, C.G.St. C., Posamentier, H.W., Ross, C.A, And Van Wagoner, J.C. (Eds.), Sea-Level Changes: An Integrated Approach*: *Sepm Special Publication,* 42, 39-45.
10. Güven, A., Dinçer, A., Tuna, M.E. & Çoruh, T. (1991). Stratigraphic evolution of the campanian-paleocene autochtonous succesion of the southeast Anatolia. *Ozan Sungurlu Symposium Proceedings,* 238-261, Ankara.
11. Gossage, D.W. (1956). *Compiled progress report on the geology of part of petroleum district VI, Southeast Turkey: N.V. Turkse Shell.* Report No. Grt. 2, 22, Ankara.
12. Çoruh, T. (1991). *Adıyaman civarında (XI. Bölge kuzeybatısı ve XII. Bölge) yüzeyleyen Kampaniyen-Tanesiyen istifinin biyostratigrafisi ve paleocoğrafik evrimi.* TPAO Araştırma Merkezi, Rapor no. 1656, 101, Ankara.
13. Gossage,, D.W. (1959). *Stratigraphic observations in the tut area of district VI, Southeast Turkey: N.V. Turkse Shell.* Report No. Grt., 18, 48, Ankara.
14. Hennings, P., Allwardt, P., Paul, P., Zahm, C., Reid, R., Alley, H., Kirschner, R., Lee, B. & Hough, E. (2012). Relationship between fractures, fault zones, stress, and reservoir productivity in the Suban Gas Field, Sumatra, Indonesia. *AAPG Bulletin, 96*(4), 753-772.
15. Perinçek, D. (1977). *Çelikhan-Sincik-Koçali (Adıyaman ili) alanının jeolojik incelenmesi.* TPAO Arama Grubu, Rapor No. 1394, 30, Ankara.
16. Sungurlu, O. (1974b). *VI. bölge kuzey sahalarının jeolojisi.* Türkiye İkinci Petrol Kongresi Tebliğleri, 85-107, Ankara.
17. Perinçek, D., Duran, O., Bozdoğan, N. ve Çoruh, T. (1992). Güneydoğu Türkiye'de otokton sedimanter kayaların stratigrafisi ve paleocoğrafik evrimi: Türkiye ve çevresinin tektoniği, petrol potansiyeli. *Ozan Sungurlu Sempozyumu Bildirileri,* (Eds.), 274-305, Ankara.
18. Yılmaz, Y., Tüysüz, O., Yiğitbaş, E., Genç, S.C. & Şengör, A.M.C. (1993). Ophiolitic and metamorphic assemblages of southeast Anatolia and their significance in the geological evolution of the orogenic belt. *Tectonics, 12*, 1280-1297.
19. Robertson, A., Boulton S.J., Taslı, K., İnan, N., Yıldız, A., Yıldırım, N. & Parlak, O. (2016). Late Cretaceous–Miocene sedimentary development of the Arabia continental margin in SE Turkey (Şambayat region): Implications for regional palaeogeography and the closure history of Southern Neotethys. *Journal of Asian Earth Science, 115*, 571-616.
20. Periam, C.E. & Krummenacher, R. (1958). The geology of the eastern part of district VI (Urfa area), Se Turkey (N. V. Turkse Shell report). *Petrol İşleri Genel Müdürlüğü Teknik Arşivi*, Kutu No. 352, Rapor No. 4, 37.. (TPAO Arama Grubu, Rapor No. 836)
21. Sungurlu, O. (1974). *VI. bölge kuzey sahalarının jeolojisi.* TPAO Arama Grubu, Rapor No. 871, 32, Ankara.

22. Aksu, R. (2016). Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde ara faz: Eosen tektoniği. *69. Türkiye Jeoloji Kurultayı (11-15 Nisan 2016, Ankara) Bildiri Özleri Kitabı,* 548.

23. Kellogg, H.E. (1960). Stratigraphic report, Hazro area, Petroleum district V, SE Turkey (American overseas petroleum (Amoseas) report). *Petrol İşleri Genel Müdürlüğü Teknik Arşivi*, Kutu No. 126, Rapor No. 1, 42, Ankara.

24. Ahmed, R. (1975). *Geology of the area Southwest of Dicle (Diyarbakır-Turkey).* TPAO Arama Grubu, Rapor no. 994, 48, Ankara.

25. Açıkbaş, D., Akgül, A. ve Erdoğan, L.T. (1981). *Güneydoğu Anadolu'nun hidrokarbon olanakları ve Baykan-Şirvan-Pervari yöresinin jeolojisi.* TPAO Arama Grubu, Rapor no. 1543, 387, Ankara.

26. Eren, A. ve Sarı, R. (1984). *Güneydoğu Anadolu'da X. bölgenin jeolojik evrimi ve petrol potansiyeli I.* TPAO Arama Grubu, Rapor No. 1867, 52, Ankara.

27. Cater, J.M.L. & Gillcrist, J.R. (1994). Karstic reservoirs of the Mid-Cretaceous Mardin Group, SE Turkey: tectonic and eustatic controls on their genesis, distribution and preservation. *Journal of Petroleum Geology, 17*(3), 253-278.

28. Yılmaz Y. (1996). New evidence and solution to Maden Complex controversy of the Southeast Anatolian Orogen (Turkey). *Geologische Rundschau, 85*, 250-263.

29. Bolat, A. (2012). Adıyaman ili kuzeyinin jeolojisi ve petrol potansiyeli. *Yüksek lisans tezi.* Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, 112, Adana.

30. Bolgi, T. (1961). *V. petrol bölgesi seksiyon ölçmeleri AR/TPO/261 nolu saha ile Reşan-Dodan arası batısındaki sahanın strüktürel etüdleri.* TPAO Arama Grubu, Rapor no. 162, 52, Ankara.

31. Marrett, R. & Laubach, S.E. (1997). Diagenetic controls on fracture permeability and sealing. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34*, 204-204.

32. Barton, C.A., Zoback, M.D. & Moos, D. (1995). Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock. *Geology, 23*, 683-686.

33. Lisle, R. (2000). Predicting patterns of strain from three dimensional fold geometries: neutral surface folds and forced folds. In: Cosgrove, J.W., Ameen, M.S. (Eds.), Forced Folds and Fractures. *Geol. Soc. Lond., Spec. Publ., 169*, 213-221.

34. Wennberg, O.P., Svånå, T., Azizzadeh, M., Aqrawi, A.M.M., Brockbank, P., Lyslo, K.B. & Ogilvie, S. (2006). Fracture intensity vs. mechanical stratigraphy in platform top carbonates: The aquitanian of the asmari formation, Khaviz Anticline, Zagros, SW Iran. *Petrol. Geosc., 12*, 235-245.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

Sodyum Hipoklorit ile Denim Giysi Efektlendirmenin Kumaşın Fiziksel Performansına Olan Etkisinin Farklı Makine Öğrenmesi Teknikleri Kullanılarak Tahminlenmesi

Ebru ÇALIŞKAN [1,a], **Onur BALCI** [1,b], **İbrahim Erdem KALKAN** [2,c], **Cenk ŞAHİN** [2,d], **Abdulkadir AYDIN** [1,3,e]

[1]*Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye*
[2]*Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye*
[3]*Baykan Denim Konfeksiyon A.Ş, Ar-Ge Merkezi, Malatya, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0002-2133-8241; [b]**ORCID**: 0000-0001-6885-7391; [c]**ORCID**: 0000-0002-1997-5436; [d]**ORCID**: 0000-0002-6076-7794; [e]**ORCID**: 0009-0002-6387-2562*

Makale Bilgileri

Geliş : 21.07.2026
Kabul : 23.09.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1971595

Sorumlu Yazar

Ebru ÇALIŞKAN
clskn.ebruu@gmail.com

Anahtar Kelimeler

Denim
Efektlendirme
Sodyum hipoklorit
Tahmin
Makine öğrenmesi

***Atıf şekli:** ÇALIŞKAN, E., BALCI, O., KALKAN, İ.E., ŞAHİN, C., AYDIN, A., (2026). Sodyum Hipoklorit ile Denim Giysi Efektlendirmenin Kumaşın Fiziksel Performansına Olan Etkisinin Farklı Makine Öğrenmesi Teknikleri Kullanılarak Tahminlenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 723-736.*

ÖZ

Denim kumaş, sağladığı konfor, yüksek katma değeri ve artan tüketici talebi nedeniyle giysilik dokuma ürünleri arasında önemli bir yere sahiptir. Denim kumaşlara farklı görünüm ve özellikler kazandırmak amacıyla konfeksiyon sonrasında çeşitli mekanik ve kimyasal efektlendirme işlemleri uygulanmaktadır. Bu işlemler arasında yaygın olarak kullanılan sodyum hipoklorit ile ağartma prosesi, kimyasal ve ısıl etkileri nedeniyle özellikle doğal lif esaslı denim kumaşların fiziksel performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Üreticiler bu etkileri belirlemek amacıyla çoğunlukla ön denemelere veya deneyime dayalı yöntemlere başvurmaktadır. Bu çalışmada, kumaş ve proses parametreleri kullanılarak denim giysilerin önemli fiziksel performans özelliklerinin tahmini için farklı makine öğrenmesi yöntemleri geliştirilmiştir. Böylece hatalı üretimin veya ön deneme sayısının azaltılmasıyla verimli ve sürdürülebilir üretimin sağlanması amaçlanmıştır. Sonuçlar, özellikle XGBoost ve Rastgele Orman modellerinin değerlendirilen çıktıların çoğunda %15'in altında OMYH değerleri ile düşük hata oranları sağladığını göstermiştir.

Prediction of the Effects of Sodium Hypochlorite-Based Denim Garment Finishing on Fabric Physical Performance Using Different Machine Learning Techniques

Article Info

Received : 21.07.2026
Accepted : 23.09.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1971595

Corresponding Author

Ebru ÇALIŞKAN
clskn.ebruu@gmail.com

Keywords

Denim
Effecting
Sodium hypochlorite
Prediction
Machine learning

***How to cite:** ÇALIŞKAN, E., BALCI, O., KALKAN, İ.E., ŞAHİN, C., AYDIN, A., (2026). Prediction of the Effects of Sodium Hypochlorite-Based Denim Garment Finishing on Fabric Physical Performance Using Different Machine Learning Techniques. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 723-736.*

ABSTRACT

Denim fabric is one of the most demanded woven apparel materials due to its comfort, high added value, and increasing consumer demand. Various mechanical and chemical finishing processes are applied after garment manufacturing to obtain different visual effects and functional properties. Among these processes, sodium hypochlorite bleaching is one of the most widely used treatments; however, its combined chemical and thermal effects may adversely affect the physical performance of denim fabrics, particularly those made from natural fibers. Manufacturers generally rely on trial-and-error approaches or experience-based decisions to evaluate these effects. In this study, different machine learning techniques were developed to predict the key physical performance properties of denim garments using fabric and process parameters. The proposed approach aims to reduce trial production, prevent defective products, and support a more efficient and sustainable manufacturing process. The results showed that, particularly, the XGBoost and Random Forest models achieved low error rates, with MAPE values below 15% for the majority of the evaluated outputs.

1. GİRİŞ

Denim, tekstil alanında çoğunlukla pamuk esaslı ipliklerden üretilen ve dimi dokuma yapısı ile karakterize edilen bir kumaş türü olarak ele alınmaktadır. Geleneksel üretim sürecinde çözgü ipliklerinin indigo boyarmaddesi ile renklendirilmesi, atkı ipliklerinin ise doğal hâlde bırakılması, kumaşın ön ve arka yüzü arasında belirgin bir renk farkı oluşmasına neden olmaktadır. Bu yapıda sıklıkla tercih edilen çözgü ağırlıklı dimi örgü düzeni, denim kumaşa hem mekanik dayanıklılık kazandırmakta hem de kullanım süreci boyunca ortaya çıkan kendine özgü yüzey değişimlerini mümkün kılmaktadır. Lif bileşimi, iplik özellikleri ve dokuma parametreleri birlikte değerlendirildiğinde, denim kumaşın uzun ömürlü kullanım ve zamana bağlı estetik görünüm sunan bir tekstil ürünü olduğu görülmektedir [1]. Denim giysi üretiminde dikim sonrası uygulanan terbiye (yıkama/efektlendirme) işlemleri, ürünün hem estetik görünümünü hem de kullanım konforunu belirleyen en temel aşamadır. Bu süreç, kumaş üzerindeki haşılın sökülmesi ile başlayıp, kumaşa istenen renk tonunu vermek amacıyla yapılan ağartma ve doku üzerinde eskitme etkisi yaratan taş yıkama gibi mekanik işlemleri kapsamaktadır. Özellikle ponza taşları veya selülaz enzimleri ile yapılan mekanik ve kimyasal aşındırmalar, denime o klasik 'vintage (eskitme)' havasını kazandırırken; bıyık ve zımpara gibi lokal efektlendirme teknikleriyle giysiye derinlik katılmaktadır. Günümüzde ise bu geleneksel yöntemlerin yerini, kimyasal ve su tüketimini minimize eden lazer teknolojileri ve sürdürülebilir diğer yıkama metotları almaktadır [2].

Denim giysiler 19.yy da dayanıklı kumaş yapısıyla dikkat çekmiş daha sonrasında estetik görünümüyle tüm moda akımlarının vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. 2025 yılında Türkiye'nin denim giysi ihracatı, hazır giyim sektörü içerisindeki önemli konumunu sürdürmüş ve yıl genelinde yaklaşık 1,4 milyar ABD doları düzeyinde gerçekleşmiştir. İstanbul Hazır Giyim ve Konfeksiyon İhracatçıları Birliği'nin (İHKİB) Ocak–Aralık dönemine ilişkin verilerine göre, Türkiye denim ürünlerini başta Avrupa pazarı olmak üzere geniş bir coğrafyaya ihraç etmeye devam etmiş; ihracatın büyük bölümü ilk 10 ana ticaret ortağı tarafından gerçekleştirilmiştir. Özellikle Hollanda 266,8 milyon ABD doları ile en büyük pazar konumunu korurken, İspanya ve diğer Avrupa ülkeleri de Türkiye'nin temel ihracat destinasyonları arasında yer almıştır. Bu görünüm, Türkiye'nin güçlü üretim altyapısı, kalite odaklı imalat kapasitesi ve Avrupa pazarına yakınlığı sayesinde küresel denim tedarik zincirindeki stratejik rolünü sürdürdüğünü ortaya koymaktadır [3].

Tekstil sektöründe önemli bir paya sahip olan denim giysiler, konvansiyonel tekstil ürünlerine kıyasla üretim süreçleri açısından belirgin farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıklar; iplik boyama, dokuma, konfeksiyon ve son işlemler gibi üretimin çeşitli aşamalarında ortaya çıkmakta olup, denim ürünleri diğer hazır giyim ürünlerinden ayıran temel unsurlar arasında yer almaktadır. Özellikle konfeksiyon aşamasından sonra uygulanan yıkama ve efektlendirme prosesleri, denim giysilerin karakteristik görünümünü, tutumunu ve performans özelliklerini belirleyen en önemli üretim adımıdır [2,4,5] Denim giysilere uygulanan mekanik ve kimyasal işlemler aracılığıyla, halka efekti sayesinde iplik yüzeyine bağlanan indigo boyar madde uzaklaştırılarak giysiye (kumaşa) efekt kazandırılmakta ve rengin açılması (efekt alması) sağlanmaktadır. Denim kumaşların yıkama ve kullanım sonrası kazandığı karakteristik estetik görünüm, büyük oranda boyama aşamasında iplik üzerinde gerçekleşen teknik bir özelliğe dayanmaktadır. 'Halka boyama' olarak adlandırılan bu süreçte, indigo boyarmaddesi pamuk liflerinin merkezine tam olarak nüfuz etmeyerek, sadece ipliğin dış çeperinde tutunmaktadır. İpliğin merkezinin (çekirdeğinin) boyanmadan beyaz kalmasıyla sonuçlanan bu yapısal özellik; taş yıkama, ağartma veya lokal zımparalama gibi bitim işlemleri sırasında yüzeydeki mavi katmanın aşınmasına ve alttaki beyaz liflerin kontrollü bir şekilde açığa çıkmasına imkân tanımaktadır. Dolayısıyla denimin kendine has renk geçişleri ve eskitilmiş görünümü, iplik merkezindeki bu boyasız alanın bir fonksiyonu olarak ortaya çıkmaktadır [2].

Efekt kazandırmak amaçlı uygulanan bu prosesler, uygulama sonrası giysinin performansı üzerinde de oldukça etkilidir. Bu etkinin tespiti için birçok akademik araştırma çalışması yürütülmüş ve çeşitli yayınlarda raporlanmıştır Dalbaşı ve Kayseri, farklı yıkama ve ağartma işlemlerinin denim kumaşların fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerini inceledikleri çalışmalarında, taş yıkama ve kimyasal ağartma uygulamalarının kumaş gramajında azalmaya ve kopma mukavemetinde düşüşe neden olduğunu ortaya koymuşlardır [6]. Benzer şekilde, Khan ve Mondal, taş-ağartma işlemi uygulanmış denim giysilerde çekme dayanımı ve uzama değerlerinin, işlem görmemiş denimlere kıyasla belirgin şekilde azaldığını raporlamışlardır [7]. Farklı ağartma yöntemlerinin denim performansına etkisini karşılaştırmalı olarak ele alan Du ve ark., lazer ağartma ve konvansiyonel kimyasal ağartma işlemlerinin her ikisinin de denim

kumaşların mekanik özelliklerini etkilediğini, ancak konvansiyonel ağartma yöntemlerinin lif hasarını daha fazla artırarak kopma ve yırtılma mukavemetinde daha yüksek kayıplara yol açtığını belirtmişlerdir [8]. Ayrıca, Yıldırım ve ark., endüstriyel yıkama ve ağartma proseslerinin denim kumaşlarda renk açılması ile hava geçirgenliği ve yüzey özelliklerinde değişime neden olduğunu, bu durumun giysi konforu ve kullanım performansı açısından dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır [9]. Benzer şekilde, Oğulata ve Nergis, farklı endüstriyel yıkama proseslerinin denim kumaşların fiziksel ve mekanik performansı üzerindeki etkilerini incelemiş; özellikle taş yıkama ve ağartma uygulamalarının kopma ve yırtılma mukavemeti ile elastikiyet özelliklerinde önemli değişimlere neden olduğunu bildirmişlerdir [10]. Bu çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde, denim kumaşlara uygulanan efektlendirme ve ağartma işlemlerinin yalnızca estetik bir görünüm sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda kumaşın mekanik dayanımı, fiziksel yapısı ve uzun süreli kullanım performansı üzerinde belirleyici bir rol oynadığı anlaşılmaktadır.

Bu işlemler, her ürünün kendine özgü ve tekil bir görünüme sahip olmasına olanak tanımaktadır, denim giysileri katma değerli kılan en önemli unsur da budur. Sodyum hipoklorit (NaOCl), denim kumaşların ağartılmasında yaygın olarak kullanılan bir kimyasaldır. Bu uygulama, indigo boyar maddesinin kromofor yapısının oksidatif yıkımı yoluyla kumaşın rengini açarak "eskitilmiş" bir görünüm kazandırmayı amaçlamaktadır [8]. Ancak, işlem parametrelerinin dikkatli bir şekilde kontrol edilmemesi durumunda kumaşın fiziksel performansı üzerinde istenmeyen etkiler ortaya çıkabilmektedir [9]. Sodyum hipokloritin proses şartlarında kullanım miktarı, süresi ve seviyesi konusunda tamamen edinilmiş tecrübeye dayalı bir reçete uygulaması gerçekleşmektedir. Bu konuda yönetici/operatör tecrübesi ve inisiyatifiyle süreç yönetilmektedir. Son yıllarda tekstil sektöründe süreç optimizasyonu, kalite kontrol, hata tespiti ve sürdürülebilir üretim hedefleri doğrultusunda yapay öğrenme (machine learning, ML), yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmış olsa da sodyum hipoklorit ağartmalarda kullanımına rastlanmamaktadır. Oysaki, özellikle yapay sinir ağları (YSA), çok değişkenli ve deneyime dayalı süreçlerde karar destek sistemi olarak başarılı bir şekilde kullanılabilmektedir. YSA modelleri, geçmiş üretim verilerini analiz ederek, optimum kimyasal dozajı, işlem süresi ve sıcaklık gibi parametrelerin tahminini gerçekleştirebilir [11]; böylece insan inisiyatifine dayalı değişkenliği azaltarak daha sürdürülebilir ve standart bir üretim elde edilmesine olanak tanımaktadır.

Son yıllarda, yapay zeka ve makine öğrenimi teknikleri tekstil alanında kalite kontrol ve kumaşın fiziksel performans özelliklerini tahmin etmek için de yaygın şekilde kullanılmaktadır. Buna paralel olarak, tekstil kalite kontrol süreçlerinde görüntü analizi, istatistiksel proses kontrol ve deney tasarımı gibi veri odaklı yöntemlerin kullanımına yönelik çalışmalar da artış göstermiştir [12]. Örneğin, makine öğrenmesi modelleri kullanılarak havlu kumaşların kopma mukavemeti, hava geçirgenliği ve hidrofilite gibi fiziksel özelliklerinin yüksek doğrulukla tahmin edilebildiği gösterilmiştir [13]. Benzer şekilde, iplik kalite özelliklerinin görüntü analizi ile objektif olarak değerlendirilebildiği ve deney tasarımı yöntemlerinin kumaş performans özelliklerinin analizinde etkin biçimde kullanılabildiği bildirilmiştir [14]. Ayrıca, yapay zeka tabanlı sistemler pamuklu ve karışım dokuma kumaşların kopma mukavemeti gibi kritik performans değerlerinin tahmininde regresyon, yapay sinir ağları ve diğer öğrenme algoritmalarının etkinliğini ortaya koymuştur, bu da manuel fiziksel testlere duyulan ihtiyacı azaltabilmektedir [15]. Sistematik bir derleme çalışması da, çekme dayanımı, elastikiyet ve bükülme gibi mekanik davranış özelliklerinin tahmininde derin öğrenme ve diğer yapay zeka yaklaşımlarının yüksek doğruluk performansı sergilediğini ve bu yöntemlerin tekstil performans tahmininde önemli bir araç haline geldiğini raporlamıştır [16]. Bu teknolojilerin sodyum hipoklorit gibi yüksek riskli kimyasal uygulamalara entegre edilmesi, proses güvenliğini artıracağı gibi çevresel etkilerin de azaltılmasına katkı sağlayacaktır. Kimyasal ağartma proseslerinin daha veri temelli, tekrarlanabilir ve sürdürülebilir bir hale getirilmesi oldukça önemlidir. Yapay öğrenme teknikleri sayesinde operatör bağımlılığının azaltılması, deneysel Ür-Ge maliyetlerin düşürülmesi ve proses çıktılarının daha hassas şekilde kontrol edilebilmesi mümkündür. Böylece, denim üretiminde üretim süreçlerinin kontrolü dijitalleştirilerek hem ürün kalitesi hem de çevresel kaygılar açısından daha kararlı bir üretim sistemine katkı sağlanabilecektir.

Bu çalışmada; denim giysi üretimindeki yapay öğrenme odaklı performans tahmini konusundaki eksiklerin kapatılması ve bu alanda gelişme kaydedilmesi amaçlanmıştır. Farklı yapay öğrenme teknikleri kullanılarak denim giysilere uygulanan sodyum hipoklorit ile yapılan efektlendirme işleminin kumaşın fiziksel performansı (kalitesi) üzerindeki etkisinin tahmin edilmesi hedeflenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Çalışma kapsamında 50 adet, farklı konstrüktif özelliğe sahip, denim özellikli dokuma kumaş kullanılmıştır. Kumaşın denim özellikli olması demek, çözgü ipliğinin indigo boyarmadde ile renklendirilmiş, atkı ipliğinin beyaz ve yapının dokuma tekniği ile elde edilmesi anlamına gelmektedir [17]. Bu denim kumaşlar seçilirken 5 temel kumaş özelliği kriter olarak referans alınmıştır. Bu 5 kumaş özelliği ve alt seviyeleriyle birlikte, kumaş girdisi oldukça geniş bir tabanda genelleştirilebilmiştir. Bu da modellerin yaygın etkisi ve başarısı için önemli olmuştur.

Kriter 1-Kumaş (çözgü ipliği) rengi: Seçilecek kumaşların tamamının renklendirilmesi indigo boyarmadde ile yapılmış olup, üç ayrı teknik kullanılmıştır. Bunlar saf indigo, bottom ve top boyama teknikleri olarak tanımlanmaktadır. Saf indigo boyamada, çözgü iplikleri yalnızca indigo boyarmadde kullanılarak boyanmakta ve iplik kesitinde belirgin bir halka boyama yapısı oluşmaktadır. Bottom boyama tekniğinde, indigo boyamaya ek olarak iplikler önceden açık renkli bir boyarmadde (genellikle sülfür) ile boyanmakta, ardından üzerine indigo uygulanmaktadır; bu sayede iplik çekirdeğinde ek bir renk tabakası oluşturulmaktadır. Top boyama tekniğinde ise indigo boyamadan sonra ipliklere ikinci bir boya uygulanmakta ve iplik yüzeyinde ilave bir renk katmanı elde edilmektedir. Bu üç teknik arasındaki temel fark, indigo boyarmaddenin iplik kesitindeki konumu ve yardımcı boyaların uygulama sırasıdır; bu durum, denim kumaşların yıkama ve ağartma işlemleri sonrası renk açılma davranışını ve efekt karakterini doğrudan etkilemektedir [2].

Kriter 2-Boyama makinesi tipi: Slasher ve halat boyama makineleri ile renklendirilen tipler seçilmiştir. Slasher boyamada çözgü ipliği açık en halinde ve tek tek yan yana dizili şekilde boyanırken, halat boyamada 350-400 adet iplikten oluşan ve bu şekildeki 36 adet halatın yan yana geldiği materyal boyanmaktadır [17]. Bu iki tekniğin efekt alabilme ve efekt sonrası renk derinliğindeki olası etkisi sebebiyle değişken olarak kabul edilmiş ve iki yöntemle renklendirilmiş kumaşlar tercih edilmiştir.

Kriter 3-Kumaş elastikiyeti: Denim kumaşlar için en önemli seçim kriterlerinden birisidir. Giyim konforunu direkt olarak etkileyen bir kriter olup, elastikiyet performansı ve kalıcılığı yaş-ısıl proseslerden etkilenme potansiyeline sahiptir [18]. Bu ana kriter rijit (elastan içermeyen), konfor (%18-25 elastikiyete sahip), power elastik (%30-40 elastikiyete sahip), süper elastik (%40-60 elastikiyete sahip) olarak tanımlanmıştır.

Kriter 4-Kumaş gramajı: Denim kumaşların en yaygın tanımlayan 8 onz-12 onz aralığındaki tipler seçilmiştir.

Kriter 5-Kumaş konstrüksiyonu: Çalışma kapsamında farklı dokuma konstrüksiyonlarına sahip denim kumaşlar kullanılmıştır. Kullanılan kumaşlar 3/1 Z dimi, 3/1 S dimi, 2/1 Z dimi, 4/1 saten ve 3/1 kırık dimi konstrüksiyonlarından oluşmaktadır. Farklı konstrüktif özelliklere sahip kumaşların çalışmaya dahil edilmesiyle, veri setinin farklı dokuma yapısına sahip denim kumaşları kapsaması sağlanmıştır.

Çalışma için yukarıdaki 5 temel kriterde, 50 adet farklı denim dokuma kumaş temin edilmiştir.

2.2. Metot

Deneysel çalışma aşağıdaki sistematikte ve uygulama adımları izlenerek yürütülmüştür.

Adım 1. Kumaş temini: Ham kumaşı temsil etmektedir. Çalışmada kullanılan denim kumaşlar, herhangi bir yıkama, ağartma veya efekt işlemi uygulanmamış, yalnızca dokuma ve indigo boyama aşamalarını tamamlamış halde temin edilmiştir. Ağartma proseslerinin etkilerini değerlendirebilmek amacıyla farklı yapı ve özelliklere sahip toplam 50 tip denim kumaş, deney planına uygun olarak seçilmiştir. Bu kumaşlar Bölüm 2.1'de tanımlanan 4 kriteri geniş şekilde temsil edecek şekilde seçilmiştir.

Adım 2. Konfeksiyon: Temin edilen denim kumaşların tamamına, endüstriyel koşulları temsil edecek şekilde kesim ve dikim işlemleri uygulanarak konfeksiyon süreçleri tamamlanmış ve deneysel çalışmada kullanılacak denim giysiler hazırlanmıştır.

Adım 3. Kuru efektlendirme prosesleri (zemin hazırlık): Denim giysi üretim proseslerinde, dikim işlemi sonrasında ürünlere lokal efekt kazandırmak ve ağartma işlemleri için yüzeyde homojen bir zemin oluşturmak amacıyla kuru efektlendirme prosesi uygulanmıştır. Bu kapsamda, VAV marka 900 Power model lazer makinasında, tüm ürünlere aynı desen, 32 DPI çözünürlük ve 60 lazer gücü kullanılarak lazer efektlendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sırasında kumaş yüzeyindeki indigo boyar maddesi lazer etkisiyle kısmen uzaklaştırılmış ve zemin diğer işlemlere hazırlanmıştır.

Adım 4. Ön işlemler: Çalışma kapsamında, 50 tip denim kumaştan elde edilen ve lazer ile kuru işlem uygulanmış giysi panelleri, ağartma prosesleri öncesinde standart olarak zemin ağartma (ön yıkama) işlemine tabi tutulmuştur. Uygulanan ön işlem, belirlenen parametreler doğrultusunda gerçekleştirilmiş; bu kapsamda kumaş yüzeyinin işleme hazırlanması amacıyla 200 Litre su kullanılarak 50°C sıcaklıkta ve 5 dakika süreyle ön yıkama yapılmış, işlem sırasında 2,5 mL/L amilaz enzimi ve 5 mL/L kırık önleyici kimyasal ilave edilmiştir. Bunu takiben, kumaş yüzeyinde mekanik etki oluşturmak amacıyla 100 Litre su ile 15 dakika süreyle taş yıkama işlemi uygulanmış; bu aşamada 150 kg ponza taşı ve 0,2 L/L yumuşatıcı kullanılmıştır. Devamında, 200 Litre su ile 50°C sıcaklıkta ve 10 dakika süreyle gerçekleştirilen işlem sırasında 2,5 mL/L nötr selülaz enzim ilave edilmiştir. Son olarak ise herhangi bir kimyasal madde eklenmeksizin 20 litre su ile 5 dakika süreyle durulama işlemi yapılarak ön işlemler tamamlanmıştır. Tüm bu prosesler Şekil 1'de gösterilen, endüstriyel tipte tamburlu yıkama makinasında (TOLKAR Smartex 3430) gerçekleşmiştir.

Adım 5. Hipoklorit ile ağartma prosesleri: Ön işlemleri tamamlanan denim giysilere, Çizelge 1'de verilen deney planı doğrultusunda 50°C sabit sıcaklıkta sodyum hipoklorit (NaOCl) kullanılarak ağartma prosesleri uygulanmış ve farklı ağartma parametrelerinin denim kumaşların fiziksel performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.



Şekil 1. Tamburlu Yıkama Makinesi (Baykan Denim)

2.2.1. Ağartma Deneyleri ve Veri Toplama

Adım 5 olarak tanımlanan prosesler çalışmanın temelini teşkil edecek verinin sağlandığı deneysel uygulamaları içermektedir. Sodyum hipoklorit ağartma prosesinde 24 farklı yıkama reçetesi için bir deney tasarımı oluşturulmuştur. Denim efektlendirme üzerinden etkisinin en yüksek olduğu düşünülen ve daha önce rapor edilmiş değişkenler "süre, konsantrasyon ve yıkama tekrarı" olmuştur [7]. Bu öznitelikler ve seviyeleri Çizelge 1'de gösterilmiştir. Tam faktöriyel bir deney tasarımı oluşturulmuştur.

Çizelge 1. Deneysel tasarım

Değişken	Seviye			
Ağartma prosesi döngü sayısı	1	2	-	-
Süre (dakika)	3	5	7	-
Ağartıcının konsantrasyonu (mL/L)	10	15	20	25

Uygulamalar 50°C sıcaklığında, Şekil 1'de gösterilen makinede, gerçek işletme şartlarında yapılmıştır. Uygulamalar Baykan Denim Ar-Ge Merkezi alt yapısındaki üretim makineleri kullanılarak yapılmıştır.

Çizelge 1'e göre hazırlanan 24 reçete, Adım 5 kapsamında, Adım 2-3-4 ile işlem görmüş 50 tip numune panel üzerine uygulanmış, sonucunda da 1200 adet efektlendirilmiş denim panel numunesi elde edilmiştir. Adım 4 (Bölüm 2.2) sonunda elde edilmiş (zemin ve ön yıkamaları tamamlanmış) ve Adım 5 sonucunda üretilen 1200 numunenin performansını tespit etmek amacıyla çeşitli fiziksel testler uygulanmıştır. Bu kapsamda, gramaj (gr/m^2), elastikiyet (%), potluk (%), kopma mukavemeti (kgF) ve yırtılma mukavemeti (cN) testleri gerçekleştirilmiştir. Uygulanan bu testlerin standartları Çizelge 2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Uygulanan fiziksel test ve standart bilgileri

Test adı	**İlgili standart**
Gramaj (gr/m^2)	ASTM D 3776
Yırtılma mukavemeti- Çözgü (cN)	EN ISO 13937-1:2000
Yırtılma mukavemeti- Atkı (cN)	EN ISO 13937-1:2000
Kopma mukavemeti- Çözgü (kgF)	TS EN ISO 13934-1
Kopma mukavemeti- Atkı (kgF)	TS EN ISO 13934-1
Elastikiyet (%)	BS 4952
Potluk (%)	ASTM D3107

Belirlenen deney planı (Bölüm 2.2.1) ile kontrollü bir şekilde elde edilen 1200 adet veri elde edilmiştir. Girdi-çıktı yapısı tasarımından önce, denemeler ve testlerden sonra elde edilen veri setinde sürekli değişkenlerin bazı tanımlayıcı özet bilgileri Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Tanımlayıcı istatistikler (Sürekli değişkenler)

Değişken	**Sayı**	**Ortalama**	**Std.**	**Min.**	**25%**	**50%**	**75%**	**Max.**
Onz (yd)	1200	10.64	1.91	6	9.5	10.5	11.5	14.7
İplik numarası (Ne)	1200	11.15	5.19	5.6	8	9	14	30
Sıklık (tel/cm)	1200	19.60	5.14	15	16	18	20.5	42
Elastikiyet (%)	1200	41.94	32.80	0	6	37	70	95
Gramaj (g/m^2)	1200	352.44	61.56	206	325	347.5	388	513
Yırtılma mukavemeti atkı (cN)	1200	4155.14	1182.81	2425	3321	4082.5	4750	8861
Yırtılma mukavemeti çözgü (cN)	1200	4882.96	1221.36	1900	3980	5128	5871	6780
Kumaş elastikiyet (%)	1200	28.48	21.51	2	8	21	52	72
Kumaş potluk (%)	1200	2.28	1.39	0	2	2	2	8
Kopma mukavemeti atkı (kgf)	1200	44.76	12.63	27	35	42	51	80
Kopma mukavemeti çözgü (kgf)	1200	88.22	17.09	56	77	87	96	124
Ağartma tekrarı	1200	1.50	0.50	1	1	1.5	2	2
Süre (dakika)	1200	6	0.82	5	5	6	7	7
Konsantrasyon (mL/L)	1200	27,50	5,59	20	23,75	27,50	31,25	35
Gramaj (g/m^2) *	1200	403.36	67.10	237	371	417	450	537
Yırtılma mukavemeti atkı (cN) *	1200	2503.68	883.18	395	1859.2	2347	3025.25	5717
Yırtılma mukavemeti çöz. (cN) *	1200	3781.31	935.75	1234	3100	3890	4466	9912
Kopma mukavemeti atkı (kgf) *	1200	34.94	15.74	8	23	30	44	91
Kopma mukavemeti çözgü (kgf) *	1200	68.30	18.88	20	54.75	68	81	124
Elastikiyet (%) *	1200	46.85	32.10	4	20	42	76	98
Potluk (%) *	1200	5.39	2.35	2	4	6	8	8

(Std.=Standart sapma, Min.=En küçük, Max.=En büyük,)
** Proses sonrası ölçülen değerleri temsil eden değişkenler*

Çizelge 3'te sürekli değişkenlere ilişkin bilgiler yer alırken Çizelge 4'te veri setinde yer alan kategorik değişkenler gösterilmiştir. Bu çizelgede bu değişkenlerde yer alan kategoriler ve veri setinde görülme sıklıkları özetlenmiştir. Çizelge 3 ve Çizelge 4'de görüldüğü üzere veri setinde hem kumaş yapısal özelliklerine ilişkin hem de proses koşullarına ilişkin değişkenler yer almaktadır. Yapısal değişkenlerden iplik numarası, sıklık, gramaj ve elastanlık parametrelerindeki dağılım, farklı konstrüksiyon ve esneklik özelliklerine sahip kumaş tiplerinin birlikte yer aldığını göstermektedir. Mekanik dayanım özelliklerinde atkı ve çözgü yönündeki kopma ve yırtılma mukavemetlerinin geniş varyasyon sergilemesi, kumaş performansının hem yapısal özelliklere hem de uygulanan proses koşullarına duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 4. Kategorik değişkenlerin değerleri ve görülme sıklıkları

Değişken: Boyama tipi		**Değişken: Dokuma türü**	
Değer	**Frekans**	**Değer**	**Frekans**
Halat	888	*3/1 Z*	936
Slasher	264	*3/1 S*	192
İndigo	48	*2/1 Z*	24
		4/1 Saten	24
		3/1 Kırık dimi	24
Toplam	1200	**Toplam**	1200

Proses parametrelerinde ağartma tekrarı, süre ve konsantrasyon değerlerinin farklı seviyelerde uygulanması, işlem şiddetinin numuneler arasında sistematik biçimde değiştirildiğini ve bu değişkenlerin çıktı performansları üzerinde etkili olabilecek nitelikte olduğunu düşündürmektedir. Çizelge 3'te aynı isimdeki bazı değişkenlerin proses öncesi ve sonrasına ilişkin ölçülen değerleri farklı değişkenler olarak gösterilmektedir. Buna göre proses sonrası gramaj, mukavemet değerleri, elastikiyet ve potluk değerlerinde gözlenen farklılıklar, ağartma işlemi sonrasında kumaş performans özelliklerinin önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. Özellikle dayanım ve elastikiyet parametrelerindeki yüksek değişkenlik proses etkisini belirginleştirirken, potluk değişkeninin daha sınırlı bir aralıkta yoğunlaşması bu özelliğin diğer performans kriterlerine kıyasla daha kararlı bir yapı sergilediğini işaret etmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde hem girdi hem de çıktı değişkenlerinde gözlenen bu çeşitlilik, modelleme çalışmalarında değişkenler arasındaki ilişkilerin öğrenilebilmesi ve güvenilir tahminler yapılabilmesi açısından veri setinin yeterli temsil gücüne sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

2.2.2. Uygulanan Makina Öğrenme Yöntemleri

Farklı makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak koruyucu tahmin modelleri oluşturulmuş ve oluşturulan ağ tasarımları ile bu modeller beslenmiştir. Kullanılan makine öğrenmesi yöntemleri; lineer regresyon (LR), karar ağaçları regresyonu (Decision, Trees, DT), rastgele orman regresyonu (Random Forest, RF) ve aşırı gradyan ayırtma regresyonudur (Extreme Gradient Boosting, XGBoost). Buna ilave olarak sürekli değişkenler üretmeye uygun bir yapay sinir ağı (Artificial Neural Network, ANN) mimarisi de kıyaslama yaklaşımına eklenmiştir.

Doğrusal Regresyon

Doğrusal regresyon, temel olarak regresyon görevlerinde kullanılan ve sürekli bir sayısal çıktıyı tahmin ederek değer kestirimi yapan temel bir istatistiksel araçtır. Doğrusal regresyon modeli, sürekli bir bağımlı değişken (yanıt, y) ile bir veya daha fazla bağımsız değişken (açıklayıcı değişken, x) arasındaki ilişkiyi kurmayı amaçlamaktadır. Model, bu değişkenler arasında doğrusal bir ilişki olduğu varsayımına dayanmaktadır [19,20]. Birden fazla açıklayıcı değişkenin bulunduğu çoklu doğrusal regresyonda model:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \ldots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (1)$$

Şeklinde ifade edilir (Eşitlik 1). Buradaki "doğrusal" ifadesi, yanıt değişkeni (y) ile açıklayıcı değişkenler (x'ler) arasındaki ilişkinin doğrusal olmasını değil, modelin parametreler (β katsayıları) açısından doğrusal olmasını ifade eder. ϵ ise ortalaması sıfır, varyansı bilinmeyen σ^2 olan rastgele hata terimidir [19]. Bir LR modelinin eğitimi, maliyet fonksiyonunu en aza indirecek en uygun parametre değerlerini (β veya θ katsayılarını) bulmayı içerir. Regresyon problemlerinde performans ölçütü olarak sıklıkla Ortalama Kök Hata Kareleri (Root Mean Square Error) kullanılmaktadır. Pratikte ise, aynı sonuca ulaştırdığı için genellikle Ortalama Hata Kareleri (OHK veya MSE) minimize edilmektedir. Doğrusal Regresyon modeli için MSE maliyet fonksiyonu [20]:

$$MSE(X, h_\theta) = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} (\theta^T x^{(i)} - y^{(i)})^2 \quad (2)$$

En iyi doğrusal uyumu elde etmek için eğitim sürecinde genellikle En Küçük Kareler (Ordinary Least Squares) yöntemi kullanılmaktadır (Eşitlik 2). Doğrusal regresyon, sabit ve önceden belirlenmiş sayıda parametreye sahip olduğu için parametrik bir model olarak kabul edilmektedir [20,21].

Karar Ağaçları

Karar ağaçları, hem sınıflandırma (ayrık bir etiket tahmini) hem de regresyon (sürekli bir değer tahmini) görevlerini yerine getirebilen, akış şeması benzeri yapılardır [22]. Karar ağaçları, örnekleri kök düğümden başlayarak bir yaprak düğüme kadar yönlendirerek sınıflandırır; nihai tahmin bu yaprak düğümünde üretilmektedir. Her iç düğüm bir özellik üzerine yapılan bir testi temsil eder ve dallar bu özelliğin alabileceği değerlere karşılık gelmektedir. Ortaya çıkan yapı, özellik değerleri üzerindeki kısıtların birleşimlerini temsil etmektedir [23].

Karar ağaçlarının eğitiminde genellikle CART (Classification And Regression Tree) veya ID3 gibi algoritmalar kullanılmaktadır. Bu algoritmalar, yukarıdan aşağıya doğru işleyen, açgözlü (greedy) bir yaklaşım izleyen ve yinelemeli bölütleme kullanılan yöntemlerdir. Algoritma, en iyi bölünmeyi (bir özellik ve bir eşik değeri) bulmak için arama yapar; amaç, tanımlı bir maliyet fonksiyonunu en aza indirecek şekilde en saf alt kümeleri oluşturmaktır. Karar ağaçları regresyon görevlerinde OHK'nin minimize edilmesini hedefler [21,23].

Karar ağaçları, parametre sayısı eğitimden önce belirlenmediği ve yapı veriye göre uyum sağladığı için parametrik olmayan modeller olarak kabul edilmektedir. Bu esnek yapı, eğer model kısıtlanmaz ise, karar ağaçlarının eğitim verisine aşırı uyum gösterme eğiliminde olmasına neden olmaktadır. Ayrıca karar ağaçları doğası gereği eğitim verisindeki küçük değişikliklere karşı oldukça hassastır (istikrarsızlık); verideki ufak oynamalar bile tamamen farklı ağaç yapılarının oluşmasına yol açabilmektedir [21].

Rastgele Orman

Rastgele Orman (Random Forest, RF), bir grup bireysel tahmin edicinin, özellikle birden fazla karar ağacının, çıktılarını birleştirerek, tek bir tahmin ediciden daha üstün performans elde etmeyi amaçlayan bir topluluk öğrenmesi yöntemidir. Bu modeller, genellikle "bagging" (bootstrap aggregating) yöntemi kullanılarak oluşturulan çok sayıda uzmanlaşmış karar ağacının inşa edilmesini ve bu ağaçların çıktılarının birleştirilmesini içermektedir [22]. RF' ler sağlam, güvenilir ve geniş bir problem yelpazesine uygulanabilir pratik bir yaklaşım sunmaktadır.

Temel mekanizma, birden fazla karar ağacının eğitilmesine dayanır; her bir ağaç genellikle eğitim verilerinin rastgele seçilmiş bir alt kümesiyle eğitilmektedir. Ağaçlar arasında çeşitliliği artırmak için RF algoritması, düğüm bölme sırasında ek bir rastgelelik daha ekler: bir düğüm bölünürken tüm özellikler arasından en iyi özelliği seçmek yerine, yalnızca rastgele seçilmiş bir özellik alt kümesi içinde en iyi bölmeyi aramaktadır. Bu çeşitli ağaçların tahminlerinin ortalaması alınarak, RF modelleri varyansı azaltır ve bireysel karar ağaçlarında görülen yüksek varyans ve istikrarsızlık sorunlarını önemli ölçüde hafifletmektedir [21]. Bu geliştirilmiş sağlamlık sayesinde, RF'ler sınıflandırma ve regresyon problemlerin çoğu zaman başarılı sonuçlar üretebilirmektedirler.

Extreme Gradient Boosting

Extreme Gradient Boosting (XGBoost), Gradient Boosting Machines (GBM) yönteminin [20] yaygın olarak kullanılan bir uygulamasıdır. 2016 ve 2017 yıllarında, derin öğrenmeyle birlikte, yapılandırılmış veri problemlerinde rekabetçi makine öğrenmesinin en baskın yaklaşımlarından biri olmuştur. XGBoost, boosting ailesine ait bir topluluk öğrenmesi yöntemidir. Boosting yöntemleri, birden fazla temel model tahmin edicisini (genellikle karar ağaçları) ardışık olarak eğiterek nihai modeli kademeli şekilde inşa etmektedir. XGBoost'un uyguladığı Gradient Boosting'in temel fikri, her yeni tahmin edicinin kendisinden önceki modelin yaptığı artık hataları düzeltmesi üzerine kuruludur. Bu, yeni tahmin ediciyi bu hatalara uyacak şekilde eğiterek gerçekleştirilmektedir [22]. Boosting yöntemi, birçok zayıf temel öğreniciyi bir araya getirerek güçlü bir topluluk modeli oluşturmaktadır.

XGBoost, ardışık olarak yeni zayıf öğreniciler eklerken hata veya kayıp fonksiyonunu minimize etmek için gradyan inişi kullanmaktadır. Eğitim sürecinde, önceki modellerin yanlış sınıflandırdığı örneklerin öğrenilmesine özel bir vurgu yapılmaktadır. Bu ardışık ve odaklı yapı nedeniyle boosting, modeldeki yanlılığı azaltma eğilimindedir; ancak aşırı derecede güçlendirilmiş modeller aşırı uyuma yatkın olabilmektedir[20]. XGBoost, algısal olmayan ve yapılandırılmış veri setlerini işlemek için günümüzde mevcut en güçlü algoritmalardan biri olarak kabul edilmektedir.

Yapay Sinir Ağları

Bu çalışmada bir Yapay Sinir Ağı (Artificial Neural Network, ANN) alt kümesi olan Çok Katmanlı Algılayıcı (Multi-Layer Perceptron, MLP) regresyonu kullanılmış olup YSA ve MLP genellikle aynı anlamda kullanılmıştır. Bununla beraber MLP, bir giriş katmanı, bir veya daha fazla gizli katman ve bir çıkış katmanından oluşan, tamamen bağlı, ileri beslemeli bir YSA türüdür. Bir yapay sinir ağı iki veya daha fazla gizli katman içeriyorsa Derin Sinir Ağı (Deep Neural Network, DNN) olarak sınıflandırılır ve bu yapı derin öğrenmenin temelini oluşturmaktadır. Katmanların "derin" olarak adlandırılmasının nedeni, verinin giderek daha anlamlı ve hiyerarşik temsillerini öğrenmeleridir. Derin öğrenme bağlamında, her şey kavramsal olarak bir vektör (geometrik uzayda bir nokta) olarak temsil edilir ve her katman veriye basit bir geometrik dönüşüm uygulanmaktadır [20-22].

Regresyon problemleri için kullanılan tipik ağ mimarisi şunları içermektedir:

- *Gizli Katmanlar*: Bu katmanlar, Rectified Linear Unit (ReLU), Hiperbolik Tanjant (Tanh) gibi aktivasyon fonksiyonları kullanan doğrusal olmayan işlem birimleri içermektedir [24].
- *Çıkış Katmanı*: Skaler regresyon (örneğin ev fiyatı tahmini) için son katman genellikle tek bir birimden oluşur ve herhangi bir aktivasyon fonksiyonu kullanılmamaktadır.

Model, en yaygın olarak Ortalama Kare Hata (Mean Squared Error) (OKH) veya Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error) (OMH) gibi bir maliyet fonksiyonunu minimize ederek eğitilmektedir. Eğitim sırasında kullanılan temel yöntem geri yayılım olup, kaybın ağ ağırlıklarına göre gradyanını verimli biçimde hesaplar ve bu sayede ağırlıkların gradyan inişi yoluyla yinelemeli olarak güncellenmesini sağlamaktadır [20-22]. Yapılandırılmış ve yapılandırılmamış veri setleri üzerinde başarılı bir şekilde çalışabilen YSA mimarileri önemli gelişmelere yol açmıştır.

2.2.3. Modelleme Yaklaşımı

Çalışmada Adım 1'de seçilen 50 adet ham kumaşın test edilmesi sonrası elde edilen fiziksel kalite test değerleri (Bölüm 2.2.1), Adım 1'de seçilen bu kumaşların bazı konstrüktif özellikleri, Adım 5'te uygulanan ve Çizelge 1'de gösterilen yıkama öznitelikleri girdi olarak kullanılmıştır. Çıktı olarak ise Adım 5 sonrasında elde edilen ve testleri yapılan efektli denim numunelerinin fiziksel test değerleri belirlenmiştir. Çizelge 5'te ele alınan probleme uygun girdi ve çıktı yapısı belirtilmiştir. Çizelge 5'te ham kumaş kalite değeri olarak tanımlanan, Adım 1'de seçilen 50 adet kumaşın kalite özelliklerini temsil eden değişkenler boyama tipi, kumaş ağırlığı (Onz/yd^2), iplik numarası (Ne), sıklık, dokuma türü (dimi örgü yapısı) seçilmiştir.

Çizelge 5. Probleme ilişkin değişken modelleme yapısı

Bağımsız değişkenler (Girdiler)	Boyama tipi Elastiklik (%) Onz/yd^2 İplik numarası (Ne) Sıklık (tel/cm) Dokuma türü Ağartma sayısı (adet) Süre (dakika) Konsantrasyon (mL) Ham kumaş kalite değeri (*)
Bağımlı değişkenler (Çıktılar)	Gramaj (gr/m^2) Yırtılma mukavemeti- Atkı (cN) Yırtılma mukavemeti –Çözgü (cN) Kopma mukavemet- Atkı (kgf) Kopma mukavemet- Çözgü (kgf) Elastikiyet (%) Potluk (%)

** İlgili bağımlı değişkenin proses öncesi değerlerini ifade eden değişkeni göstermektedir.*

Çizelge 5'te görüldüğü gibi çalışmada, bu girdilerden yararlanılarak, 7 farklı fiziksel kalite çıktısını tahmin etmek üzere, beş ayrı makine öğrenmesi yöntemi ile tahmin modelleri kurulmuştur. Bu amaçla, makine

öğrenmesi modellerinin eğitilmesinde kullanılmak üzere girdi setine dayalı model tasarımı oluşturulmuştur. Model tasarımında kullanılan girdi–çıktı değişkenleri Çizelge 5'te gösterildiği şekilde özetlenmiştir. Tasarım yapısının, 7 ayrı çıktı değişkeni ile eşleştirilmesi sonucunda toplam 5 adet bağımsız model geliştirilmiştir. Her çıktı bağımsız bir değer olarak modellenmiştir.

3. SONUÇLAR

3.1. Eğitim ve Doğrulama

Model, belirlenen beş makine öğrenmesi tekniği kullanılarak ayrı ayrı eğitilmiş ve elde edilen sonuçlar test veri seti üzerinden değerlendirilmiştir. Modelin doğrulama performans karşılaştırmalarında, tahmin doğruluğunu en iyi yansıtan ölçütlerden biri olan Ortalama Yüzde Mutlak Hata (Mean Absolute Percentage Error) (OMYH) metriği dikkate alınmıştır.

Doğrulama çalışması ile optimum hiper parametre düzeninin seçilmesi sağlanmıştır. Bir hiper parametre doğrudan modele ait olmayan değeri öğrenme süreci tarafından optimize edilemeyen parametresidir. Bu nedenle, eğitimden önce belirlenmesi gerekir ve eğitim süresince sabit kalması gerekmektedir [24]. Bu çalışmada özellikle çok hiper parametre barındıran 3 yöntem için parametre ayarlaması yapılmıştır: RF, xGBoost, YSA. Optimizasyon yöntemi olarak 3 katlı çapraz doğrulama ızgara araştırma yöntemi kullanılmıştır. Izgara araştırma yöntemi ise belli bir sezgisel çerçevesinde veya yaygın kullanıma göre aday hiper parametrelerin belirlenmesi ve tüm adaylarla oluşturulabilecek kombinasyonların tamamının denenmesi ve sonuçların karşılaştırılması şeklindedir. Bununla beraber modellerin kıyaslanmasında bir defalık denemelerde oluşabilecek yanılmaları azaltabilmek için çapraz doğrulama yöntemine başvurulmaktadır. Çapraz doğrulamada, mevcut eğitim seti tekrarlı olarak rassal ve eşit parçalara bölünmekte, her yinelemede bir parça dışarıda bırakılarak model kalan parçalarla eğitilmekte ve dışarıda bırakılan parça kullanılarak performans metriği elde edilmektedir [25].

Tüm hiper parametrelerin, tüm bağımsız modeller ve tüm çıktılar için ayarlanabilmesi amacıyla özellikle ölçeklenebilir bir yönteme ihtiyaç duyulmuştur. En genelleştirilebilir yöntem olmasından dolayı hiper parametre araştırmasında veri setinin rassal bölündüğü senaryodaki eğitim seti dikkate alınmıştır. Hiperparametre ayarı, çalışmada ele alınan model kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada XGBoost modelleri için dört temel hiper parametre ele alınmıştır. Bunlardan Ağaç Sayısı, modelin oluşturacağı ağaç sayısına işaret etmektedir. Değerlerin yükselmesi daha karmaşık modeller oluşacağı yönünde yorumlanmaktadır. Değerin yüksek belirlenmesi aşırı öğrenme sorununu getirebilmektedir. Bu çalışmada 100, 200 ve 300 değerleri için araştırılmıştır. Öğrenme Oranı, her ağacın toplamdaki modele olan katkı miktarını ifade etmektedir. Yavaş veya hızlı öğrenme durumlarını kontrol etmektedir. Bu hiper parametre 0.01, 0.1 ve 0.2 değerleri için denenmiştir. Maksimum Ağaç Derinliği, oluşturulan karar ağaçlarının en fazla kaç derinliğe sahip olacağını belirlemektedir. Bu çalışmada 3, 5 ve 7 değerleri için sonuçlar değerlendirilmiştir. Oluşturulan ağaçların dallara ayrılma noktasında gereken kayıp değeri azalmasını Minimum Bölünme Kazancı yani gamma hiper parametresi ile belirlenmekte olup, 0 kolayca dallara ayrılabilirliğe işaret etmektedir. Her bir bağımlı değişken bazında oluşturulan XGBoost modellerine ait optimum değerler Çizelge 6'da gösterilmiştir.

Çizelge 6. XGBoost için optimum hiper parametre değerleri (3 katlı çapraz doğrulama)

Model	Ağaç sayısı [100,200,300]	Öğrenme oranı [0.01, 0.1, 0.2]	Maks. derinlik [3, 5, 7]	Gamma [0, 0.1 0.2]
Gramaj (g/m^2)	100	0.1	3	0
Yırtılma mukavemeti- Atkı (cN)	100	0.2	3	0
Yırtılma mukavemeti- Çözgü (cN)	100	0.1	3	0
Kopma mukavemeti- Atkı (kgf)	100	0.1	3	0
Kopma Mukavemeti- Çözgü (kgf)	100	0.1	3	0
Elastikiyet (%)	100	0.1	3	0
Potluk (%)	100	0.1	3	0

Rastgele Orman algoritması için Ağaç Sayısı oluşturulan ormandaki ağaçları ifade etmektedir. Bu çalışmada 100, 200 ve 300 değerleri denenmiştir. Maksimum Özellik Sayısı her bir ağaçta düğüm bölümlenmesinde kullanılan öznitelik sayısının hesaplanmasını göstermektedir. Bu anlamda sqrt öznitelik sayısının karekökü iken, log2 öznitelik sayısının log2 değeridir. Bu model grubundaki Maksimum Ağaç

Derinliği XGBoost ile benzer olarak oluşturulan ağaçlardaki derinliğe ifade etmektedir. Bu modele özgü olarak 10, 20 ve 30 değerlerindeki sonuçlar karşılaştırılmıştır. Minimum Bölünme Örnek Sayısı oluşturulan ağaçlarda düğümün bölünmesi için gerekli minimum gözlem sayısına işaret etmekte olup bu çalışmada 2, 5 ve 10 değerleri kullanılmıştır. Söz konusu değerlerde oluşan en iyi hiper parametre düzeni Çizelge 7'de özetlenmiştir.

Çizelge 7. Rastgele orman için optimum hiper parametre değerleri (3 katlı çapraz doğrulama)

Model	Ağaç sayısı [100,200,300]	Maks. özellik sayısı [sqrt, log2]	Maks. derinlik [10, 20, 30]	Min. bölünme örnek sayısı [2, 5, 10]
Gramaj (g/m^2)	200	sqrt	30	10
Yırtılma mukavemeti- Atkı (cN)	300	log2	10	10
Yırtılma mukavemeti- Çözgü (cN)	200	sqrt	20	10
Kopma mukavemeti- Atkı (kgf)	200	sqrt	20	10
Kopma mukavemeti- Çözgü (kgf)	100	log2	20	10
Elastikiyet (%)	100	log2	20	10
Potluk (%)	100	sqrt	20	10

YSA kullanımında hiper parametre sayısı nispeten fazla olmakla beraber ölçeklenebilir olabilmesi için bazı değerler ön denemelerle sabitlenmiştir. Sezgisel olarak gizli katmak kullanımı 1 olarak, Çizelge 8'de Optimizasyon Algoritması olarak yer alan ağırlık güncellemesinde kullanılacak algoritma Adam (Adaptive Momentum) olarak sabit tutulmuştur. Bu tür modellerde Gizli Katman Nöron Sayısı olarak yer alan, model karmaşıklığına karşılık gelen gizli katmandaki nöron sayısı sezgisel olarak 64, 128, 256 ve 512 değerleri kullanılarak denenmiştir. Her nöronun hesaplama değerini dönüştüren fonksiyonlara işaret eden Aktivasyon Fonksiyonu hiper parametresinde kullanılan ReLU değeri çıkış değerlerinin 0, 1 aralığında ifade etmekte iken tanh, -1 ve 1 aralığında ifade etmektedir. Öğrenme Oranı hiper parametresi ağırlıkların güncellenme hızına işaret etmektedir. Bu model grubuna ait optimum hiper parametre düzeni Çizelge 8'de yer almaktadır.

Çizelge 8. Yapay Sinir Ağları için optimum hiper parametre değerleri (3 katlı çapraz doğrulama)

Model	Gizli katman nöron sayısı [64,128,256,512]	Aktivasyon fonksiyonu [ReLU, tanh]	Öğrenme oranı [0.001, 0.01, 0.1]	Optimizasyon algoritması [Adam]
Gramaj (g/m^2)	512	ReLU	0.001	Adam
Yırtılma mukavemeti- Atkı (cN)	512	ReLU	0.01	Adam
Yırtılma mukavemeti- Çözgü (cN)	256	ReLU	0.01	Adam
Kopma mukavemeti- Atkı (kgf)	256	ReLU	0.01	Adam
Kopma mukavemeti- Çözgü (kgf)	256	ReLU	0.01	Adam
Elastikiyet (%)	256	ReLU	0.01	Adam
Potluk (%)	64	ReLU	0.1	Adam

Veri ölçeklemesinin de bu YSA yöntemlerinde etkili sonuçlar doğurabildiği bilinmektedir. Bu nedenle Çizelge 8 ile özetlenmiş çalışmaya ilave olarak [0, 1] ve [-1, 1] aralığında normalize edilerek ölçeklenen eğitim verisi ile yapılan denemeler de optimum model düzeninin elde edilmesinde araştırma konusu yapılmıştır. Bu çalışmalardan eğitim verisinin [0, 1] aralığında ölçeklenmesinin daha etkili olduğu ortaya çıkmıştır. Yalnızca YSA eğitimi için böyle bir veri işleme yapısı tercih edilmiştir.

3.2. Test Sonuçları

Yapay sinir ağları ve makine öğrenmesi algoritmalarının sınandığı ilk tahmin modellerinin sınama çalışmalarında, sürece bağlı tüm performans sonuçları tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu modellerin sınama çalışmaları için deney verisi rastgele olarak %30'u test seti olarak ayrılmış ve %70'i model eğitimi için kullanılmıştır. Kumaş tipi, boyama tipi, onz/yd2, iplik numarası, sıklık, örgü numarası, ağartma sayısı, süre, konsantrasyon, ham kalite değeri girdi parametresi olarak seçilmiştir. Çıktı değeri olarak Adım 5 (Bölüm 2.2) sonrası, testler ile ölçülen fiziksel kalite parametreleri seçilmiştir.

Test sonuçları Çizelge 9'da sunulmuş olup, sonuçların gösteriminde Ortalama Mutlak Hata (OMH) ve Ortalama Mutlak Yüzde Hata (OMYH) (%) değerlerine yer verilmiştir. Bu 2 parametre üzerinden modellerin başarıları değerlendirilmiştir.

Çizelge 9. Bağımlı değişkenler bazında geliştirilen tahmin modellerinin test/performans sonuçları

Değişken/Ölçüm	Lineer regresyon		Karar ağaçları		XGBoost		Rastgele orman		Yapay sinir ağları	
	OMH	OMYH (%)	OMH	OMYH (%)	OMH	OMYH (%)	OMH	OMYH (%)	OMH	OMYH (%)
Gramaj (gr/m²)	19.09	5.12	11.21	2.75	7.19	1.84	**6.99**	**1.80**	8.25	2.12
Yırtılma mukavemeti-Atkı (cN)	361.15	10.64	311.08	9.16	**277.82**	**8.29**	309.61	8.80	303.47	8.53
Yırtılma mukavemeti-Çözgü (cN)	373.25	15.48	332.43	14.01	**281.09**	**12.05**	301.44	12.72	357.47	13.42
Kopma mukavemeti-Atkı (kgf)	8.27	12.63	6.92	10.66	**6.19**	**9.57**	6.43	9.84	7.36	11.72
Kopma mukavemeti-Çözgü (kgf)	4.70	15.68	3.64	10.91	**3.12**	**9.49**	3.15	9.52	3.44	10.21
Elastikiyet (%)	10.02	36.47	6.69	17.23	**4.69**	15.39	4.81	**14.93**	5.82	21.44
Potluk (%)	0.96	22.89	**0.5**	**10.82**	0.51	10.92	0.55	11.19	0.53	12.41

Tahmin yöntemlerinin test verisi üzerinde bağımlı değişkenler bazında sonuçlarının özetini Çizelge 9'a yansıtılmıştır. Çizelge genel olarak incelendiğinde, bağımlı değişkenlerin büyük bir kısmında en iyi performansı gösteren yöntemlere ait Ortalama Mutlak Yüzde Hata (OMYH) değerlerinin %15'in altında kaldığı görülmektedir. Bu durum, ele alınan makine öğrenmesi yaklaşımlarının ilgili fiziksel ve mekanik kumaş özelliklerini tahmin etmede genel olarak yüksek bir doğruluğa sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Performans çıktıları genel bir hiyerarşi içerisinde değerlendirildiğinde; Yapay Sinir Ağları (YSA) modelinin mukavemet, esneklik ve boyutsal kararlılık parametrelerinde genel olarak ağaç tabanlı topluluk modellerinin (XGBoost ve Rastgele Orman) gerisinde kaldığı görülmektedir. Literatürde, mevcut çalışmadaki gibi satır ve sütunlardan oluşan (tablo formatındaki) deneysel veri setleri üzerinde, veri hacmi ve değişken sayısının kısıtlı olduğu durumlarda, Yapay Sinir Ağları gibi derin öğrenme tabanlı mimarilerin ihtiyaç duyduğu geniş varyasyonlu veri şablonu tam olarak karşılanamayabilmektedir [26]. Katmanlı ve derin mimarilerin bu veri kısıtları altında sergilediği görece zayıf performansa karşın; ağaç tabanlı tekniklerin (XGBoost ve Rastgele Orman) verideki karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri, aşırı öğrenmeye (overfitting) düşmeden daha az veriyle de efektif bir şekilde modelleyebildiği test sonuçlarındaki düşük hata paylarıyla doğrulanmıştır [21].

4. DEĞERLENDİRME

Bu çalışmanın temel amacı, sodyum hipoklorit ağartma prosesi özelinde, uygulama süresi, ağartma prosesi tekrarı ve ağartıcı konsantrasyonuna, ağartmaya girecek kumaşın özelliklerini de göz önüne alınarak üretim sonrası fiziksel performansı tahmin edebilecek bir yaklaşımı ortaya koymaktadır. Böylece hatasız veya en az hatayla, verimli, firesiz, Ür-Ge maliyetleri azaltılmış üretim metodu için yeni bir süreç tasarımının önü açılmıştır. Süreç, "veriye dayalı tahmin teknikleri kullanılarak ağartma prosesinin modellenmesi" olarak tanımlanabilmektedir.

Test sonuçları, proses parametreleri ile kumaş performansı arasındaki ilişkinin çoğunlukla doğrusal olmadığı şeklinde yorumlanabilmektedir. Doğrusal regresyon yöntemi, ağartma prosesinin çok değişkenli ve karmaşık yapısını yeterince temsil edecek parametre sayısına ulaşamazken, doğrusal olmayan yapılarda başarılı sayılabilen YSA yeterli performans gösterememiştir. Bu durumda, aşırı öğrenmenin önüne geçebilecek miktarda eğitim verisinin bulunmaması etkili olmuştur. Sonuçlarda baskın olan çıkarım, ağaç tabanlı yöntemlerin genel olarak daha başarılı tahminler üretebilmesidir. Özellikle Rastgele Orman ve XGBoost yöntemleri, farklı kumaş tipleri ve proses koşulları altında çoğunlukla düşük ve tutarlı hata oranları sunmuştur. Bu durum, söz konusu yöntemlerin ağartma parametreleri ile kumaş performansı arasındaki etkileşimleri daha gerçekçi şekilde yakalayabildiğini göstermektedir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, sodyum hipoklorit ile gerçekleştirilen denim ağartma prosesinin kumaş performansı üzerindeki etkilerinin, tek bir parametre üzerinden değerlendirilemeyecek kadar karmaşık bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymuştur. Aynı kimyasal konsantrasyon ve benzer işlem sürelerinde dahi

farklı kumaş tiplerinde farklı performans sonuçlarının elde edilmesi, kumaş konstrüksiyonu ve ham kumaş özelliklerinin ağartma prosesine verilen tepki üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir.

Denim kumaşların yüzeyinde yoğunlaşan indigo boyası nedeniyle ağartma işlemi ilk aşamada yüzey etkisi şeklinde gerçekleşmekte olup, ancak işlem süresi ve ağartma tekrarı arttıkça bu etki lif yapısına doğru ilerlediğini göstermektedir. Bu durum, özellikle kopma ve yırtılma mukavemetlerinde gözlenen düşüşlerle kendini göstermiştir. Uygulamada sıklıkla karşılaşılan, hedeflenen görsel efekt elde edilirken, kumaş mukavemetinin beklenenden fazla azalması problemi, çalışmada elde edilen sonuçlarla uyumlu bulunmuştur.

Bu çalışmada kullanılan deneysel veriler, kontrollü koşullar altında elde edilmiş olup, farklı kumaş tipleri ve proses parametrelerinin sistematik olarak değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar, yeni bir kumaş veya farklı bir ağartma reçetesi /süreci planlanırken, olası performans değişimlerinin önceden öngörülebilmesi açısından önemli bir referans niteliği taşımaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, bu çalışma, denim ağartma proseslerinde karar verme sürecinin yalnızca operatör tecrübesine dayalı olmaktan çıkarılarak, deneysel veriler ve sayısal modelleme yaklaşımları ile desteklenebileceğini ortaya koymaktadır. Bu yaklaşım, gereksiz Ür-Ge denemesi çalışmalarının azaltılması ve daha kontrollü proses koşullarının belirlenmesi açısından tekstil uygulamalarına katkı sağlamaktadır.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK TEYDEB 1505 programı tarafından desteklenen 5220161 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Sağladığı maddi ve bilimsel katkılardan dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz. Ayrıca uygulama ve test destekleri için Baykan Denim ve İskur Denim Ar-Ge Merkezlerine teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR

1. Gürsoy, N. ve Sünter Eroğlu, N. (2024). Denim modasında sürdürülebilirlik ve ileri dönüşüm uygulamaları. *Turkish Journal of Fashion Design and Management (TJFDM), 6*(1), 1-22.
2. Paul, R. Ed. (2015). *Denim: Manufacture, finishing and applications.* Woodhead Publishing, Cambridge, 640.
3. İstanbul Hazır Giyim ve Konfeksiyon İhracatçıları Birliği (İHKİB) (2025). *Hazır giyim ve konfeksiyon sektörü 2025 yılı Ocak-Aralık dönemsel bilgi notu.* ihkib.org.tr, Erişim tarihi: 07.07.2026.
4. Ata, S., Yıldız, M.S. & Durak, İ. (2020). Statistical process control methods for determining defects of denim washing process: A textile case from Turkey. *Tekstil ve Konfeksiyon, 30*(3), 208-219.
5. Toksöz, M. ve Mezarcıöz, S. (2013). Denim kumaşlara uygulanan özel yıkama uygulamaları. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 28*(2), 141-148.
6. Dalbaşı, E.S. & Kayseri, G.Ö. (2018). Investigation of the different washing processes on the physical characteristics of denim fabrics. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33*(1), 199-208.
7. Khan, M.M.R. & Mondal, M.I.H. (2014). Physico-mechanical properties of finished denim garment by stone-bleach treatment. *Journal of Chemical Engineering, 28*(1), 36-40.
8. Du, W., Zuo, D., Gan, H. & Yi, C. (2019). Comparative study on the effects of laser bleaching and conventional bleaching on the physical properties of indigo kapok/cotton denim fabrics. *Applied Sciences, 9*(21), 4662.
9. Yıldırım, N., Üstüntağ, S. & Örtlek, H.G. (2014). The effects of washing treatments on physical properties of denim fabrics. *Tekstil ve Mühendis, 21*(95), 16-29.
10. Oğulata, R.T. ve Nergis, A. (2017). Farklı yıkamaların denim kumaş performansı üzerindeki etkilerinin araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 32*(4), 87-98.
11. Ingle, N. & Jasper, W.J. (2025). A review of the evolution and concepts of deep learning and AI in the textile industry. *Textile Research Journal, 95*(13-14), 1709-1737.
12. Telli, A. (2023). The evaluation of uster hairiness results with an image analysis approach. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38*(4), 899-905.
13. Eren, S., Özcan, G., Öztürk, M., Türkçen, S. & Eren, H.A. (2024). The usage of machine learning in performance analysis of towel fabrics. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 29*(3), 773-782.

14. Parlakyiğit, P. (2022). Tekstilde istatistiksel proses kontrol uygulaması örneği-Terbiye işletmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37*(4), 911-923.
15. Kastacı, B.B., Özek, H.Z. & Özhan, E. (2024). A comparison of the three techniques in predicting breaking strength of cotton and blended woven fabrics. *Journal of Textiles and Engineering, 31*(133), 34-41.
16. Tu, Y.-F., Kwan, M.-Y. & Yick, K.-L. (2024). A systematic review of AI-driven prediction of fabric properties and handfeel. *Materials, 17*(20), 5009.
17. Eroğlu, N.S. (2023). Sustainability approaches in denim products and production processes. *Tekstil ve Mühendis, 30*(132), 335-350.
18. Çeven, E.K., Eren, H.A., Günaydın, G.K., Sevim, Ö. & Şan, C. (2018). Effect of washing cycle on tenacity and stretching properties of denim fabrics containing elastane. *Journal of Fashion Technology & Textile Engineering, S5*, 003.
19. Montgomery, D.C. (2012). *Introduction to linear regression analysis.* Wiley, New Jersey, 672.
20. Sarkar, D., Bali, R. & Sharma, T. (2018). *Practical machine learning with Python.* Springer, New York, 517.
21. Geron, A. (2017). *Hands-on machine learning with Scikit-Learn and TensorFlow.* O'Reilly Media, Sebastopol, 566.
22. Chollet, F. (2018). *Deep learning with Python.* Manning, New York, 384.
23. Mitchell, T. (1997). *Machine learning.* McGraw-Hill, New York, 432.
24. Aslan, E. ve Özcan, M. (2024). Farklı yapay sinir ağı modellerinin istatistiksel performans parametreleri ile karşılaştırılması ve tahmin modeli geliştirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39*(2), 309-324.
25. Grinsztajn, L., Oyallon, E. & Varoquaux, G. (2022). Why do tree-based models still outperform deep learning on tabular data?. *36th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2022),* New Orleans.
26. Shwartz-Ziv, R. & Armon, A. (2021). Tabular data: Deep learning is not all you need. *Information Fusion, 81*(2022), 84-90.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

Optimization of Centrifugal Fan Efficiency Based on Volute Meridional Inlet Width and Stepanoff Number Using CFD and Kriging-Based Response Surface Method

Melih Gazi KIRPIK [1,a], **Hüseyin AKILLI** [1,b], **Tuğrul SAPMAZ** [1,c], **Hamit TÜRKMEN** [2,d]

[1]*Çukurova University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Adana, Türkiye*
[2]*Çukurova Silo Company, Adana, Türkiye*

[a]***ORCID***: *0000-0002-8011-6331;* [b]***ORCID***: *0000-0002-5342-7046;* [c]***ORCID***: *0000-0002-3552-1952;*
[d]***ORCID***: *0000-0002-3084-0890*

Article Info
Received : 18.11.2025
Accepted : 22.09.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1826186

Corresponding Author
Melih Gazi KIRPIK
melihgazi_kirpik@hotmail.com

Keywords
Centrifugal fan
Fan characteristic curve
Computational fluid dynamics
Ansys CFX
Response surface methodology

How to cite: *KIRPIK, M.G., AKILLI, H., SAPMAZ, T., TÜRKMEN, H., (2026). Optimization of Centrifugal Fan Efficiency Based on Volute Meridional Inlet Width and Stepanoff Number Using CFD and Kriging-Based Response Surface Method. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 737-746.*

ABSTRACT

The present work optimizes the efficiency of a centrifugal fan by applying Computational Fluid Dynamics and a Kriging-based response surface methodology. The aim is to improve fan efficiency in the low to medium pressure values while maintaining the existing broad pressure range performance. Volute meridional inlet width and Stepanoff number were chosen as variables. Their effects on total efficiency and volume flow rate were evaluated by applying incompressible steady state Ansys CFX simulations after mesh independence confirmation. A Design of Experiments framework at nine design points was generated by using Latin Hypercube Sampling method. A kriging metamodel was then generated and validated at 7 points with a relative average absolute error lower than 3%. The optimum design was found at a volute meridional inlet width of about 0.27 m and a Stepanoff number of 0.3. The optimized geometry results in an average relative efficiency improvement of approximately 6.79% in the 0–900 Pa range.

CFD ve Kriging Tabanlı Tepki Yüzeyi Yöntemi Kullanılarak Volüt Meridyonel Giriş Genişliği ve Stepanoff Sayısına Dayalı Santrifüj Fan Verimliliğinin Optimizasyonu

Makale Bilgileri
Geliş : 18.11.2025
Kabul : 22.09.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1826186

Sorumlu Yazar
Melih Gazi KIRPIK
melihgazi_kirpik@hotmail.com

Anahtar Kelimeler
Santrifüj fan
Fan karakteristik eğrisi
Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
Ansys CFX
Tepki yüzeyi metodolojisi

Atıf şekli: *KIRPIK, M.G., AKILLI, H., SAPMAZ, T., TÜRKMEN, H., (2026). CFD ve Kriging Tabanlı Tepki Yüzeyi Yöntemi Kullanılarak Volüt Meridyonel Giriş Genişliği ve Stepanoff Sayısına Dayalı Santrifüj Fan Verimliliğinin Optimizasyonu. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 737-746.*

ÖZ

Bu çalışma, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ve Kriging tabanlı tepki yüzeyi yöntemi kullanılarak bir santrifüj fanın verimliliğini optimize etmektedir. Amaç, mevcut geniş basınç aralığı performansını korurken, düşük ila orta basınç aralığında fan verimliliğini artırmaktır. Tasarım değişkenleri olarak salyangoz gövde meridyonel giriş genişliği ve Stepanoff sayısı seçilmiştir. Bu değişkenlerin toplam verimlilik ve hacimsel debi üzerindeki etkileri, ağ bağımsızlığı doğrulamasının ardından sıkıştırılamaz akış ve kararlı rejim koşullarında gerçekleştirilen Ansys CFX simülasyonları ile değerlendirilmiştir. Latin Hiperküp Örnekleme yöntemi kullanılarak dokuz tasarım noktasını kapsayan bir Deney Tasarımı oluşturulmuştur. Daha sonra bir Kriging meta modeli oluşturulmuş ve %3'ten düşük bir bağıl ortalama mutlak hata değeri ile 7 noktada doğrulanmıştır. Optimum tasarım; yaklaşık 0,27 m salyangoz gövde meridyonel giriş genişliği ve 0,3 Stepanoff sayısı değerlerinde elde edilmiştir. Optimize edilen geometri, 0–900 Pa aralığında ortalama bağıl verimlilikte yaklaşık %6,79'luk bir iyileşme sağlamaktadır.

1. INTRODUCTION

Turbomachinery is a kind of mechanical device which is designed to exchange energy between a moving fluid and a rotating component. Centrifugal fan is one of the most common turbomachinery types used in industry. A centrifugal fan operates on the principle of imparting energy to air or gas through the centrifugal force produced by a rotating impeller. Air enters the fan housing axially at the inlet and is then accelerated radially outward along the blades. The resulting increase in velocity is converted into pressure energy as the airflow passes through the scroll casing. This process transforms mechanical energy from the motor that impeller is connected into pressure and kinetic energy within the fluid stream [1]. A centrifugal fan example is given in Figure 1.

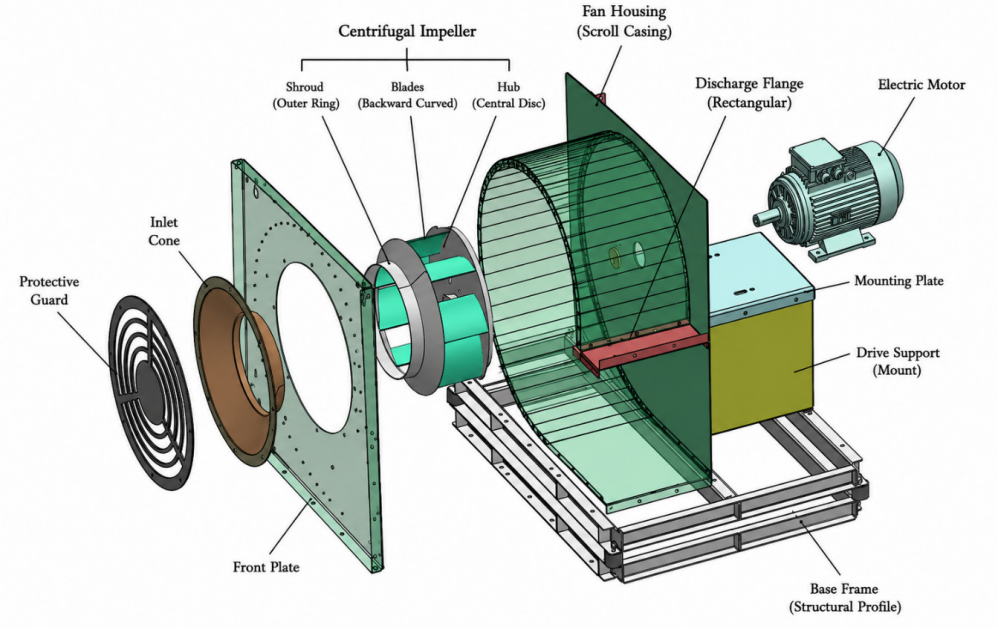


Figure 1. Centrifugal fan

Electric motor systems are one of the main electricity consumption devices in industry, with fans constituting one of the major energy consuming groups among these. Although fan systems are theoretically capable of achieving a total efficiency exceeding 79%, it has been reported that average operating efficiencies in the field can be less than 50% and under certain conditions may fall to around 15–20%. Hence, the improvement of a fan system has great potential to improve energy efficiency with substantial benefit for industrial use [2]. Optimization of different fan systems can be achieved by using CFD tools. Computational Fluid Dynamics (CFD) is a vital tool in the design and optimization of centrifugal fans, allowing engineers to model complex interactions between airflow and structural components with high precision. By simulating pressure distributions, velocity fields, and stress concentrations for the fan system, CFD enables the identification of performance bottlenecks and potential sources of energy loss. This predictive capability facilitates informed design modifications, such as blade geometry design, casing adjustments and sizing, or hub optimization, ultimately improving aerodynamic efficiency and operational reliability. Consequently, integrating CFD into the design process not only improves energy efficiency but also reduces the risk of mechanical failure, supporting economic and environmental objectives in industrial applications. Meng et al, conducted an optimization study to investigate the three-dimensional viscous flow characteristics within a centrifugal fan which is equipped with backward-curved blades. The research focuses on how variations in the inlet angle, outlet blade angle, and the number of blades affect the aerodynamic performance of the assembly of impeller and volute together [3]. In order to improve the lift-to-drag ratio, Wu and Huang's study led to the development of an optimized airfoil series. This newly created profile was then used in the construction of fan blades. Comprehensive three-dimensional numerical simulations were carried out in Ansys CFX using an axial fan as the research model [4]. The aerodynamic performance of axial fans equipped with three different blade configurations was analyzed and compared with each other. In the study of Jung et al, it was investigated the optimization of diffuser design in small, high-speed centrifugal fans by using CFD and Design of Experiments (DOE) methods [5]. As a result, it was found that the trailing edge (TE β) angle of the guide

vane has the greatest impact on fan performance. From this study it was concluded that selecting the optimal angle and blade geometry significantly improves the fan's vacuum (suction) capacity and efficiency. In this study, it was also shown that the CFD result was consistent with experimental data, confirming that the proposed diffuser design enhances performance. Some other studies which were conducted by other scientists [6-9] can be given as examples which CFD method was used for centrifugal fan or pump applications.

For improving fan efficiency CFD method is a robust and effective approach that is used for this purpose commonly. Components of a centrifugal fan such as impeller, volute or extension can be considered individually to improve efficiency by considering each parameter that affects efficiency. However, since changes in one parameter affect the overall flow behavior, focusing on a single parameter may lead to suboptimal design decisions. Therefore, the interaction between design parameters must be considered, and they should be optimized simultaneously to achieve better efficiency optimization results. In order to maximize performance improvement, centrifugal fans should be viewed as a single, integrated system in which the flow field is assessed holistically. The purpose of this study is to increase the centrifugal fan's efficiency by using CFD and response surface methods together. Even small increases in fan efficiency can result in significant energy cost savings because the fan runs most of the time to maintain the necessary environmental conditions for grain storage in silo bins under certain climate conditions. A fan model was created by using a fan design program and in order to determine the characteristic curve of the fan and optimization, CFX simulations were generated. Stepanoff number together with meridional inlet width of volute were considered as design variables for the volute geometry to increase the efficiency of the whole system. Design of Experiments (DOE) was conducted to analyze the effect of design variables at different consideration points. Response Surface Method (RSM) is a simulation-based design technique that enables researchers to construct predictive models, assess the influence of multiple factors, identify optimal conditions for desired responses, and simultaneously reduce the number of required simulations [3]. The main contribution of this study lies in using response surface method with kriging metamodel to optimize the centrifugal fan volute to increase total efficiency and find out the optimum values for design variables. In conclusion, characteristic curves of the fans before and after optimization were compared to each other and optimized system outperformed the prototype system under desired working conditions.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Centrifugal Fan Characteristic Properties

Prototype centrifugal fan model consists of 3 components. These are stator, impeller and volute with its extension. Characteristic properties of these components are given in Table 1.

Table 1. Characteristic properties of centrifugal fan components

Components	Characteristic properties	Values before optimization	Values after optimization
Impeller	Impeller diameter	632 mm	632 mm
	Leading edge width	154.5 mm	154.5 mm
	Outlet width	117 mm	117 mm
	Suction diameter	335 mm	335 mm
	Number of blades	7	7
	Blade types	Circular	Circular
	Circular blade radius	281.9 mm	281.9 mm
	Rotational speed	1500 RPM	1500 RPM
Stator	Length	450 mm	450 mm
	Diameter	335 mm	335 mm
Volute	Stepanoff number	0.4	0.3 (25% decreased)
	Meridional inlet width	250 mm	270 mm (8% increased)
	Centerline diameter	732 mm	732 mm

2.2. Computational Fluid Dynamic (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) is a numerical technique that solves the discretized governing equations of fluid flow to simulate the behavior of fluids within a defined flow domain. It enables prediction

of complex aerodynamic phenomena, evaluation of performance under different operating conditions, and optimization of design parameters with significantly reduced number of experimental requirements [10]. In this study, Ansys CFX tool was used to perform numerical simulations due to its high computational accuracy and proven validation in different applications of turbomachinery such as efficiency and volume flowrate prediction. The fan geometry was modeled by using a specialized turbomachinery design software, and Ansys CFX was employed to evaluate the mesh independence beside deriving fan characteristic curve. Through analysis of flow distribution and performance parameters, the CFD environment supported the design optimization process efficiently while maintaining reliable physical accuracy.

2.2.1. Determination of Number of Mesh Elements for Analysis

The purpose of performing a mesh independence study is to ensure that the numerical results obtained from a CFD simulation are not affected by the mesh resolution significantly. In other words, it is a way to verify that further refinement of the computational grid does not produce noticeable changes in the predicted flow parameters, such as pressure, velocity or temperature. Establishing mesh independence is essential for demonstrating the accuracy, stability, and reliability of the numerical model while avoiding unnecessary computational cost associated with excessively fine grids [11]. Centrifugal fan prototype is seen in Figure 2.

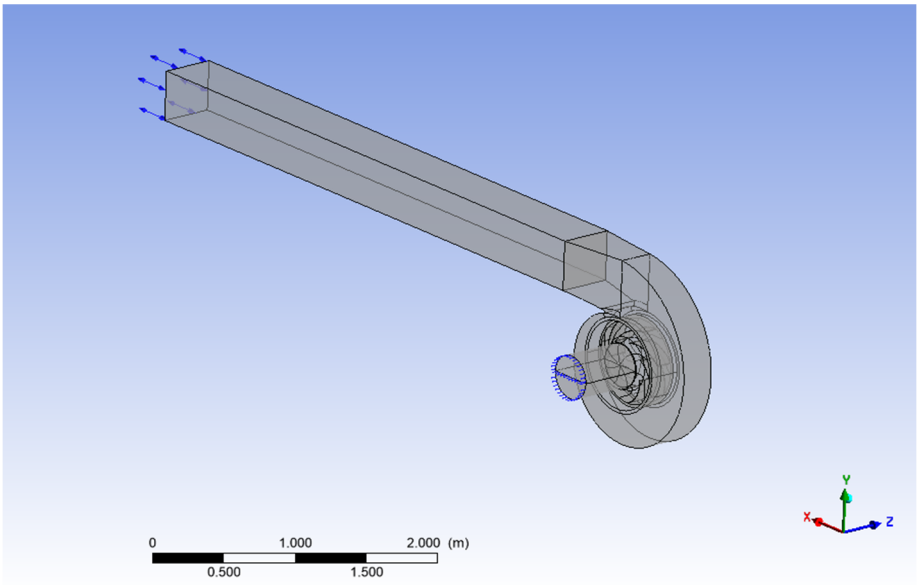


Figure 2. Prototype design of centrifugal fan

A mesh independence study was conducted to be sure that the numerical results were not affected by the grid resolution and to determine the optimal balance in between computational cost and solution accuracy. Different mesh configurations and the numbers of meshes used for the analysis are seen in Table 2.

Table 2. Number of mesh elements of centrifugal fan components for different mesh configurations

Number of mesh elements of fan components used in the mesh independence study				
	Stator	**Impeller**	**Volute and extension**	**Number of mesh elements**
Mesh 1	28005	767215	302202	1097422
Mesh 2	56624	1070220	368159	1495003
Mesh 3	145487	1107368	1016905	2269760
Mesh 4	145487	1146619	1016715	2308821

The resulting mass flow rates were 3.333 kg/s, 3.340 kg/s, 3.342 kg/s, and 3.343 kg/s, respectively, for four distinct mesh densities that ranged from roughly 1.1 million to 2.3 million elements. The relative differences in mass flow rate between successive mesh configurations were 0.21%, 0.06%, and 0.03%. The results indicate that the changes in the monitored parameter become progressively smaller as the mesh is refined and it demonstrates a clear convergence trend. Since the variation in mass flow rate became negligible with

further mesh refinement (0.03% between Mesh 3 and Mesh 4), Mesh 3 was considered sufficiently grid-independent for the present study. Table 3. shows the results of conducted study to determine the number of mesh elements to be used.

Table 3. Mass flowrates for different grid densities

Grid density vs. mass flow rate			
Test	**Number of mesh elements**	**Mass flowrate (kg/s)**	**Difference (%)**
1	1097422	3.333	
2	1495003	3.340	0.21
3	2269760	3.342	0.06
4	2308821	3.343	0.03

2.2.2. CFD Setup

Stator, impeller, and volute with its extension are three primary parts of the fan geometry taken into consideration in this study. Simulations were conducted under steady state conditions. Flow was accepted as incompressible as the maximum global velocity in stationary frame for the fluid domain is 53 m/s which corresponds to a Mach number below 0.3 under the considered conditions [12]. Figure 3. represents the velocity contour of fluid domain on a plane which is placed in the middle of the impeller in Z direction.

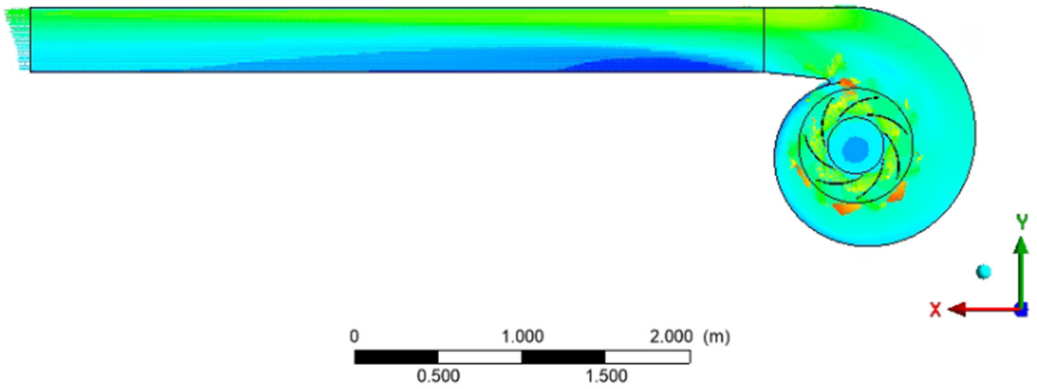


Figure 3. Stationary velocity contour of fluid domain of centrifugal fan

Both inlet and outlet are considered as opening boundary conditions as this boundary condition is appropriate for situations with possible bidirectional flow since the fluid may fully enter, fully exit, or partially do both, depending on the flow. The value of opening pressure at inlet and outlet was specified as 0 Pa. All walls were considered as smooth wall assumptions with standard roughness, and five layers of inflation were applied to the blade walls. Mesh quality metrics for the computational domain that is used for the analysis are shown in Table 4.

Table 4. Average mesh quality metrics for computational domain

Components	**Average skewness**	**Average orthogonal quality**	**Average aspect ratio**
Stator	0.267	0.732	1.94
Impeller	0.257	0.76	2.34
Volute and extension	0.232	0.766	1.841

Table 5. Mesh quality criteria and classification ranges for CFD analysis

Components	**Excellent**	**Good**	**Fair**	**Poor**	**Unacceptable**
Skewness	0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.75	0.75-0.9	0.9-1
Orthogonal quality	1-0.9	0.90-0.75	0.75-0.50	0.5-0.25	0.25-0
Aspect ratio	1-5	5-10	10-20	20-50	50+

When the fluid domain metrics are considered based on Table 5. it can be concluded that the average values are at the range of good and excellent.

Frozen Rotor technique, which keeps the components' relative positions while altering the reference frame at the interface was used to model the interaction between the rotating and stationary components. The Frozen Rotor technique is particularly suitable for non-axisymmetric configurations, such as impeller–volute, propeller–hull, or turbine–draft tube systems, providing a robust and computationally efficient solution for geometries with a high number of blades. That's why the Frozen Rotor interfaces were applied between the inlet cone and the impeller, as well as between the impeller and the volute [13].

The upwind advection scheme, which improves numerical stability in areas with large velocity gradients by determining the value at a cell face based on upstream flow, was used for the convective terms. The upwind scheme guarantees stable convergence and works well in complex flow domains, despite being more diffusive than higher-order techniques. Combination of the upwind scheme with high-resolution turbulence numeric was selected to balance accuracy and stability. Since the primary objective of this study is to determine the overall hydrodynamic performance of system rather than the local boundary layer structure, the k-ε model combined with the Scalable Wall Function approach was deemed a suitable method in terms of accuracy, solution stability, and computational cost. Scalable wall function prevents solver inaccuracies and crashes when mesh is highly resolved near the wall. Priority of the conducted study is hydrodynamic performance rather than local wall effects. Lastly, impeller rotational speed was set to 1500 RPM as model was designed based on this rotational speed criteria.

2.3. Determining Fan Efficiency

Fan total efficiency is calculated from the formula of

$$\text{Fan total efficiency} = \frac{((Outlet\ total\ pressure(Pa) - Inlet\ total\ pressure(Pa)) \text{x} (Volume\ Flowrate\left(\frac{m^3}{s}\right)))}{((Torque\ of\ impeller\left(\frac{N}{m}\right)) \text{x} (\frac{2\pi\ RPM}{60}))} \quad [14]$$

Values of torque, volume flowrate and pressure values were taken from the results of CFX analysis to calculate the fan efficiency value.

2.4. DOE and Response Surface Optimization

Design of Experiments (DOE) provides a structured and systematic framework to investigate the influence of multiple design variables on system performance while minimizing the number of simulations. In the current study, Latin Hypercube Sampling (LHS), a statistical method that guarantees consistent and thorough coverage of the multidimensional design space, was combined with DOE. LHS does this by breaking each input variable into equally likely intervals and picking representative values from each interval. This keeps the data from clustering and makes sampling more efficient. In this study, LHS was executed using a random seed of 30 to produce a well-distributed dataset for response surface modeling, facilitating precise optimization and sensitivity analysis while minimizing computational demands. The design variables chosen for this study are the volute meridional inlet width, which ranges from 0.25 m to 0.3 m, and the Stepanoff number, which ranges from 0.3 to 0.5.

Response Surface Modeling (RSM) was subsequently employed to approximate the relationship between design variables and system performance. It provided a continuous and computationally efficient representation of the fan's behavior across the design space. RSM enables rapid evaluation of multiple design configurations, identification of trends, and sensitivity analysis by fitting a surrogate model to the CFD simulation results obtained from the DOE-LHS framework. This approach is widely used in engineering optimization where full-scale simulations or experiments are computationally expensive and time consuming.

Kriging response surface type, a powerful interpolation-based technique that combines regression modeling with spatial correlation between data points to provide highly accurate predictions even in complex and nonlinear design spaces is used in RSM in this study. Kriging is particularly effective for capturing localized variations and minimizing prediction errors by balancing global and local trends in the data. The model was applied to maximize the total efficiency of the centrifugal fan, enabling the identification of the most

effective combination of volute meridional inlet width and Stepanoff number without performing exhaustive simulations. To assess the predictive accuracy and reliability of the model, number of verification points was set to five.

The Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) is an optimization technique that is based on the principles of the genetic algorithm, and it is used to solve problems with multiple objectives at the same time. The approach explores the design space via evolutionary operations such as selection, crossover and mutation. Candidate solutions are evaluated by their objective functions. MOGA does not seek a single solution but instead generates a set of non-dominated candidate solutions, each representing different trade-offs among the objectives, based on the concept of Pareto dominance [15]. After creating response surface MOGA method used to find out the optimum candidate points.

2.5. Fan Characteristic Curve

The relationship between flow rate and pressure rise is represented by a fan characteristic curve which provides important information about performance under various operating conditions. It helps to match the fan to the system resistance for optimal operation and represents the best efficiency point (BEP). In CFD studies, characteristic curves can be generated by simulating the fan at different outlet pressure conditions to determine flow rates, allowing detailed assessment of performance and efficiency [16]. In this study, fan characteristic curves were determined for both initial design and optimized model to compare between each other. The same methodology and set up used as in the mesh independence study. Outlet pressure set as input parameter in CFX, to evaluate total efficiency, volumetric flow rate, and other performance metrics across different pressure values.

3. RESULTS

3.1. Optimum Stepanoff Number and Meridional Inlet Width Values for the Optimized Design

After the study of mesh independence 3rd case which includes 2269760 number of mesh elements was chosen for optimization study. The results converged at 10^{-4} as residual target was set. Design of Experiments (DOE) was performed with Latin Hypercube Sampling Design in Ansys. Two design variables were selected as Stepanoff number and volute meridional inlet width. Nine design points were automatically generated in the given ranges of these design variables. CFD simulations were then carried out using Ansys CFX for each design point, and the results are shown in Table 6.

Table 6. Design of experiments (DOE) results

Effect of different volute meridional inlet width and Stepanoff number on fan performance			
Volute meridional inlet width (mm)	**Stepanoff number**	**Total efficiency (%)**	**Volume flowrate (m^3/s)**
275	0.333	33.77	2.884
252	0.311	34.66	2.904
258	0.466	24.08	2.649
263	0.422	27.58	2.728
291	0.355	32.43	2.849
280	0.4	29.22	2.766
297	0.444	25.72	2.695
269	0.488	22.90	2.617
286	0.377	31.09	2.807

Based on the results of CFD from generated design points, a response surface was constructed by using Kriging metamodel. Five verification points were generated automatically and two more added manually to verify the created metamodel. Design points that showed relatively large difference from the ideal prediction line were selected as refinement points to improve the accuracy of the metamodel. Result of predicted vs observed model is shown in Figure 4.

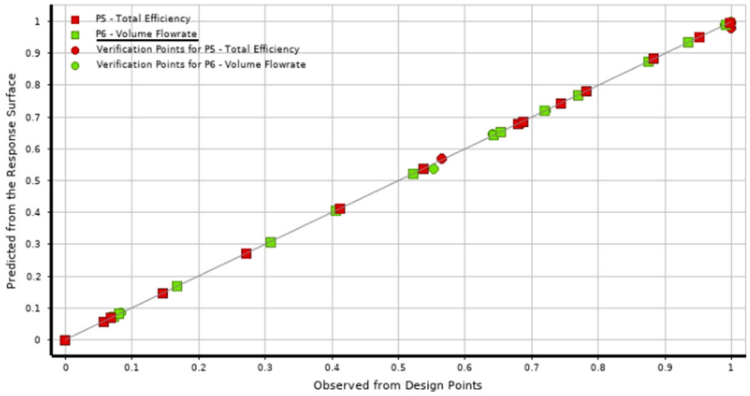


Figure 4. Predicted vs observed values of response surface

From the created metamodel, relative maximum absolute error was 4.86% for total efficiency and 4.19%, for volume flowrate while relative average absolute error was 1.28% for total efficiency and 0.93% for volume flowrate. The response result of metamodel and the relation in between volute meridional width, Stepanoff number and total efficiency is seen in Figure 5.

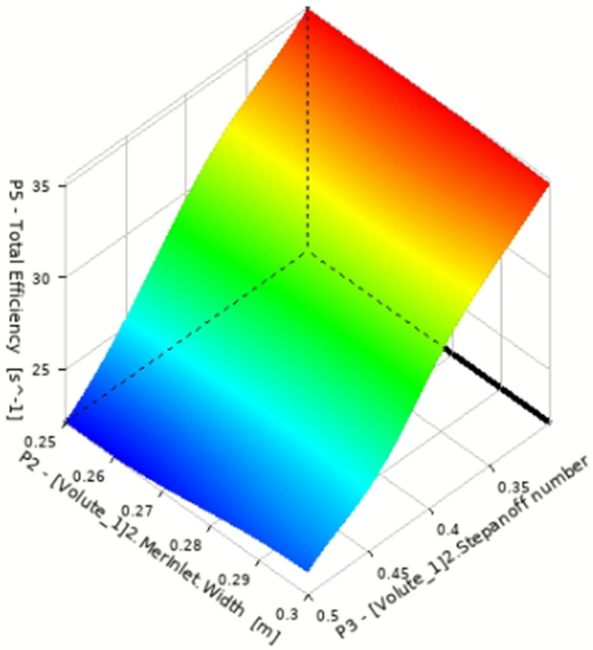


Figure 5. Effect of volute meridional inlet width and Stepanoff number on total efficiency

Optimized geometry candidates were found out by applying MOGA method. After 3755 evaluations, the optimization was converged. The pareto percentage is 0.25% and the stability percentage is 1.23%. Three candidates are shown in Table 7.

Table 7. Candidates for optimum model

Candidates	Volute meridional inlet width	Stepanoff number	Verified total efficiency (%)
First candidate	0.272 m	0.3	35.188
Second candidate	0.277 m	0.3	35.12
Third candidate	0.25 m	0.3	35

Response Surface study clearly shows that total efficiency is highest when the volute meridional inlet width is approximately 0.27 m and the Stepanoff number is around 0.3. Based on this analysis, a new fan volute was designed with a volute meridional inlet width of 0.27 m and a Stepanoff number of 0.3. Prototype and Optimized design are shown in Figure 6.

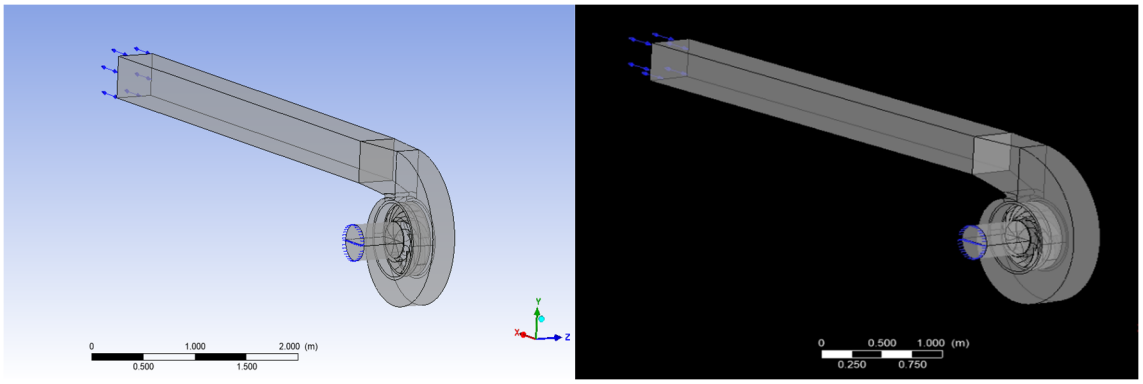


Figure 6. Prototype (left) vs optimized design (right)

3.2. Fan Characteristics of Prototype and Optimized Geometry

Both the prototype and optimized centrifugal fan geometries were analyzed using the same methodology to ensure methodological consistency. Outlet pressure was defined as the input parameter for analyzing total efficiency and volume flow rate under different operating conditions. Table 8 shows the values of volume flowrate and total efficiency of optimized and prototype geometry. In Table 8, the results indicate a notable improvement in total efficiency within the low and medium pressure ranges. Especially, in the pressure range of 0–900 Pa, corresponding to typical low-to-medium pressure conditions for this centrifugal fan, it was achieved a relative average efficiency gain of approximately 6.79%. This demonstrates that the optimized fan geometry provides superior performance in these operating ranges. Since the optimization mainly focuses on low-to-medium pressures, the optimized fan shows a slight decrease in efficiency when compared to the prototype at pressures above 900 Pa. Moreover, the optimized fan maintains slightly higher or comparable volume flow rates across most of the pressure spectrum, confirming that the redesign enhances aerodynamic performance without compromising airflow capacity.

Table 8. Comparison of the prototype and the optimized fan performance at different outlet pressure values

Pressure values (Pa)	Prototype fan		Optimized fan	
	Volume flowrate (m^3/s)	Total efficiency (%)	Volume flowrate (m^3/s)	Total efficiency (%)
0	2.781	29.72	2.912	35.1
100	2.698	39.11	2.846	45.63
200	2.613	47.15	2.722	51.637
300	2.527	54.08	2.620	57.992
400	2.437	60.05	2.514	63.298
500	2.343	65.45	2.405	67.811
600	2.233	69.51	2.290	71.591
700	2.117	72.82	2.166	74.618
800	1.998	75.77	2.033	76.877
900	1.870	77.92	1.887	78.265
1000	1.729	79.24	1.727	78.857
1100	1.569	79.71	1.529	78.148
1200	1.337	78.06	1.22	75.163
1300	0.117	20.19	0.06	12.12

4. CONCLUSIONS

The paper optimizes the efficiency of a centrifugal fan for silo aeration by selecting the volute meridional inlet width and Stepanoff number as design variables. The CFD analysis was carried out using Ansys CFX and DOE was employed to examine the effects of the chosen parameters on total efficiency and volume flow rate. A Kriging-based metamodel was used to determine the response surface and optimal design.

The optimization results showed that the optimal configuration was obtained at the volute meridional inlet width that is approximately 0.27 m and the Stepanoff number of approximately 0.3. The comparison

between the prototype and optimized fan demonstrated 6.79% relative average efficiency improvement in the 0–900 Pa pressure range. The improvement was more significant in low pressure operating conditions and the optimized fan maintained slightly higher volumetric flow rates over most of the investigated pressure range. The rate of improvement in efficiency gradually decreased above 900 Pa pressure and the optimized fan had similar or slightly lower efficiency than the prototype as pressure increased.

The results generally indicate that the optimization of the selected volute variables improved the efficiency of the centrifugal fan with a particular emphasis on the desired low- and medium-pressure operating range. The combined use of CFD, DOE and Kriging-based response surface optimization gave an effective approach for determination of the improved fan geometry while evaluating the effects of the design parameters on fan performance. Future study can be conducted by comparing the results with experimental fan models and more design variables can be considered to optimize other parts of the fan system.

5. REFERENCES

1. U.S. Department of Energy (2025). *Energy efficiency and renewable energy program.* Improving Fan System Performance - A Sourcebook for Industry. https://docs.nrel.gov/docs/fy03osti/29166.pdf, Access date:10.11.2025

2. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2017). *Endüstriyel sistemlerde optimizasyon-Fan sistemleri*. https://www.enerji.gov.tr, Access date: 08.11.2025

3. Meng, F., Dong, Q., Wang, Y., Wang, P. & Zhang, C. (2013). Numerical optimization of impeller for backward-curved centrifugal fan by response surface methodology. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 6*(13), 2436-2442.

4. Wu, Y. & Huang, D. (2019). Optimization design of axial fan blade. *Journal of the Chinese Institute of Engineers, 42*(6), 473-478.

5. Jung, U.-H., Kim, J.-H., Kim, J.-H., Park, C.-H., Jun, S.-O. & Choi, Y.-S. (2016). Optimum design of diffuser in a small high-speed centrifugal fan using CFD & DOE. *Journal of Mechanical Science and Technology, 30*(3), 1171-1184.

6. Kim, J.H., Oh, K.T., Pyun, K.B., Kim, C.K., Choi, Y.S. & Yoon, J.Y. (2012). Design optimization of a centrifugal pump impeller and volute using CFD. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 15*(3), 032025.

7. Liu, X., Dang, Q. & Xi, G. (2008). Performance improvement of centrifugal fan by using CFD. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2*(2), 130-140.

8. Ragauskas, P., Tetsmann, I. & Jasevičius, R. (2024). The optimization of the geometry of the centrifugal fan at different design points. *Applied Sciences, 14*(8), 3530.

9. Yaşar, A., Aygül, Y. ve Çelebi, K. (2024). Torsiyonel rijit fan kaplinlerinin tasarlanması ve optimizasyonu. *Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39*(4), 939-950.

10. *CFD software: Fluid dynamics simulation software.* ANSYS. https://www.ansys.com/products/fluids Access date: 16.10.2025.

11. Versteeg, H.K. & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method.* 2nd edition. London. 503.

12. Jog, C.S. (2015). *Fluid mechanics: Foundations and applications of mechanics.* 3rd ed., Cambridge University Press.

13. *Ansys CFX reference guide.* ANSYS Inc., Canonsburg, PA. Access date: 06.11.2025

14. Lee, Y.-T., Ahuja, V., Hosangadi, A., Slipper, M.E., Mulvihill, L.P., Birkbeck, R. & Coleman, R.M. (2011). Impeller design of a centrifugal fan with blade optimization. *International Journal of Rotating Machinery, 2011*(1), 537824.

15. Fonseca, C.M. & Fleming, P.J. (1993). Genetic algorithms for multi objective optimization: Formulation, discussion and generalization. *Genetic Algorithms: Proceedings of the Fifth International Conference, San Mateo,* CA: Morgan Kaufmann, 416-423.

16. Ferguson, C.G. (1942). Fans-their types, characteristics, and application. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 148*(1), 1-25.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

Assessment of the Eddy Viscosity-Based Turbulence Models on the Solution of the Highly Separated/Attached Flow

Ahmet Remzi ERKOÇ [1,a], **Tural TUNAY** [1,b]

[1]*Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Adana, Türkiye*

[a]***ORCID***: *0009-0002-9308-7418;* [b]***ORCID***: *0000-0001-5994-4565*

Article Info
Received : 09.06.2026
Accepted : 25.09.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1966832

Corresponding Author
Tural TUNAY
ttunay@atu.edu.tr

Keywords
Backward facing step (BFS)
Reattachment length
Separated and reattached flow
Turbulence models

How to cite: *ERKOÇ, A.R., TUNAY, T., (2026). Assessment of the Eddy Viscosity-Based Turbulence Models on the Solution of the Highly Separated/Attached Flow. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 747-760.*

ABSTRACT

The present study investigated performance of different turbulence models based on the Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations to solve the flow over a backward-facing step (BFS). Three different turbulence models, i.e., Spalart-Allmaras, Realizable k-ε and SST k-ω turbulence models, were investigated for the flow over BFS. The investigations were performed for the Reynolds number of $Re_h = 9.6 \times 10^3$ based on step height, h, and the free stream velocity, U_∞. The results, which are validated against the experimental data, showed that the Spalart–Allmaras model predicted the reattachment length, X_r, with an error of 9.52%. The Realizable k-ε and SST k–ω models overpredicted the reattachment length, X_r, by 26.7% and 38.1%, respectively. Within the recirculation region, however, the SST k-ω provided the best prediction of the streamwise velocity, with a maximum difference of 5% from the experimental measurements. The largest local difference of 191% was obtained with the Spalart–Allmaras model at $x/h = 1$.

Yüksek Derecede Ayrılmış/Bağlı Akışın Çözümünde Girdap Viskozitesi Tabanlı Türbülans Modellerinin Değerlendirilmesi

Makale Bilgileri
Geliş : 09.06.2026
Kabul : 25.09.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1966832

Sorumlu Yazar
Tural TUNAY
ttunay@atu.edu.tr

Anahtar Kelimeler
Geri adımlı yüzey
Yeniden bağlanma uzunluğu
Ayrılmış ve yeniden bağlanmış akış
Türbülans modelleri

Atıf şekli: *ERKOÇ, A.R., TUNAY, T., (2026). Yüksek Derecede Ayrılmış/Bağlı Akışın Çözümünde Girdap Viskozitesi Tabanlı Türbülans Modellerinin Değerlendirilmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 747-760.*

ÖZ

Bu çalışmada, geri adımlı yüzey (Backward Facing Step, BFS) üzerindeki akışı çözmek için Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemlerine dayanan farklı türbülans modellerinin performansı araştırılmıştır. BFS üzerindeki akışın çözümünde Spalart-Allmaras, Realizable k-ε ve SST k-ω olmak üzere üç farklı türbülans modeli incelenmiştir. Araştırmalar, serbest akım hızı, U_∞ ve basamak yüksekliği, h baz alınarak tanımlanan $Re_h = 9.6 \times 10^3$ Reynolds sayısı için gerçekleştirilmiştir. Deneysel verilerle doğrulanan sonuçlar, Spalart-Allmaras modelinin yeniden bağlanma uzunluğunu, X_r, 9.52%'lik bir hata ile tahmin ettiğini göstermiştir. Realizable k-ε ve SST k-ω modelleri yeniden bağlanma uzunluğunu, X_r, sırasıyla %26.7 ve %38.1 oranında fazla tahmin etmiştir. Bununla birlikte, geri akış bölgesinde, SST k-ω modeli akış yönündeki hız bileşenini deneysel ölçümlerden maksimum 5%'lik bir farkla en iyi şekilde tahmin etmiştir. En büyük lokal fark olan %191, Spalart-Allmaras modeli ile x/h = 1 noktasında elde edilmiştir.

1. INTRODUCTION

A downstream wake region develops behind an object with its spatial extent governed by both the geometric properties of the object (e.g., bluff shapes, geometric discontinuities, or sudden expansions) and the flow features, such as boundary-layer separation. These wakes are characterized by interacting shear layers and recirculation zones that exhibit highly unsteady, three-dimensional turbulent behaviour. Wake flows of this nature are encountered in many engineering applications, which includes flow over airfoils, flow around ground vehicles, and flow through corrugated or patterned channels [1-4].

The flow over a backward-facing step (BFS) exhibits the fundamental characteristics of wake flows, including free shear layer separation, vortex development, and subsequent flow reattachment [5]**.** The flow over a BFS exhibits a strong adverse pressure gradient after separation [6]. It is followed by the formation of a large recirculation zone downstream of the step. Within this recirculation zone, strong velocity gradients, vortex shedding, and turbulence production occur, which leads to complex unsteady flow behaviour. Uruba et al. [1] examined that the reattachment of the flow downstream of the BFS is a highly non-stationary dynamical process, so that the zone of reattachment needs to be discussed rather than the point and the line when describing it. Previous studies showed that the length of the reattachment in the BFS flow depends on the Reynolds number (Re), step height (h), and the boundary layer thickness (δ) of the incoming flow [7]. Near the BFS, the pressure coefficient (C_p) and skin friction coefficient (C_f) decrease and subsequently increase gradually along the downstream flow [8]. A low-static-pressure region exists below the shear layer which causes part of the reattached flow to recirculate upstream and form a recirculation zone [9]. In a large part of that zone, the wall shear stress is assumed to be negative [8, 10, 11]. The skin friction coefficient was observed to decrease with increasing Reynolds number in the study of Tihon et al. [10].

In the numerical analysis of turbulent flows including wakes, the selection of an appropriate turbulence model plays a critical role in determining both the accuracy of the predictions and the associated computational cost. Advanced approaches, e.g., Large Eddy Simulation (LES), require highly refined grids and small-time steps to resolve a wide range of turbulent scales, which makes them computationally demanding and typically suitable only for high-performance computing environments. In contrast, turbulence models, based on the Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS) equation, remain widely used in engineering applications because they offer a favourable balance between accuracy and efficiency [12]. RANS approaches can deliver reliable predictions while operating on significantly more modest computational systems by modelling the entire turbulence spectrum. Karabulut and Alnak [13] investigated the flat and triangular step pattern in channel flow by using RANS turbulence model that is k-ε turbulence model at different Re_h. The results showed that the Nusselt number (Nu) is increased by Reynolds number in both cases.

The BFS geometry is widely used to evaluate the performance of turbulence models in capturing wake flow characteristics [15]. Researchers often use the computational simulations and experimental data of flows over BFS to assess the accuracy and performance of turbulence models. Therefore, numerous studies in the literature have employed the BFS geometry to assess the performance of turbulence models [15-18].

Driver and Seegmiller [16] evaluated the performance of eddy-viscosity turbulence models, i.e., k-ε and algebraic-stress turbulence models (ASM), by comparing with their experimental data. The results showed that the modified ASM improved the results of the unmodified ASM and the k-ε model, while it overpredicts the dissipation rate. Additionally, Gatski et al. [17] found that the standard k-ε model predicts the reattachment point location with an 11% underestimation relative to the nonlinear k-ε model. The assumption of isotropic eddy viscosity in the standard k-ε model and its variants lead to inaccurate predictions of normal Reynolds stresses, which in turn results in errors in estimating the reattachment length [19]. Additionally, the standard k-ε model can produce unphysical results, including negative values of the turbulent kinetic energy (k) and the turbulent dissipation rate (ε).

The Realizable k-ε model was suggested by Shih et al. [20], which was designed to better capture the turbulence anisotropy by modifying the eddy viscosity formulation to provide more accurate predictions in flows such as near-wall flows and in separated flows. The Realizable k-ε model introduces improvements in the formulation of eddy viscosity along with additional constraints to ensure physically consistent

predictions of the turbulent kinetic energy (k) and dissipation rate (ε), thereby enhancing the realism and accuracy of turbulent flow simulations. Additionally, the Realizable k-ε model performs well in predicting complex flow features, including separation, reattachment, and recirculation, as observed in BFS flows. Accordingly, Shih et al. [20] reported that the Realizable k-ε model solved the reattachment length with an error less than 2% when compared with the experimental results of Driver and Seegmiller [16] for the case of a smaller step height.

Additionally, Wilcox [15] reported that the Spalart–Allmaras model predicts the reattachment point location within 3% of the experimental data obtained by Driver and Seegmiller [16]. Bredberg and Davidson [18] emphasized the importance of cross-diffusion terms in eliminating freestream sensitivity with respect to ω in free shear flows and proposed an improved k-ω turbulence model that does not require wall functions or wall-distance information. Furthermore, Munters et al. [21] compared various turbulence modelling approaches, including scale-resolving, Reynolds-averaged, and hybrid models, for flow over the BFS at a Reynolds number of $Re_h = 6.4\times10^3$ and an expansion ratio of $H_o/H_i = 2.25$. Their results indicated that DES and IDDES models, which incorporate wall-modelled LES, provide more accurate predictions, whereas SAS and DDES perform less satisfactorily. In particular, DDES was found to suffer from model-stress depletion (MSD), while SAS yielded results similar to those of RANS models.

Scale-resolving turbulence models, such as direct numerical simulation (DNS) and large eddy simulation (LES), which enable accurate stability analysis, have also been employed in the previous studies to investigate flow over the BFS [22-25]. Thus, the characteristics of the average flow over the BFS, which shows convective or absolute instability were revealed. These studies demonstrated that, in the absence of external disturbances, the flow over the BFS remains time-independent for Reynolds numbers $Re_h < 2500$. In contrast, the presence of external excitation can lead to time-dependent behaviour. For instance, under small-amplitude monochromatic excitation, the flow exhibits time-periodic behaviour when the excitation frequency is close to the shear-layer frequency, while it remains largely unaffected at higher excitation frequencies. When random noise is introduced, the flow becomes unsteady, characterized by a dominant frequency near that of the shear layer [24]. Furthermore, simulations at an expansion ratio of $H_o/H_i = 5$ revealed that the eddy structures exhibit strong similarities to those observed in forced plane mixing layers, with large-scale billows forming downstream of the step and intense longitudinal vortices developing between them [25].

Previous studies using turbulence models to solve the separated flow field downstream of BFS are summarised in Table 1. These studies showed that the prediction of BFS flow depends strongly on the turbulence model used while the correct prediction of the separated flow characteristics is a critical phenomenon influencing the aerodynamic performance and the rate of heat transfer [26]. As presented in Table 1, direct comparison among the findings of these previous studies is difficult because the studies differ in geometry and Reynolds number. Moreover, turbulence model performance has frequently been summarised using only the reattachment length, even though a turbulence model that predicts this global quantity accurately may not reproduce the local velocity field with comparable accuracy.

While scale-resolving approaches, such as LES and DES, can accurately capture the unsteady vortex dynamics and shear-layer instabilities inherent to BFS flows, their high computational cost limits their feasibility in many industrial applications. Consequently, RANS models remain the primary choice for engineering design, optimization, and routine CFD analyses. However, the predictive capability of these models remains strongly problem-dependent, particularly in flows involving separation, reattachment, and recirculation. Therefore, a comprehensive assessment of RANS turbulence models for BFS geometries is still required to clarify their strengths, limitations, and applicability ranges.

The present study investigated the performance of several eddy viscosity-based Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS) turbulence models in predicting the flow characteristics over a BFS. Three turbulence models, i.e., Spalart–Allmaras, Realizable k-ε, and SST k-ω, were applied. Steady-state simulations were performed for all turbulence models at a Reynolds number of $Re_h = 9.6 \times 10^3$, which was defined based on the step height h and the free-stream velocity, U_∞ of the flow. The novelty of the present study lies in evaluating three widely used eddy-viscosity based RANS turbulence models (i.e.,

Spalart-Allmaras, Realizable k-ε and SST k-ω) under the same BFS geometry, Reynolds number and inflow boundary conditions. Additionally, the present study assesses the performance of the turbulence models using both global and local flow characteristics, e.g., the reattachment length, streamwise velocity profiles, the secondary recirculation flow structure, vorticity, skin-friction coefficient and pressure coefficient.

Table 1. Previous studies using turbulence models to solve the separated flow field downstream of BFS

Study	H_o/H_i	Re_h	Turbulence models	X_r/h
Present Work	1.08	9.6×10^3	Spalart-Allmaras, Realizable k-ε, SST k-ω	4.6 5.3 5.8
Addad et al. [27]	1.10	1.7×10^5	LES	4.0
Al-Jelawy et al. [11]	1.13	5.7×10^4	SST k-ω Spalart-Almaras	5.6 6.1
Khuwaranyu and Putivisutisak [28]	1.20	5.0×10^3	k-ω – LSC	6.3
Bredberg and Davidson [18]	1.20	5.1×10^3	Standard k-ω	6.3
Kang and Choi [29]	1.20	5.1×10^3	LES	6.2
Le et al. [22]	1.20	5.1×10^3	DNS	6.3
Okada et al. [30]	1.25	5.0×10^3	LES	5.9
Avancha and Pletcher [31]	1.50	5.5×10^3	LES	6.1
Dejoan and Leschziner [32]	1.50	3.7×10^3	LES	7.0
Rhee and Sung [33]	1.50	3.3×10^4	k-ε- f	7.3
Mehrez et al. [34]	1.50	3.3×10^4	LES	7.2
Choi and Kim [35]	1.50	4.8×10^4	Standard k-ε RNG NLEVM EARSM	5.9 6.2 6.9 7.4
Kumar et al. [36]	1.94	7.0×10^3 7.5×10^3 $8.0.\times 10^3$ 8.5×10^3 9.0×10^3	Standard k-ε	5.9 5.9 6.0 6.0 6.0
Barri and Andersson [37]	2.00	5.6×10^3	DNS	7.1
Louda et al. [38]	2.00	1.5×10^4	EARSM	8.5 8.2
Juste et al. [39]	2.00	0.2×10^3 0.3×10^3 0.5×10^3 0.7×10^3	LES	4.9 6.2 9.8 13.5
Munters et al. [21]	2.25	6.4×10^3	k-ω SST	11

2. MATERIAL AND METHODS

The present work numerically examines separated and reattaching flow over a two-dimensional backward-facing step (BFS) geometry. In the investigations, three eddy-viscosity based RANS turbulence models, e.g., Spalart-Allmaras, Realizable k-ε and SST k-ω, were evaluated by comparing their predictions with the experimental measurements of Li et al. [9].

2.1. Flow Geometry

A two-dimensional backward-facing step (BFS) geometry with a step height of h=25 mm, corresponding to an expansion ratio of H_o/H_i = 1.08, was employed. The Reynolds number of $Re_h = 9.6\times10^3$, based on the step height (h) and freestream velocity, U_∞, was selected to reproduce the experimental results obtained by Li et al. [9] to validate the numerical results of the present study. All geometrical details of the computational flow domain are given in Figure 1 [40].

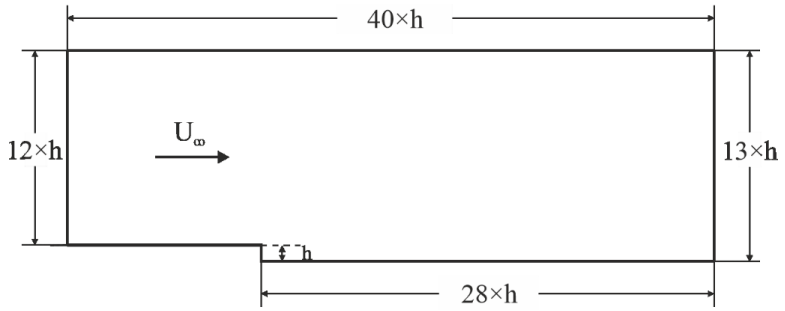


Figure 1. The geometrical details of the backward-facing step

2.2. The Governing Equations of the Flow

The governing equations for the flow over the backward-facing step (BFS) consist of the two-dimensional, incompressible continuity and Navier–Stokes equations, as presented in Equations (1) and (2).

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \rho g_i \tag{2}$$

Unsteady flow variables, density, ρ, velocities, u_j, are defined as follows

$$\rho = \bar{\rho} \text{ and } \rho' = 0, \quad u_j = \bar{u}_j + u_j', P = \bar{P} + P' \tag{3}$$

Putting the abovementioned definitions of the flow parameters, given in Equation (3), in the Navier-Stokes equation, given in Equation (2), gives the Reynolds equation as shown in Equation (4)

$$\bar{\rho}\bar{u}_j \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}\right] = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i' u_j'}\right] + \bar{\rho} g_i \tag{4}$$

The Boussinesq approximation models the transport of turbulent velocity fluctuations analogously to molecular momentum transfer in an isotropic Newtonian fluid, as expressed in Equation (5).

$$\overline{\rho u_i' u_j'} = -\bar{\rho}\nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}\right)$$

$$\bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\nu + \nu_t)\left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}\right)\right] \tag{5}$$

2.3. Spalart-Allmaras Turbulence Mod

The Spalart–Allmaras turbulence model is a single-equation model that solves a transport equation for the kinematic eddy viscosity. It is generally applied to flows involving boundary layers subjected to adverse pressure gradients.

In this turbulence model, the kinematic eddy viscosity model is computed using Equation (6).

$$\nu_t = \tilde{\nu} f_{v1} \tag{6}$$

Here, the viscous damping function is $f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{v1}^3}$ with $\chi \equiv \frac{\tilde{\nu}}{\nu}$ and C_{v1} is a model constant.

The transport equation for $\tilde{\nu}$ defined in this turbulence model is calculated using Equation (7).

$$\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial t} + u_j \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} = c_{b1}\tilde{S}\tilde{\nu} + \frac{1}{\sigma}\frac{\partial}{\partial x_i}\left\{(\nu + \tilde{\nu})\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_i}\right\} + \frac{c_{b2}}{\sigma}\left(\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_i}\right)^2 - c_{w1} f_w \left(\frac{\tilde{\nu}}{d}\right)^2 \tag{7}$$

In Equation (7), c_{b1}, c_{b2} and σ are constants and v is the molecular kinematic viscosity. Additionally, $\tilde{S}$ is calculated using Equation (8).

$$\tilde{S} \equiv S + \frac{\tilde{v}}{\kappa^2 + d^2} f_{v2} \tag{8}$$

Here, $f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1+\chi f_{v1}}$ and κ is constant while d denotes the distance from the wall. Moreover, S serves as a scalar indication of the deformation tensor which is based on the magnitude of the vorticity as $S \equiv \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}}$, where Ω_{ij} is the mean rate-of-rotation tensor defined by $\Omega_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$.

Finally, c_{w1} and f_w are calculated using $c_{w1} = \frac{c_{b1}}{\kappa^2} + \frac{(1+c_{b2})}{\sigma}$ and $f_w = g\left[\frac{1+c_{w3}^6}{g^6+c_{w3}^6}\right]^{1/6}$.

2.4. SST *k-ω* Turbulence Model

In 1993, Menter [41] introduced the SST *k–ω* turbulence model which aimed to combine the strengths of both *k-ε* and *k-ω* models. The SST *k–ω* model enhances predictive capability across varying flow regimes through a hybrid formulation that leverages the strengths of both *k–ω* and *k–ε* models.

In this turbulence model, the kinematic eddy viscosity is defined as given in Equation (9).

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{max(a_1\omega; SF_2)} \tag{9}$$

Here, S is the invariant measure of the strain rate, i.e., S = $\sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ and F_2 is a second blending function defined by Equation (11).

$$F_2 = tanh\left\{\left\{max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta_t^*\omega y_t}; \frac{500\nu}{y_t^2\omega}\right)\right\}^2\right\} \tag{10}$$

The transport equations for k and ω in the SST *k-ω* model are given in Equations (11) and (12) as follows.

$$\frac{Dk}{Dt} = \tilde{P}_k + \frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\nu + \sigma_k\nu_t)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right] - \beta_t^* k\omega \tag{11}$$

$$\frac{D\omega}{Dt} = \alpha S^2 + \frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\nu + \sigma_\omega\nu_t)\frac{\partial \omega}{\partial x_i}\right] + 2(1-F_1)\sigma_{\omega 2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_i}\frac{\partial \omega}{\partial x_i} - \beta_t\omega^2 \tag{12}$$

The blending function F_1 is defined as follows,

$$F_1 = tanh\left\{\left\{min\left[max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta_t^*\omega y_t}; \frac{500\nu}{y_t^2\omega}\right); \frac{4\rho\sigma_{\omega 2}k}{CD_{k\omega}y_t^2}\right]\right\}^4\right\} \tag{13}$$

with the following definition of the cross-diffusion term

$$CD_{k\omega} = max\left(2\rho\sigma_{\omega 2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_i}\frac{\partial \omega}{\partial x_i};\ 10^{-10}\right) \tag{14}$$

and where y_t is the distance to the nearest wall. F_1 goes to zero away from the surface because of $1/y_t$ or $1/y_t^2$ dependency in all three terms in Equation (13). The blending function is defined such that it makes a smooth transition from k-ω at the wall to *k-ε* far from it.

The coefficients in the model are calculated from the blending function F_1 by using Equation (15).

$$\phi_t = F_1\phi_{t,1} + (1 - F_1)\phi_{t,2} \tag{15}$$

where subscript 1 represents the original coefficient of the k-ω model and subscript 2 represents the coefficients of the transformed k-ε model. The closure coefficients for the SST k-ω model are shown in Table 2.

Table 2. Coefficients of the SST k-ω model.

	β_t	σ_k	σ_ω	a_1	β_t^*	α
Set 1 ($\phi_{t,1}$)	0.0750	0.85	0.5	0.31	0.09	5/9
Set 2 ($\phi_{t,2}$)	0.0828	1.0	0.856			0.44

To prevent the build-up of turbulence in stagnation regions, Menter [41] proposed a production limiter which is defined as follows.

$$\tilde{P}_k = min(P_k; 10\beta_t^* k\omega) \tag{16}$$

Where

$$P_k = \nu_t \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j}\right) \tag{17}$$

2.5. Realizable k-ε Turbulence Model

The Realizable k-ε model contains an alternative formulation for the turbulent viscosity that distinguishes it from standard k-ε turbulence model. In this turbulence model, the kinematic eddy viscosity is computed using Equation (18).

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{18}$$

Here, $C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S\frac{kU^*}{\varepsilon}}$.

The transport equation of k and ε are given in Equations (19) and (20), respectively.

$$\frac{Dk}{Dt} = \nu_t S^2 + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] - \varepsilon \tag{19}$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = C_1 S_\varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] - C_2\frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu\varepsilon}} \tag{20}$$

Here, $C_1 = max\left[0.43, \frac{\eta}{\eta+5}\right]$, $\eta = S\frac{k}{\varepsilon}$ and $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$, $S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)$.

In Equations (19) and (20), σ_k and σ_ε are the turbulent Prandtl numbers for k and ε, i.e., σ_k=1.0, σ_ε=1.2. Additionally, C_2 is a constant having a value of C_2=1.9.

The governing equations were discretized and solved with the aid of Ansys Fluent using a two-dimensional, steady-state RANS formulation for each turbulence model. Because no physical time integration was performed, a time-step size, temporal discretization scheme, total physical simulation time, and time step independence analysis, i.e., CFL number, are not applicable. Iterative convergence was considered achieved when the scaled residuals decreased below 10^{-5}. Pressure-velocity coupling was handled using the SIMPLEC algorithm. The least-squares cell-based method was used to compute the gradients of the flow variables, and the QUICK scheme was adopted for the discretization of the convective terms.

2.6. The Boundary Conditions of the Computational Flow Domain

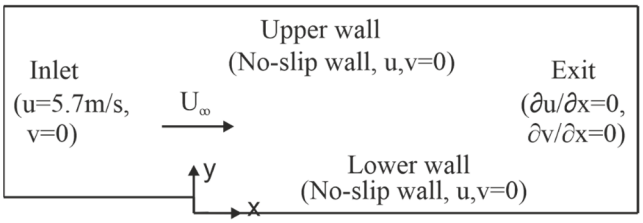


Figure 2. Boundary conditions of the computational flow domain

The boundary conditions of the computational domain are illustrated in Figure 2 and consist of inlet, outlet, and wall boundaries. A uniform velocity profile normal to the surface was specified at the inlet with a turbulence intensity of 1%, while a zero-gradient condition was applied at the outlet and no-slip boundary conditions were used on all walls.

2.7. Details of the Computational Mesh and Its Verification

Three different meshes were created to identify the most appropriate mesh that would not influence the numerical results. In the mesh independence study, the mesh with the fewest nodes was designated as the coarse mesh, whereas the one with the greatest number of nodes was designated as the fine mesh. The pressure coefficient, C_p, distribution was selected as the criterion for evaluating mesh adequacy. Figure 3 presents the $C_p$distribution along the lower surface of the channel downstream of the step for three turbulence models, obtained using the three different meshes.

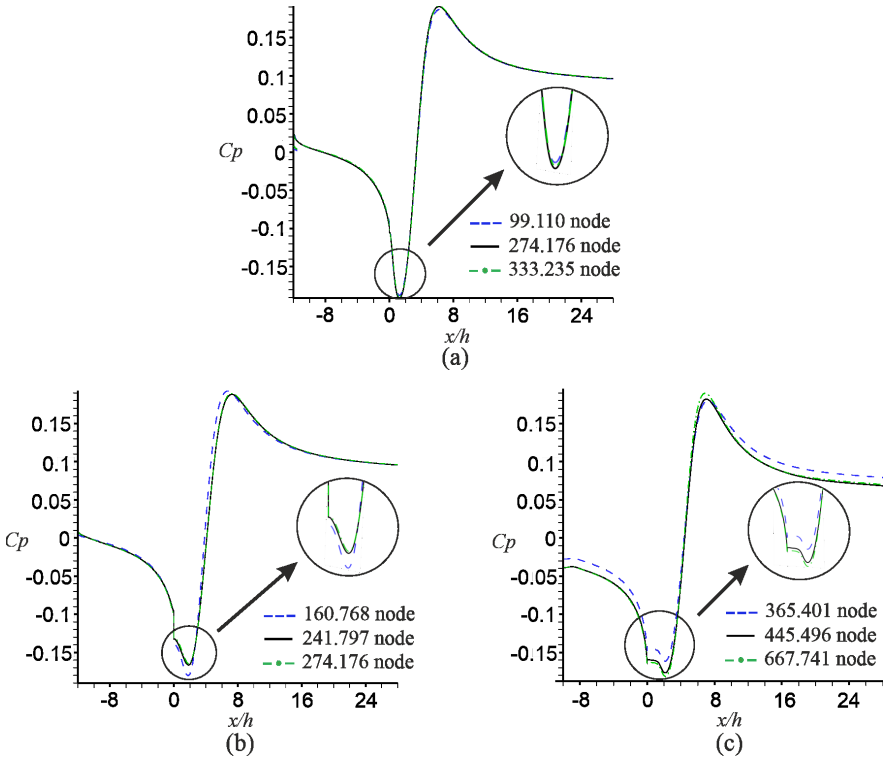


Figure 3. Pressure coefficient, C_p, results of three meshes for a. Spalart-Allmaras model, b. Realizable k-ε model c. SST k-ω model

Figure 3 illustrates that the results obtained from the medium and fine meshes for all turbulence models were in close agreement. Therefore, the medium mesh was selected for the present study, as it provides accurate results while reducing computational cost. Furthermore, Table 3 summarizes the maximum values of the dimensionless wall thickness, y^+, for the meshes used in the mesh independence study, along with their corresponding reattachment results.

Table 3. The maximum values of the dimensionless wall thickness, y^+, for the meshes used in the mesh independence study, along with their corresponding reattachment results

Turbulence model	Total number of nodes	y^+	X_r/h
Spalart-Allmaras	99.110	40	4.76
	274.176	44	4.60
	333.235	65	4.90
Realizable *k-ε*	160.768	57	4.90
	241.797	40	5.32
	274.176	40	5.29
SST *k-ω*	365.401	1.58	5.50
	445.496	0.94	5.80
	667.741	0.94	5.76

The y^+results presented in Table 3 indicate that the boundary layer meshes employed for the simulations possessed the required characteristics for the turbulence models used. Additionally, Figure 4 illustrates the mesh configurations, both with and without boundary layer meshes along the channel walls.

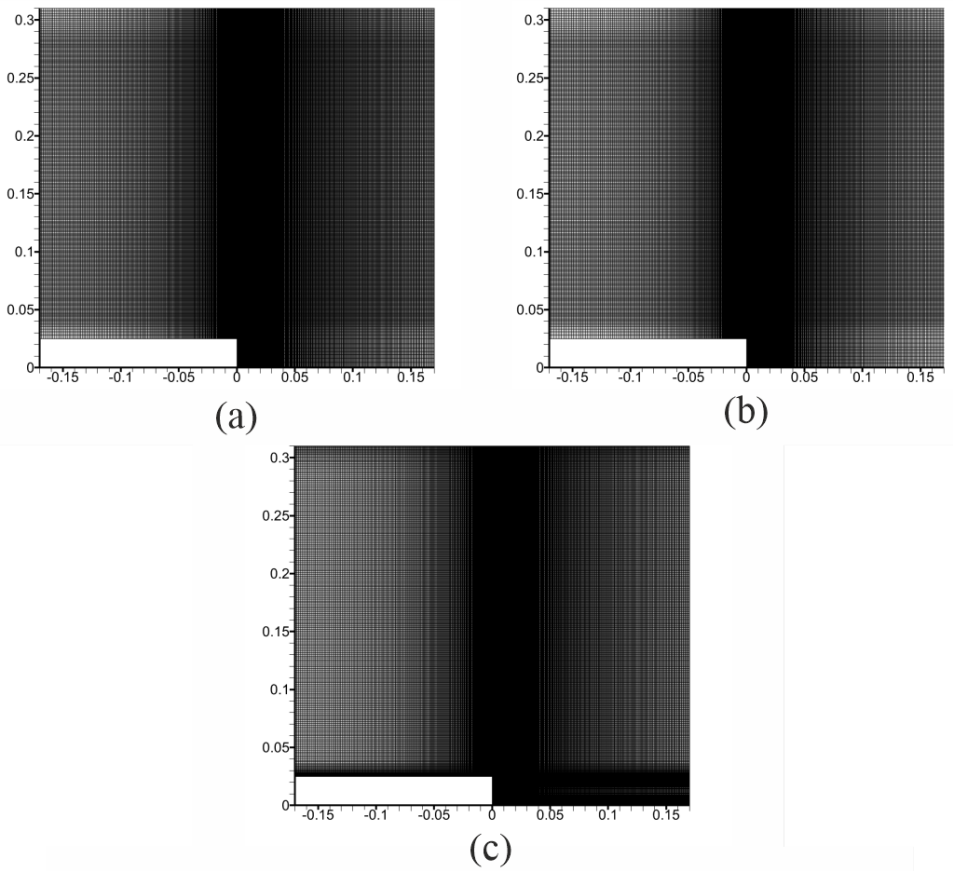


Figure 4. Computational meshes of the study using (a) the Spalart Allmaras model, (b) the Realizable *k-ε* model and (c) the SST *k-ω* model

3. RESULTS AND DISCUSSION

The flow over a backward-facing step (BFS) is a canonical benchmark problem for separated and reattaching flows [42]. Thus, the present study employed the BFS configuration with an expansion ratio of H_o/H_i =1.08 to investigate the performance of three different RANS-based turbulence models, which are Realizable *k-ε*, Spalart-Allmaras and SST *k- ω* respectively at the Reynolds number of $Re_h = 9.6 \times 10^3$.

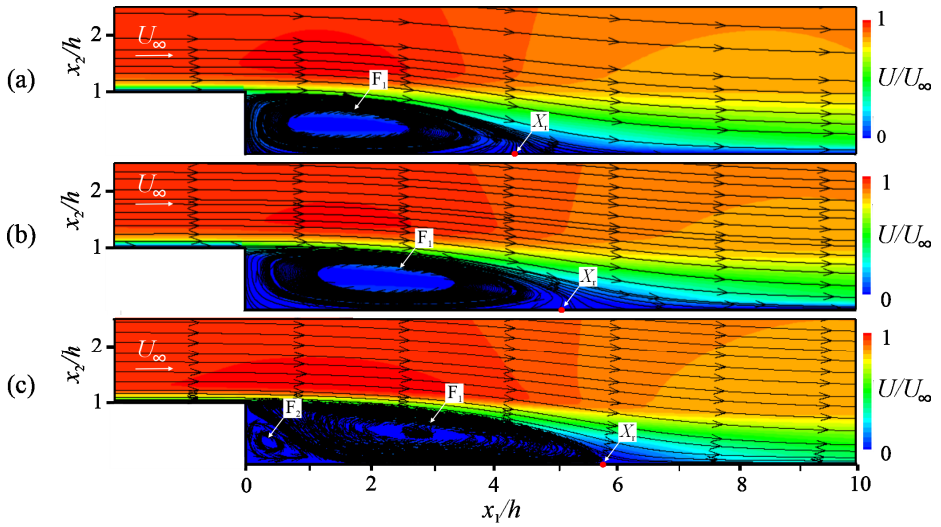


Figure 5. Streamlines, ψ, and velocity magnitude $U/U_\infty = \sqrt{u^2 + v^2}/U_\infty$, contours obtained by using (a) Spalart-Allmaras (b) Realizable k-ε and (c) SST k- ω turbulence models

Comparison of streamlines, ψ, and velocity magnitude, U/U_∞, contours are given Figure 5. The location of the reattachment point is shown with a red dot on each figure. The recirculation region formed due to flow separation at the top corner of the step was successfully captured by all three turbulence models. However, the recirculation regions of BFS flows showed differences for all three turbulence models. For instance, a secondary small recirculation region, F_2, was captured as the result of SST k-ω turbulence model whereas there are no secondary recirculation regions in the Spalart-Allmaras and Realizable k-ε turbulence models. The secondary small recirculation region (e.g., focus F_2) forming near the lower step corner was also seen in the experimental study of Li et al. [9]. The reattachment lengths were found as X_r/h=5.8, 5.32, and 4.6 by the SST k-ω, the Realizable k-ε, and the Spalart-Allmaras models, respectively, which were given 38.1%, 26.7%, and 9.52% differences when compared to the experimental result of Li et al. [9]. Thus, the result of Spalart-Allmaras provided the best estimation among the turbulence models that were employed in the present study, as in the study of Wilcox [15].

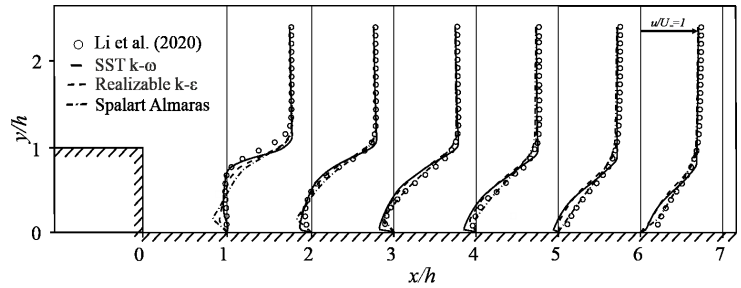


Figure 6. The comparison of the streamwise velocity component of different turbulence models normalized with the free stream velocity, u/U_∞, with the experimental results

The comparison of the streamwise velocity component profiles of different turbulence models normalized with the free-stream velocity, u/U_∞, as shown in Figure 6, exhibited good agreement with the experimental results of Li et al. [9] except at locations close to the base of BFS and the shear layer. In the recirculation area (i.e., $x/h \leq 5$), the streamwise velocity component results of turbulence models showed negative values at varying maximum magnitudes. The maximum difference of 191 % with the experimental results of Li et al. [9] was in the results of Spalart-Allmaras at x/h = 1. On the other hand, the velocity profiles of SST k-ω and Li et al. [9] at locations between $1 \leq x/h \leq 3$, showed good agreement, with a maximum difference of 5%. Besides, in the shear layer region, the velocity profiles obtained using the SST k-ω model showed a maximum difference of 42% at $x/h = 1$compared to the experimental results of Li et al. [9]. Moreover, at the locations after the reattachment point (i.e., at $x/h \geq 6$), at which the boundary layer redeveloped due to the wall effects, the maximum difference of 61% with the experimental results of Li et al. [9] was in the results of SST k-ω. Overall, the results showed that the Spalart–Allmaras model was in good agreement

with the findings of Li et al. [9] in both the shear layer and downstream of the reattachment point, whereas the SST k-ω model exhibited better agreement in the recirculation region. On the other hand, the results of the Realizable k-ε were worse than the results of other turbulence models.

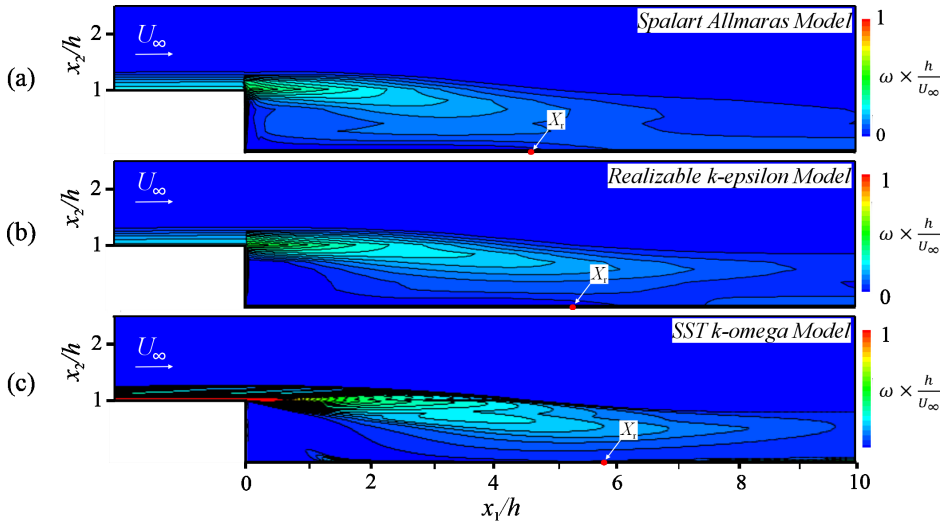


Figure 7. Vorticity, $\omega \times \frac{h}{U_\infty}$, contours obtained by using three different turbulence models

The comparison of the vorticity, $\omega \times \frac{h}{U_\infty}$, results obtained by using different turbulence models are given in Figure 7. Despite the use of different turbulence models, the vorticity contours exhibited a consistent overall structure; high vorticity regions were primarily located along the upper wall boundary layer and within the shear layer originating from the step corner. However, in line with the findings about the reattachment length given above, the estimation of the vorticity magnitude by the SST k–ω turbulence model gave the maximum amount at around the upper corner of the step when compared to the other turbulence models, i.e., the Realizable k-ε and Spalart–Allmaras turbulence models. The higher vorticity concentrations observed within the shear layer indicate stronger shear gradients and more intense mixing, which enhance the momentum transfer between the free stream and the recirculation zone. Furthermore, both the Realizable k–ε and SST k–ω models exhibited vorticity contours extending further downstream than those predicted by the Spalart–Allmaras model, indicating increased turbulence intensity and shear layer instability, which may contribute to a delayed reattachment.

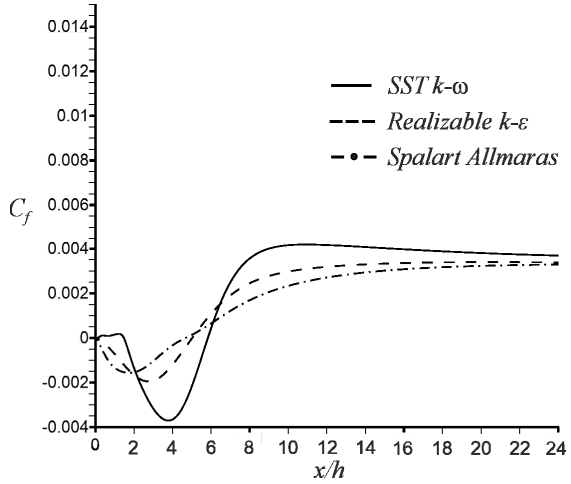


Figure 8. Skin friction coefficient, C_f, profile on the lower wall of the channel downstream of the backward-facing step (BFS)

Figure 8 presents a comparison of the skin friction coefficient, C_f on the lower wall of the channel obtained by using three different turbulence models. The results given in Figure 8 show that the skin friction

coefficient, C_f, attains negative values due to reversed flow in the recirculation region downstream of the BFS. The C_f values continue to decrease, reaching a minimum within the recirculation zone, and subsequently recover in the downstream direction. Similar trends for the C_f were seen in the results given in the previous studies [12, 28, 43]. Although the trends followed by the C_f results of all turbulence models were the same, their absolute maximums at extreme points were not the same. For example, the absolute maximums of C_f results of SST k-ω turbulence model were greater than the results of Realizable k-ε and Spalart-Allmaras turbulence models, both in the recirculation region and after the reattachment point. Additionally, the C_f distribution along the lower wall can be used to determine the reattachment point, as the skin friction coefficient becomes zero at this location [44]. Thus, as shown in Figure 8, the point at which the $C_f = 0$ corresponds to x/h = 4.6, 5.32, and 5.8 for the results of Spalart-Allmaras, Realizable k-ε and SST k-ω turbulence models, respectively, which are the same values of the reattachment points reported as above sections.

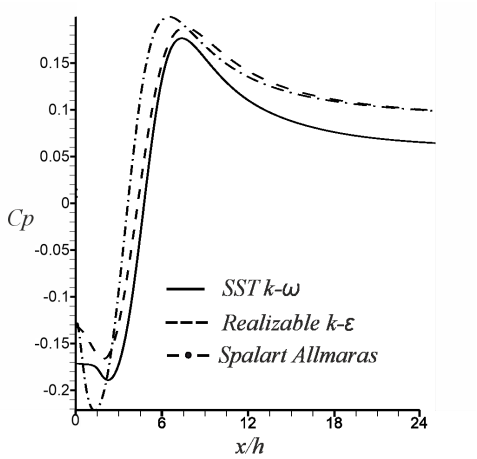


Figure 9. The profile of the pressure coefficient, C_p, on the lower wall of the flow over the BFS

A comparison of the pressure coefficient, C_p, results on the lower wall of the channel for different turbulence models is presented in Figure 9. The negative pressure coefficient observed near the step indicates the presence of a low-pressure region due to flow separation. The pressure coefficient results are in good agreement with trends reported in the literature [36,45]. Although C_p showed a similar decrease in the lower wall near the step for Realizable k-ε and Spalart-Allmaras models, the decrease in C_p almost stopped between 0<x<0.05 due to the secondary circulation region in the lower wall near the step for the SST k-ω turbulence model. Then, C_p gradually increased again in the downward flow. Among the three models, the C_p increased more sharply in the Spalart-Allmaras model. While the Realizable k-ε and Spalart Allmaras models show good agreement at the inlet, differences appear after the step and persist until reattachment.

4. CONCLUSIONS

This study compared the predictive performance of the Spalart-Allmaras, Realizable k-ε and SST k-ω turbulence models for a two-dimensional backward-facing step (BFS) flow at Re_h=9.6×10^3 and H_o/H_i=1.08. In the prediction of the reattachment length, the Spalart-Allmaras model produced the smallest error, i.e., 9.52%, followed by the Realizable k-ε model, i.e., 26.7%, and the SST k-ω model, i.e., 38.1% relative to the experimental results reported by Li et al. [9].

On the other hand, when comparing the local-flow results, the performance of the turbulence models depends on the region and the flow quantity considered. The Spalart-Allmaras model agreed more closely with the experimental velocity profiles in the shear layer and downstream of the reattachment location, whereas the SST k-ω model reproduced the velocity distribution within the recirculation region with a maximum difference of 5% and captured the secondary recirculation structure observed experimentally. On the other hand, the SST k-ω model produced the highest vorticity levels near the upper step corner. These findings show that reattachment length alone is not sufficient to establish the overall superiority of a turbulence model for separated and reattaching flows.

Nevertheless, the reported results of turbulence models should be interpreted only for the investigated condition and should not be generalized to a broad Reynolds-number range because the comparison is limited to a single Reynolds number and expansion ratio corresponding to the selected experimental benchmark. Future work might examine several Reynolds numbers, expansion ratios and inlet boundary layer conditions together with three-dimensional investigation.

In conclusion, under the present flow and geometrical conditions, the Spalart-Allmaras model is recommended when reattachment length and post-reattachment behaviour are the main quantities of interest, whereas the SST k-ω model may be preferable when the internal structure of the recirculation region is the primary focus.

5. REFERENCES

1. Uruba, V., Jonas, P. & Mazur, O. (2007). Control of a channel flow behind a backward-facing step by suction/blowing. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, *28*(4), 665-672.
2. Geropp, D. & Odenthal, H.-J. (2000). Drag reduction of motor vehicles by active flow control using the Coanda effect. *Experiments in Fluids*, *28*(1), 74-85.
3. Koca, F. ve Gürlek, C., (2023). Dikdörtgensel engellerin dairesel oluklu bir kanalın ısıl-hidrolik özellikleri üzerindeki etkilerinin sayısal olarak incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38*(3), 661-670.
4. Alnak, D.E. ve Karabulut, K. (2021). Jet giriş genişliğinin ısı transferi ve akış yapısına olan etkisinin araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(2), 331-345.
5. Lee, T. & Mateescu, D. (1998). Experimental and numerical investigation of 2-D backward-facing step flow. *Journal of Fluids and Structures*, *12*(6), 703-716.
6. Cuvier, C., Foucaut, J.-M., Braud, C. & Stanislas, M. (2013). PIV characterisation of a flow separation induced by a 22° flap. In *International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP-8)*, 28-30 August 2013, Poitiers, France.
7. Eaton, J.K. & Johnston, J.P. (1981). A review of research on subsonic turbulent flow reattachment. *AIAA Journal*, *19*(9), 1093-1100.
8. Chen, L., Asai, K., Nonomura, T., Xi, G. & Liu, T. (2018). A review of backward-facing step (BFS) flow mechanisms, heat transfer and control. *Thermal Science and Engineering Progress*, *6*, 194-216.
9. Li, Z., Zhang, D., Liu, Y., Wu, C. & Gao, N. (2020). Effect of periodic perturbations on the turbulence statistics in a backward-facing step flow. *Physics of Fluids*, *32*, 075116.
10. Tihon, J., Legrand, J. & Legentilhomme, P. (2001). Near-wall investigation of backward-facing step flows. *Experiments in Fluids*, *31*, 484-493.
11. Al-Jelawy, H., Kaczmarczyk, S., AlKhafaji, D., Mirhadizadeh, S., Lewis, R. & Cross, M. (2016). A computational investigation of a turbulent flow over a backward facing step with OpenFOAM. *2016 9th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)*, Liverpool, UK, 301-307.
12. Pedersen, O., Fleit, G., Pummer, E., Tullis, B.P. & Rüther, N. (2018). Reynolds-averaged Navier-Stokes modeling of submerged ogee weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 144*(1), 04017059.
13. Karabulut, K. & Alnak, Y. (2023). Analysis of heat transfer and flow structure from distinct model facets depending on the number of jet flows in channel. *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering, 38*(1), 49-60.
14. Schafer, F, Breuer, M & Durst, F. (2009). The dynamics of the transitional flow over a backward-facing step. *Journal of Fluid Mechanics*, *623*, 85-119.
15. Wilcox, D.C. (2006). *Turbulence modeling for CFD* (3rd ed.). DCW Industries.
16. Driver, D.M. & Seegmiller, H.L. (1985). Features of a reattaching turbulent shear layer in divergent channel flow. *AIAA Journal*, *23*(2), 163-171.
17. Gatski, T.B., Hussaini, M.Y. & Lumley, J.L. (Eds.) (1996). *Simulation and modeling of turbulent flows.* Oxford University Press.
18. Bredberg, J. & Davidson, L. (2004). Low-Reynolds number turbulence models: An approach for reducing mesh sensitivity. *Journal of Fluids Engineering*, *126*(1), 14-21.
19. Thangam, S. & Speziale, C.G. (1992). Turbulent flow past a backward-facing step: A critical evaluation of two-equation models. *AIAA Journal*, *30*(5), 1314-1320.
20. Shih, T.-H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z. & Zhu, J. (1995). A new $k-\varepsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. *Computers & Fluids*, *24*(3), 227-238.

21. Munters, W., Koloszar, L. & Planquart, P. (2022). Numerical simulation of a confined backward-facing step flow using hybrid turbulence models in OpenFOAM. In: *Conference on Fluid Flow (CMFF'22)*, Budapest, Hungary, 30August - 2 September 2022.

22. Le, H., Moin, P. & Kim, J. (1997). Direct numerical simulation of turbulent flow over a backward-facing step. *Journal of Fluid Mechanics*, *330*, 349-374.

23. Kaiktsis, L., Karniadakis, G.E. & Orszag, S.A. (1991). Onset of three-dimensionality, equilibria, and early transition in flow over a backward-facing step. *Journal of Fluid Mechanics*, *231*, 501-528.

24. Kaiktsis, L., Karniadakis, G.E. & Orszag, S.A. (1996). Unsteadiness and convective instabilities in two-dimensional flow over a backward-facing step. *Journal of Fluid Mechanics*, *321*, 157-187.

25. Neto, A.S., Grand, D., Métais, O. & Lesieur, M. (1993). A numerical investigation of the coherent vortices in turbulence behind a backward-facing step. *Journal of Fluid Mechanics*, *256*, *1-25*.

26. Zontul, H. ve Şahin, B. (2020). Zamanla sinüzoidal olarak değişen manyetik alan şiddetinin ters basamak geometrisinde akış ayrılması ve ısı transferine etkisi. *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, *35*(2), 413-424.

27. Addad, Y., Laurence, D., Talotte, C. & Jacob, M.C. (2003). Large eddy simulation of a forward–backward-facing step for acoustic source identification. *International Journal of Heat and Fluid Flow 24*(4), 562-571.

28. Khuwaranyu, K. & Putivisutisak, S. (2009). Combined low-Reynolds-number k–ω model with length scale correction term for recirculating flows. *Journal of Engineering and Technology Research*, *1*(8), 171-180.

29. Kang, S. & Choi, H. (2002). Suboptimal feedback control of turbulent flow over a backward-facing step. *J. Fluid Mech.*, *463*, 201-227.

30. Okada, K., Nonomura, T., Fujii, K. & Miyaji, K. (2012). Computational analysis of vortex structures induced by a synthetic jet to control separated flows. *International Journal of Flow Control*, *4*, 47-66.

31. Avancha, R.V.R. & Pletcher, R.H. (2002). Large eddy simulation of the turbulent flow past a backward-facing step with heat transfer and property variations. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, *23*, 601-614.

32. Dejoan, A. & Leschziner, M.A. (2004). Large eddy simulation of periodically perturbed separated flow over a backward-facing step. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, *25*, 581-592.

33. Rhee, G.H. & Sung, H.J. (2000). Numerical prediction of locally forced turbulent separated and reattaching flow. *Fluid Dynamics Research*, *26*(6), 421-436.

34. Mehrez, Z., Bouterra, M., Elcafsi, A., Belghith, A. & Le Quéré, P. (2010). Active control of flow behind a backward facing step by using a periodic perturbation. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, *5*(2), 21-29.

35. Choi, S.W. & Kim, H.S. (2020). Predicting turbulent flows in butterfly valves with the nonlinear eddy viscosity and explicit algebraic Reynolds stress models. *Phys. Fluids*, *32*, 085105.

36. Kumar, A.S., Singh, A. & Thiagarajan, K.B. (2020). Simulation of backward facing step flow using OpenFOAM. *AIP Conference Proceedings, 2204*(1), 030002.

37. Barri, M. & Andersson, H.I. (2010). Turbulent flow over a backward-facing step. Part 1. Effects of anti-cyclonic system rotation. *Journal of Fluid Mechanics*, *665*, 382-417.

38. Louda, P., Příhoda, J., Kozel, K. & Svácek, P. (2013). Numerical simulation of flows over 2D and 3D backward-facing inclined steps. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, *43*, 268-276.

39. Juste, G.L., Fajardo, P. & Guijarro, A. (2016). Assessment of secondary bubble formation on a backward-facing step geometry. *Phys. Fluids*, *28*, 074106.

40. Erkoc, A.R. (2025). Control of the flow downstream of a backward-facing step. *Master's thesis*. Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Graduate Education Institute, Department of Mechanical Engineering, Division of Mechanical Engineering, 891441.

41. Menter, F.R. (1993). Zonal two equation k-ω turbulence models for aerodynamic flows. *AIAA 23rd Fluid Dynamics Plasma dynamics, and Lasers Conference*, 6-9 July 1993 Orlando, FL, U.S.A.

42. Abu-Nada, E. (2008). Application of nanofluids for heat transfer enhancement of separated flow encountered in a backward facing step. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, *29*(1), 242-249.

43. Rani, H.P., Sheu, T.W.H. & Tsai, E.S.F. (2007). Eddy structures in a transitional backward-facing step flow. *J. Fluid Mech.*, *588*, 43-58.

44. Hu, R., Wang, L. & Fu, S. (2020). Modelling and numerical simulation for flow control. In: Qin, N., Periaux, J., Bugeda, G. (eds), *Advances in Effective Flow Separation Control for Aircraft Drag Reduction (Computational Methods in Applied Sciences, 52*, 317-338. Springer, Cham.

45. Nakagawa, H. & Nezu, I. (1987). Experimental investigation on turbulent structure of backward-facing step flow in an open channel. *Journal of Hydraulic Research*, *25*(1), 67-88.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

İmalat İşletmelerinde Talep Yanıtı Uygunluğunun CRITIC–MARCOS Yaklaşımıyla Değerlendirilmesi

Ayça ZENGİNOĞLU [1,a]

[1]*Aksaray Üniversitesi, Teknoloji Transfer Ofisi Koordinatörlüğü, Aksaray, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0002-7216-5707*

Makale Bilgileri
Geliş : 30.07.2026
Kabul : 29.09.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.2006762

Sorumlu Yazar
Ayça ZENGİNOĞLU
ayca.zenginoglu@aksaray.edu.tr

Anahtar Kelimeler
Talep yanıtı
Talep tarafı katılımı
İmalat işletmeleri
Çok kriterli karar verme
CRITIC-MARCOS

***Atıf şekli:** ZENGİNOĞLU, A., (2026). İmalat İşletmelerinde Talep Yanıtı Uygunluğunun CRITIC–MARCOS Yaklaşımıyla Değerlendirilmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 761-778.*

ÖZ

Elektrik sistemlerinde esneklik ihtiyacının artması, imalat işletmelerinin talep yanıtı programlarına katılım uygunluğunun sistematik biçimde değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Yüksek elektrik tüketimi tek başına yeterli olmadığından, veri kalitesi, yük profili ve fiili yanıt performansı birlikte ele alınmalıdır. Bu çalışmada, açık erişimli gerçek bir endüstriyel elektrik tüketimi ve talep yanıtı veri seti kullanılarak CRITIC–MARCOS tabanlı çok kriterli bir karar destek yaklaşımı önerilmiştir. 10 imalat işletmesi, tüketim büyüklüğü, yük profili, veri güvenilirliği ve talep yanıtı performansını temsil eden 7 kriterle değerlendirilmiştir. Kriter ağırlıkları CRITIC yöntemiyle belirlenmiş, uygunluk sıralaması MARCOS yöntemiyle elde edilmiştir. En yüksek ağırlık C5 eksik veri oranında (0,1656) hesaplanmıştır. Çelik-2, 0,9124 skoruyla en uygun; Dövme-2 ise 0,3385 skoruyla en düşük uygunluğa sahip alternatif olmuştur. CBL ve kapasite karşılama oranına ilişkin duyarlılık analizinde ana model ile tüm senaryolar arasındaki Spearman sıra korelasyonu 0,988 bulunmuştur. Bulgular, veri güvenilirliği ve fiili yanıt performansının uygunluk değerlendirmesinde belirleyici olduğunu göstermektedir.

Evaluation of Demand Response Suitability of Manufacturing Facilities Using the CRITIC–MARCOS Approach

Article Info
Received : 30.07.2026
Accepted : 29.09.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.2006762

Corresponding Author
Ayça ZENGİNOĞLU
ayca.zenginoglu@aksaray.edu.tr

Keywords
Demand response
Demand side participation
Manufacturing facilities
Multi-criteria decision making
CRITIC-MARCOS

***How to cite:** ZENGİNOĞLU, A., (2026). Evaluation of Demand Response Suitability of Manufacturing Facilities Using the CRITIC–MARCOS Approach. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 761-778.*

ABSTRACT

The growing need for flexibility in electric power systems necessitates a systematic evaluation of manufacturing facilities' eligibility to participate in demand response programs. Since high electricity consumption alone is not sufficient, data quality, load profile, and actual response performance must be considered together. This study proposes a CRITIC–MARCOS-based multi-criteria decision support approach using a real-world, open-access dataset of industrial electricity consumption and demand response data. 10 manufacturing facilities were evaluated using 7 criteria representing consumption magnitude, load profile, data reliability, and demand response performance. Criterion weights were determined using the CRITIC method, and the suitability ranking was obtained using the MARCOS method. The highest weight was calculated for C5, the missing data rate (0.1656). Steel-2 was the most suitable alternative with a score of 0.9124, while Forging-2 had the lowest suitability with a score of 0.3385. In the sensitivity analysis of CBL and the capacity fulfillment rate, the Spearman rank correlation between the base model and all scenarios was 0.988. The findings indicate that data reliability and actual response performance are decisive factors in the suitability assessment.

1. GİRİŞ

Elektrik sistemlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının artan payı, elektrifikasyon eğilimleri ve tüketim tarafındaki değişkenlik, sistem esnekliği ihtiyacını daha belirgin hale getirmektedir [1,2]. Geleneksel elektrik sistemlerinde dengeleme ihtiyacı çoğunlukla arz tarafı kaynakları üzerinden karşılanırken, son yıllarda talep tarafının da aktif bir esneklik kaynağı olarak değerlendirilmesi önem kazanmıştır. Talep yanıtı, tüketicilerin elektrik tüketimlerini sistem koşullarına, fiyat sinyallerine veya program çağrılarına göre değiştirmesine dayanan bir uygulama alanıdır. Siano [1], talep yanıtının akıllı şebekelerde sistem güvenilirliğinin artırılması, tepe yükünün azaltılması, yatırım gereksinimlerinin ertelenmesi ve şebeke işletiminin desteklenmesi açısından önemli faydalar sunduğunu belirtmektedir. Gils [2] ise Avrupa ölçeğinde talep yanıtı potansiyelini inceleyerek talep tarafı esnekliğinin farklı tüketici grupları ve zaman dilimleri için ölçülebilir bir kaynak olduğunu ortaya koymuştur.

İmalat sanayi, yüksek elektrik tüketimi ve belirli süreçlerde yönetilebilir yük yapısı nedeniyle talep yanıtı programları açısından önemli bir uygulama alanı sunmaktadır [3]. Bununla birlikte, bir işletmenin yüksek tüketim düzeyine sahip olması tek başına talep yanıtı için uygun bir katılımcı olduğu anlamına gelmemektedir. Talep yanıtı uygunluğu; tüketim büyüklüğünün yanı sıra tüketim profilinin kararlılığı, ölçüm verilerinin güvenilirliği, çağrı anında gerçekleşen yük azaltımı ve taahhüt edilen kapasitenin karşılanma düzeyi gibi farklı göstergelerin birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir [4,5]. Bu nedenle sanayi işletmelerinin talep yanıtı programlarına katılım uygunluğunun belirlenmesi, yalnızca tüketim düzeyine dayalı teknik bir analiz değil, çok kriterli bir karar problemi olarak ele alınmalıdır.

Son yıllarda endüstriyel elektrik tüketim verileri çoğunlukla tüketim tahmini, kısa dönem yük tahmini, anomali tespiti ve talep tarafı esnekliğinin modellenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Lee ve arkadaşları [6], talep yanıtı piyasasına katılan imalat işletmelerine ait elektrik tüketim verilerini ve talep yanıtı katılım bilgilerini içeren açık erişimli bir veri seti yayımlamıştır. Veri seti, işletmelerin elektrik tüketim değerlerinin yanı sıra üretim türleri, talep yanıtı katılım tarihleri, zorunlu azaltım kapasiteleri ve gerçekleşen yanıt kapasiteleri gibi bilgileri de içermektedir. Moon ve arkadaşları [7], endüstriyel tesislerde güç tüketiminin tahmin edilmesi ve enerji tüketimindeki anomalilerin tespit edilmesi amacıyla XGBoost ve LSTM-AE tabanlı bir çerçeve geliştirmiştir. Yang ve arkadaşları [8] ise kısa dönem endüstriyel enerji tüketimi tahmini için adaptif ayrıştırma ve paralel sinir ağı yapısını birleştiren AUDPNet yaklaşımını önermiştir. Bu çalışmalar, endüstriyel tüketim davranışının modellenmesi ve öngörülmesi açısından önemli katkılar sunmakla birlikte, ağırlıklı olarak tahminleme ve anomali tespiti ekseninde konumlanmaktadır.

Endüstriyel enerji yönetimi ve talep yanıtı alanında karar destek boyutunu ele alan çalışmalar son yıllarda artmıştır. Enerji yönetimi problemlerinde çok kriterli karar verme yöntemlerinin farklı teknik, ekonomik ve çevresel kriterleri birlikte değerlendirmeye imkân sağladığı belirtilmektedir [9]. Bu kapsamda Kshanh ve Tanaka [10], enerji verimliliği projelerinin değerlendirilmesinde çok kriterli karar verme (ÇKKV) yaklaşımlarını karşılaştırmalı olarak incelemiş; Fatras ve arkadaşları [4] imalat süreçlerinin elektrik piyasası katılım seçenekleriyle eşleştirilmesine yönelik çok kriterli bir değerlendirme çerçevesi önermiştir. Rusche ve arkadaşları [5] endüstriyel talep tarafı yönetiminde enerji esnekliğini gelir ve risk boyutlarıyla değerlendiren bir esneklik skoru geliştirirken, Alcázar-Ortega ve arkadaşları [11] endüstriyel düzeyde talep yanıtı potansiyelinin uygulamalı olarak değerlendirilebileceğini göstermiştir. Ayrıca dos Santos ve arkadaşları [12] endüstriyel senaryolarda talep yanıtı uygulamalarını sistematik olarak haritalamış, Ranaboldo ve arkadaşları [13] ise endüstriyel talep yanıtının mevcut durumunu, potansiyelini, motivasyonlarını ve uygulama güçlüklerini kapsamlı biçimde değerlendirmiştir. Bu çalışmalar, endüstriyel enerji yönetimi ve talep tarafı katılımında karar destek yaklaşımlarının işletme düzeyinde uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Benzer şekilde, ÇKKV yöntemleri farklı sektörlerde gerçek veya uygulama temelli karar problemlerinin yapılandırılması ve alternatiflerin önceliklendirilmesi amacıyla da yaygın biçimde kullanılmaktadır. Zenginoğlu ve Yüksel [14], İstanbul Havalimanı için yenilenebilir enerji teknolojilerini yaşam döngüsü değerlendirmesi ve ÇKKV yöntemlerini bütünleştiren vaka temelli bir çerçeveyle incelemiştir. Erik ve arkadaşları [15], imalat bağlamında meyve nektarı ürün karması problemini AHP ve matematiksel programlamayı bütünleştirerek ele almıştır. Hamidy ve arkadaşları [16] ise deprem hazırlığı kapsamında

acil toplanma alanlarının belirlenmesi ve önceliklendirilmesinde birden fazla ÇKKV yöntemini bütünleşik biçimde kullanmıştır. Eşiyok ve arkadaşları [17], Entropy ve Criteria Importance Through Intercriteria Correlation (CRITIC) ağırlıklandırma yöntemleri ile Evaluation based on Distance from Average Solution (EDAS) yöntemini bütünleştirerek G7 ülkeleri ve Türkiye'nin çevresel performansını değerlendirmiş ve kriter ağırlıklarının sıralamalar üzerindeki etkisini duyarlılık analiziyle incelemiştir. Bu örnekler, ÇKKV yaklaşımlarının farklı uygulama alanlarında gerçek karar problemlerinin sistematik biçimde değerlendirilmesine olanak sağladığını göstermektedir.

Türkiye bağlamında ise talep tarafı katılımı, talep yanıtı ve enerji yönetimiyle ilişkili karar destek konuları; elektrik piyasası yapısı, talep birleştiriciler, yük kaydırma, akıllı şebeke uygulamaları, fiyatlandırma ve sürdürülebilirlik performansı gibi farklı boyutlarda ele alınmaktadır. Tör ve arkadaşları [18], talep birleştiricilerin rol aldığı elektrik piyasa mekanizmalarını inceleyerek uluslararası uygulamaları, koordinasyon ihtiyacını ve Türkiye'deki durumu değerlendirmiştir. Çakmak ve Altaş [19], Türkiye'deki müşterilerin akıllı şebekelerde yük kaydırmaya dayalı talep tarafı yönetimine yönelik tepkilerini ve tutumlarını incelemiştir. Sancar ve arkadaşları [20], akıllı ev düzeyinde talep yanıtı programı kapsamında enerji yönetimini dinamik fiyatlandırma ve kullanıcı konforu çerçevesinde ele almıştır. Yalçın ve Karakaş [21] ise enerji sektöründeki bir firmanın kurumsal sürdürülebilirlik performansını değerlendirmek amacıyla CRITIC ve EDAS yöntemlerini bütünleştiren bir yaklaşım önermiştir. Abdulvahitoğlu ve arkadaşları [22] ise Türkiye'de elektrikli araç şarj istasyonu yer seçimi problemini birden fazla ÇKKV yöntemiyle ele alarak alternatif sıralamalarını karşılaştırmalı biçimde değerlendirmiştir. Bu çalışmalar, konunun piyasa tasarımı, tüketici davranışı, akıllı şebeke, fiyatlandırma, enerji yönetimi ve ÇKKV temelli sürdürülebilirlik değerlendirmesi boyutlarıyla incelendiğini göstermektedir. Buna karşılık, imalat işletmesi düzeyinde gerçek tüketim ve talep yanıtı katılım verilerinden türetilen göstergelerle talep yanıtı uygunluğunun çok kriterli olarak önceliklendirilmesine yönelik çalışmalar sınırlıdır.

Mevcut literatür incelendiğinde, çalışmaların önemli bir bölümünün endüstriyel elektrik tüketiminin tahmin edilmesi, anomali tespiti, yük profili modellemesi ve talep yanıtı potansiyelinin genel düzeyde değerlendirilmesi gibi konulara odaklandığı görülmektedir [6-8,12,13]. Uluslararası çalışmalar daha çok tahminleme, teknik analiz, potansiyel değerlendirmesi ve piyasa katılımı uygunluğu ekseninde gelişirken, Türkiye bağlamındaki çalışmaların piyasa mekanizmaları, talep birleştiriciler, yük kaydırma, fiyatlandırma yaklaşımları ve düzenleyici çerçeve üzerinde yoğunlaştığı anlaşılmaktadır [4,5,18-20]. Buna karşılık, imalat işletmelerinin talep yanıtı programlarına katılım uygunluğunu gerçek tüketim ve talep yanıtı performans verilerinden türetilen ölçülebilir kriterlerle değerlendiren ve işletmeleri uygunluk düzeylerine göre çok kriterli olarak önceliklendiren çalışmalar sınırlı kalmaktadır. Oysa talep yanıtı uygunluğu yalnızca tüketim hacmine göre değerlendirilemez; veri güvenilirliği, yük profilinin kararlılığı, Customer Baseline Load (CBL; müşteri referans yükü) temelinde hesaplanan gerçekleşen azaltım oranı ve kapasite karşılama performansı gibi unsurların birlikte ele alınması gerekir [4,5,23].

Bu çalışma, söz konusu boşluktan hareketle imalat işletmelerinin talep yanıtı programlarına katılım uygunluğunu değerlendirmek için CRITIC ve Measurement Alternatives and Ranking according to Compromise Solution (MARCOS) yöntemlerini bütünleştiren çok kriterli bir karar destek yaklaşımı önermektedir. Uygulamada, Lee ve arkadaşları [6] tarafından yayımlanan açık erişimli endüstriyel elektrik tüketimi ve talep yanıtı veri setinde yer alan 10 imalat işletmesi karar alternatifi olarak ele alınmıştır. Elektrik tüketim verilerinden ortalama tüketim, pik tüketim, değişkenlik katsayısı, yük faktörü ve eksik veri oranı; talep yanıtı katılım kayıtlarından ise CBL'ye göre azaltım oranı ve kapasite karşılama oranı türetilmiştir. Kriter ağırlıkları CRITIC yöntemiyle nesnel olarak hesaplanmış, işletmelerin uygunluk sıralaması MARCOS yöntemiyle elde edilmiştir. Ayrıca CBL hesaplama yaklaşımı ve kapasite karşılama oranının ele alınış biçimine göre duyarlılık analizleri yapılmıştır.

Çalışmanın temel katkısı, açık erişimli gerçek dünya verilerinden elde edilen ölçülebilir göstergeleri nesnel ağırlıklandırma ve çok kriterli sıralama yöntemleriyle bütünleştirerek talep yanıtı uygunluğunu işletme düzeyinde değerlendirmesidir. Böylece aynı veri seti, tahminleme problemi yerine karar destek ve önceliklendirme problemi kapsamında ele alınmaktadır. Bulgular Türkiye'deki sanayi işletmelerine doğrudan genellenemese de önerilen karar destek çerçevesi ülkemizde gelişmekte olan talep tarafı katılımı ve toplayıcılık uygulamaları için uyarlanabilir bir ön değerlendirme aracı sunmaktadır. Elektrik Piyasasında

Toplayıcılık Faaliyeti Yönetmeliği'nin yayımlanması ve TEİAŞ'ın talep tarafı katılımı, tedarik süreçlerine yönelik duyurularla sanayi tesislerinin esneklik potansiyelinin veri temelli yöntemlerle değerlendirilmesi ihtiyacını daha görünür hale getirmektedir.

Makalenin izleyen bölümlerinde sırasıyla kullanılan veri seti ve yöntemsel çerçeve tanıtılmakta, ardından CRITIC–MARCOS modelinden elde edilen bulgular ve duyarlılık analizi sonuçları sunulmaktadır. Son bölümde ise çalışmanın temel sonuçları, sınırlılıkları ve gelecek çalışmalara yönelik öneriler ele alınmaktadır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Bu çalışmada, imalat işletmelerinin talep yanıtı programlarına katılım uygunluğunu değerlendirmek amacıyla açık erişimli endüstriyel elektrik tüketimi veri seti kullanılmıştır. Lee ve arkadaşları [6] tarafından yayımlanan veri seti, talep yanıtı programına katılan 10 imalat işletmesine ait bir dakikalık elektrik tüketim ölçümlerini, işletme türlerini, talep yanıtı katılım tarihlerini, zorunlu azaltım kapasitelerini ve gerçekleşen yanıt kapasitelerini içermektedir. Özgün veri seti belirli bir ülke ve dönem bağlamında derlenmiş olmakla birlikte, bu çalışmada veri seti imalat işletmelerinin talep yanıtı katılım uygunluğunu çok kriterli bir karar problemi olarak değerlendirmek amacıyla ele alınmıştır.

Veri setinde yer alan elektrik tüketimi ölçümleri 1 dakikalık zaman çözünürlüğüne sahiptir ve 01.03.2019–30.09.2019 dönemini kapsamaktadır. Bu yönüyle veri seti, yalnızca toplam tüketim seviyelerini değil, tüketim profillerindeki dalgalanmaları, pik yük davranışını ve talep yanıtı olayları sırasındaki değişimleri incelemek için de uygun bir yapı sunmaktadır. Ayrıca veri setinde talep yanıtı olaylarına ilişkin zorunlu azaltım kapasitesi ve gerçekleşen yanıt kapasitesi bilgileri de yer almaktadır. Bu bilgiler, işletmelerin yalnızca enerji tüketim büyüklüğüne göre değil, aynı zamanda talep yanıtı çağrısı altındaki fiili performansına göre de değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Çalışmada karar alternatifleri olarak veri setinde yer alan 10 imalat işletmesi kullanılmıştır. Bu işletmeler farklı üretim alanlarını temsil etmekte olup, çimento, dövme, metal, kâğıt ve çelik sektörlerinden oluşmaktadır. Karar alternatifleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Karar alternatifleri

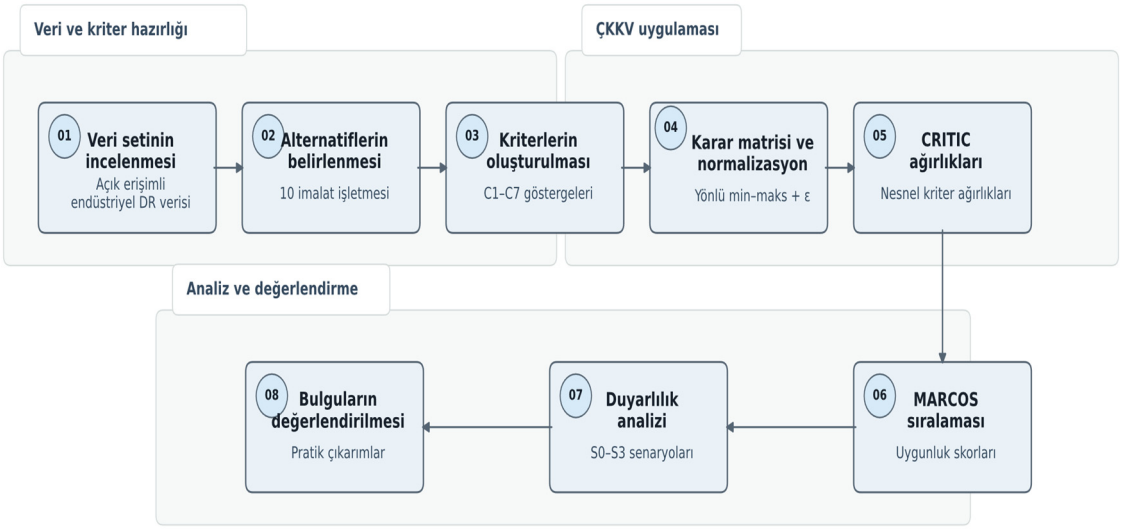
Alternatif kodu	İşletme
A1	Çimento-1
A2	Çimento-2
A3	Dövme-1
A4	Dövme-2
A5	Metal-1
A6	Metal-2
A7	Metal-3
A8	Kâğıt
A9	Çelik-1
A10	Çelik-2

Veri setinin bu çalışma açısından temel avantajı, endüstriyel elektrik tüketim verilerinin talep yanıtı katılım bilgilerinin yanı sıra birlikte sunulmasıdır. Yakın dönem çalışmalarda aynı veri setinin elektrik tüketimi tahmini, kısa dönem endüstriyel enerji tüketimi tahmini ve anomali tespiti gibi amaçlarla kullanıldığı görülmektedir. Örneğin Moon ve arkadaşları [7], veri setini LSTM-AE ve XGBoost tabanlı bir fabrika enerji yönetimi çerçevesinde tüketim tahmini ve anomali tespiti için kullanırken; Yang ve arkadaşları [8], kısa dönem endüstriyel enerji tüketimi tahmini amacıyla AUDPNet modelini geliştirmiştir. Bu çalışmada ise veri seti tahminleme problemi için değil, imalat işletmelerinin talep yanıtı programlarına katılım uygunluğunu değerlendiren çok kriterli bir karar problemi için kullanılmıştır. Böylece tüketim büyüklüğü, tüketim profili, veri güvenilirliği ve talep yanıtı performansı birlikte ele alınmıştır.

Bu kapsamda her bir işletme için elektrik tüketim verilerinden ortalama tüketim, pik tüketim, değişkenlik katsayısı, yük faktörü ve eksik veri oranı hesaplanmıştır. Talep yanıtı bilgileri kullanılarak CBL değerine göre net talep azaltım oranı ve kapasite karşılama oranı belirlenmiştir. Lee ve arkadaşları [6], CBL'yi talep yanıtı piyasalarında kullanılan genel bir referans yük standardı olarak ele almakta ve ilgili veri setinde CBL değerini, talep yanıtı olayının gerçekleştiği zaman aralığı için geçmiş beş günün dördündeki ortalama tüketim üzerinden tanımlamaktadır. Böylece her bir işletme, talep yanıtı uygunluğunu temsil eden yedi kriter üzerinden değerlendirilmiştir. Kriterlerin belirlenmesi ve karar matrisinin oluşturulmasına ilişkin ayrıntılar bir sonraki bölümde açıklanmıştır.

2.2. Metot

Bu çalışmada izlenen yöntemsel akış Şekil 1'de sunulmuştur. İlk aşamada açık erişimli endüstriyel elektrik tüketimi ve talep yanıtı veri seti incelenmiş, ardından karar alternatifleri ve değerlendirme kriterleri belirlenmiştir. Daha sonra karar matrisi oluşturularak kriterler yönlü min–maks normalizasyonu ve ε düzeltmesi ile karşılaştırılabilir hâle getirilmiştir. Kriter ağırlıkları CRITIC yöntemiyle hesaplanmış, imalat işletmelerinin talep yanıtı katılım uygunluk sıralaması MARCOS yöntemiyle elde edilmiştir. Son aşamada CBL hesaplama yaklaşımı ve C7 kapasite karşılama oranına ilişkin duyarlılık senaryoları uygulanmıştır.



Şekil 1. Çalışmanın yöntemsel akış şeması

2.2.1. Kriterlerin Belirlenmesi ve Karar Matrisinin Oluşturulması

Bu çalışmada karar problemi, imalat işletmelerinin talep yanıtı programlarına katılım uygunluğunun değerlendirilmesi olarak tanımlanmıştır. Karar alternatifleri veri setinde yer alan 10 imalat işletmesinden oluşmaktadır. Kriterler belirlenirken yalnızca elektrik tüketim büyüklüğü değil, işletmelerin tüketim profili, veri güvenilirliği ve talep yanıtı olayları sırasındaki fiili yanıt performansı da dikkate alınmıştır.

Veri setinde, elektrik tüketimi ölçümleriyle birlikte talep yanıtı katılım tarihleri, zorunlu azaltım kapasiteleri ve gerçekleşen yanıt kapasiteleri de sunulmaktadır. Bu yapı, işletmelerin yalnızca tüketim düzeyi bakımından değil, aynı zamanda talep yanıtı yükümlülüğüne karşı gösterdikleri performans bakımından da karşılaştırılmasına imkân vermektedir.

Başlangıçta ortalama tüketim, pik tüketim, değişkenlik katsayısı, pik/ortalama oranı, yük faktörü, eksik veri oranı, CBL değerine göre talep yanıtı azaltım oranı ve kapasite karşılama oranı olmak üzere 8 gösterge değerlendirilmiştir. Ancak ön inceleme aşamasında pik/ortalama oranı ile yük faktörü arasında yüksek düzeyde ters yönlü bir ilişki bulunduğu görülmüştür. Bu nedenle, bilgi tekrarını azaltmak amacıyla pik/ortalama oranı karar matrisinden çıkarılmış ve nihai model 7 kriter üzerinden oluşturulmuştur. Nihai karar kriterleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Karar kriterleri ve yönleri

Kriter kodu	Kriter	Açıklama	Yön
C1	Ortalama tüketim	İncelenen dönemde işletmenin ortalama elektrik tüketimi	Fayda
C2	Pik tüketim	İncelenen dönemde gözlenen en yüksek elektrik tüketimi	Fayda
C3	Değişkenlik katsayısı	Tüketim profilindeki göreli değişkenlik düzeyi	Maliyet
C4	Yük faktörü	Ortalama tüketimin pik tüketime oranı	Fayda
C5	Eksik veri oranı	Veri setindeki eksik gözlem oranı	Maliyet
C6	CBL'ye göre talep yanıtı azaltım oranı	Talep yanıtı olayı sırasında müşteri referans yüküne göre gerçekleşen net azaltım oranı	Fayda
C7	Kapasite karşılama oranı	Gerçekleşen yanıt kapasitesinin zorunlu azaltım kapasitesine oranı	Fayda

C1 ve C2 kriterleri, işletmenin talep yanıtı açısından sahip olduğu teknik ölçeği temsil etmektedir. Ortalama tüketim, işletmenin genel enerji kullanım düzeyini gösterirken; pik tüketim, kısa süreli yüksek yük davranışını yansıtmaktadır. Bu iki kriterin yüksek olması, işletmenin talep yanıtı programlarında daha büyük bir yük esnekliği potansiyeli sunabileceği anlamına gelmektedir [3,4].

C3 değişkenlik katsayısı, tüketim profilindeki göreli dalgalanmayı göstermektedir. Talep yanıtı uygulamalarında öngörülebilir ve yönetilebilir tüketim profilleri daha avantajlı olduğundan, yüksek değişkenlik olumsuz bir özellik olarak değerlendirilmiştir [4,5]. Bu nedenle C3 maliyet yönlü bir kriter olarak ele alınmıştır. C4 yük faktörü ise ortalama tüketimin pik tüketime oranını göstermekte ve tüketim profilinin dengesini temsil etmektedir. Yük faktörünün yüksek olması, daha kararlı bir tüketim yapısına işaret ettiği için fayda yönlü olarak kabul edilmiştir.

C5 eksik veri oranı, karar matrisine veri güvenilirliğini temsil eden bir kriter olarak dahil edilmiştir. Eksik veri oranının yüksek olması, işletmeye ilişkin tüketim profili ve talep yanıtı davranışının daha düşük güvenilirlikle değerlendirilmesine yol açabileceğinden, bu kriter maliyet yönlü olarak tanımlanmıştır.

Talep yanıtı performansının değerlendirilebilmesi için olay anında gerçekleşen tüketimin, talep yanıtı olayı gerçekleşmemiş olsaydı beklenen tüketim düzeyini temsil eden bir referans yük ile karşılaştırılması gerekmektedir. Bu referans değer literatürde Customer Baseline Load (CBL; müşteri referans yükü) olarak tanımlanmakta ve talep yanıtı etkisinin ölçülmesinde temel karşılaştırma değeri olarak kullanılmaktadır. CBL hesaplama yaklaşımının seçimi, yük azaltımı ve performans değerlendirmesi sonuçlarını etkileyebildiğinden, talep yanıtı değerlendirmelerinde önemli bir metodolojik karar noktasıdır [23]. Lee ve arkadaşları [6] tarafından sunulan veri setinde CBL, talep yanıtı olayının gerçekleştiği zaman dilimleri için geçmiş tüketim değerleri esas alınarak hesaplanmaktadır. Bu doğrultuda bu çalışmada C6 kriteri, CBL'ye göre talep yanıtı azaltım oranı olarak tanımlanmıştır. C6 kriteri, talep yanıtı olayı sırasında müşteri referans yükü ile gerçekleşen tüketim arasındaki farkın müşteri referans yüküne oranını ifade etmektedir. Pozitif değerler, talep yanıtı kapsamında yük azaltımı sağlandığını; negatif değerler ise olay sırasında tüketimin referans yükün üzerinde gerçekleştiğini göstermektedir. Bu kriter, işletmenin yalnızca büyük tüketici olup olmadığını değil, talep yanıtı çağrısı altında fiilen yük azaltma davranışı gösterip göstermediğini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Ayrıca CBL yaklaşımının sonuçlar üzerindeki etkisini incelemek için duyarlılık analizi yapılmıştır.

C7 kapasite karşılama oranı, gerçekleşen yanıt kapasitesinin zorunlu azaltım kapasitesine oranını ifade etmektedir. Bu kriter, işletmenin talep yanıtı programında üstlendiği azaltım yükümlülüğünü ne ölçüde karşıladığını göstermektedir. Ana modelde C7 değeri %100 ile sınırlandırılmıştır. Bu tercih, kapasite karşılama oranının temel olarak işletmenin zorunlu azaltım yükümlülüğünü yerine getirip getirmediğini temsil etmesine dayanmaktadır. %100 değeri, zorunlu azaltım kapasitesinin tamamen karşılandığını ifade ederken, %100'ün üzerindeki değerler işletmenin yükümlülüğünün üzerinde yanıt verdiğini göstermektedir. Bununla birlikte, aşırı yüksek gerçekleşmelerin modele doğrusal biçimde aktarılması, C7 kriterinin diğer kriterler üzerindeki etkisini orantısız biçimde artırabilir. Bu nedenle ana modelde C7 değeri %100 ile sınırlandırılmış; zorunlu kapasitenin üzerindeki yanıtlar ek üstünlük olarak modele yansıtılmamıştır. Bu veri işleme kararının sıralama üzerindeki etkisi, ham C7 değerlerinin kullanıldığı duyarlılık senaryolarında ayrıca incelenmiştir.

Kriterlerin hesaplanmasında kullanılan temel ifadeler aşağıda verilmiştir. x_{it}, i. işletmenin t. zamandaki elektrik tüketimini; μ_i, ortalama tüketimi; σ_i, standart sapmayı; $x_{i,\max}$ pik tüketimi göstermektedir. Eşitlik (1) ortalama tüketimi, Eşitlik (2) pik tüketimi, Eşitlik (3) değişkenlik katsayısını, Eşitlik (4) yük faktörünü ve Eşitlik (5) eksik veri oranını ifade etmektedir. Bu göstergeler, her bir işletmenin tüketim ölçeğini, tüketim profilindeki değişkenliği ve veri güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır.

$$C1_i = \frac{1}{T_i}\sum_{t=1}^{T_i} x_{it} \tag{1}$$

$$C2_i = \max_t(x_{it}) \tag{2}$$

$$C3_i = \frac{\sigma_i}{\mu_i} \tag{3}$$

$$C4_i = \frac{\mu_i}{x_{i,\max}} \tag{4}$$

$$C5_i = \frac{\text{Eksik gözlem sayısı}_i}{\text{Toplam gözlem sayısı}_i} \times 100 \tag{5}$$

Talep yanıtı performansına ilişkin C6 kriteri, talep yanıtı olay zamanları dikkate alınarak Eşitlik (6)'daki şekilde hesaplanmıştır:

$$C6_i = \frac{\sum_{t\in E_i}(CBL_{it} - x_{it})}{\sum_{t\in E_i} CBL_{it}} \times 100 \tag{6}$$

Burada E_i, i. işletmeye ait talep yanıtı olay zamanlarını; CBL_{it}, ilgili zaman dilimindeki müşteri referans yükünü; x_{it}ise gerçekleşen tüketimi göstermektedir. Pozitif değerler, CBL'ye göre yük azaltımı gerçekleştiğini; negatif değerler ise talep yanıtı olayı sırasında tüketimin referans yükün üzerinde kaldığını göstermektedir.

C7 kapasite karşılama oranı ise Eşitlik (7)'deki gibi hesaplanmıştır:

$$C7_i = \frac{\sum_{e\in D_i} RC_{ie}}{\sum_{e\in D_i} MRC_{ie}} \times 100 \tag{7}$$

Burada RC_{ie}, i. işletmenin e. talep yanıtı olayındaki gerçekleşen yanıt kapasitesini; MRC_{ie}, zorunlu azaltım kapasitesini; D_i ise ilgili işletmeye ait talep yanıtı olaylarını göstermektedir. Ana modelde kullanılan değer Eşitlik (8)'deki şekilde sınırlandırılmıştır:

$$C7_i^* = \min(C7_i, 100) \tag{8}$$

Bu işlemin amacı, kapasite yükümlülüğünü karşılayan işletmeler arasında aşırı yüksek yanıt değerlerinden kaynaklanabilecek baskınlığı azaltmaktır. Bu kapsamda oluşturulan ham karar matrisi Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Ham karar matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
A1 (Çimento-1)	1094,593	2844,80	0,268	0,385	0,396	65,290	100,000
A2 (Çimento-2)	529,896	7481,60	0,188	0,071	0,222	52,146	100,000
A3 (Dövme-1)	56,903	188,16	0,838	0,302	0,488	94,127	74,000
A4 (Dövme-2)	54,252	119,04	0,652	0,456	0,043	-158,621	0,225
A5 (Metal-1)	123,824	259,20	0,591	0,478	0,002	73,959	100,000
A6 (Metal-2)	369,327	786,23	0,607	0,470	10,132	81,709	100,000
A7 (Metal-3)	111,304	293,76	0,722	0,379	0,193	70,755	100,000
A8 (Kâğıt)	479,977	856,80	0,184	0,560	0,001	28,067	50,040
A9 (Çelik-1)	47,116	131,04	0,762	0,360	1,512	49,913	98,125
A10 (Çelik-2)	7375,163	14966,25	0,367	0,493	0,000	53,274	100,000

Çizelge 3, işletmeler arasında belirgin bir heterojenlik olduğunu göstermektedir. Çelik-2, ortalama tüketim ve pik tüketim açısından en yüksek değerlere sahip olup büyük ölçekli bir talep yanıtı potansiyeline işaret etmektedir. Dövme-2 ise CBL'ye göre negatif talep yanıtı azaltım oranı ve oldukça düşük kapasite karşılama oranına sahiptir. Bu durum, söz konusu işletmenin talep yanıtı programına kayıtlı olmasına rağmen olay anında beklenen yük azaltımını sağlayamadığını göstermektedir. Metal-2, talep yanıtı azaltım oranı bakımından güçlü görünmekle birlikte, yüksek eksik veri oranı nedeniyle veri güvenilirliği açısından dikkatle değerlendirilmesi gereken bir alternatiftir.

Oluşturulan karar matrisi, izleyen aşamada kriter ağırlıklarının CRITIC yöntemiyle belirlenmesi ve imalat işletmelerinin talep yanıtı katılım uygunluğunun MARCOS yöntemiyle sıralanması için kullanılmıştır.

2.2.2. Normalizasyon ve CRITIC Yöntemiyle Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi

Çok kriterli karar verme problemlerinde kriterlerin farklı ölçü birimlerine ve değer aralıklarına sahip olması, karar matrisinin karşılaştırılabilir hâle getirilmesini gerektirmektedir. Normalizasyon aşaması, karar sonuçlarını etkileyebilen temel adımlardan biridir. Aytekin [24], normalizasyon tekniklerinin veri yapısına bağlı olarak farklı avantajlar ve sınırlılıklar taşıdığını belirtmektedir. Bu çalışmada karar matrisinde negatif değer içeren C6 kriteri ve sıfır değer alabilen C5 kriteri bulunduğundan, tüm kriterler fayda/maliyet yönleri dikkate alınarak yönlü min–maks normalizasyonu uygulanarak pozitif performans skorlarına dönüştürülmüştür. MARCOS uygulamalarında normalizasyon seçiminin karar sonuçlarını etkileyebildiği Trung [25] tarafından da vurgulandığından, bu çalışmada karar matrisinin veri yapısına uygun bir normalizasyon yaklaşımı tercih edilmiştir.

Fayda yönlü kriterler için normalizasyon Eşitlik (9), maliyet yönlü kriterler için ise Eşitlik (10) ile yapılmıştır.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} \tag{9}$$

$$r_{ij} = \frac{\max_i x_{ij} - x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} \tag{10}$$

Burada x_{ij}, i. alternatifin j. kritere ait ham değerini; r_{ij} ise normalize edilmiş performans değerini göstermektedir. Normalizasyon sonrasında sıfır değerlerin çarpımsal işlemler ve ideal/anti-ideal çözüm hesapları üzerinde sorun oluşturmaması için küçük bir ε düzeltmesi uygulanmıştır:

$$r'_{ij} = \varepsilon + (1 - \varepsilon) r_{ij} \tag{11}$$

Normalizasyon tekniklerinin veri yapısına bağlı sınırlılıkları bulunduğundan, özellikle sıfır ve negatif değerlerin yer aldığı karar matrislerinde hesaplama kararlılığı ayrıca dikkate alınmalıdır [24]. Bu çalışmada karar matrisinde negatif değer içeren C6 kriteri ve sıfır değer alabilen C5 kriteri bulunduğundan, yönlü min–maks normalizasyonu sonrasında tüm performans değerleri küçük bir pozitif düzeltme katsayısı ile pozitif aralığa taşınmıştır. Bu amaçla $\varepsilon = 0{,}001$ alınmış ve $r'_{ij} = \varepsilon + (1 - \varepsilon) r_{ij}$ dönüşümü uygulanmıştır. Böylece normalize karar matrisi MARCOS yöntemindeki ideal/anti-ideal çözüm hesapları için tutarlı bir performans matrisine dönüştürülmüştür.

Normalizasyon ve ε düzeltmesi sonucunda elde edilen pozitif performans matrisi, kriter ağırlıklarının hesaplanmasında kullanılmıştır. Bu aşamada kriter ağırlıkları, karar verici yargısına ihtiyaç duymadan karar matrisinin içerdiği bilgi yapısından yararlanan CRITIC yöntemiyle belirlenmiştir. CRITIC yöntemi, Diakoulaki ve arkadaşları [26] tarafından önerilmiş olup, kriterlerin hem değişkenlik düzeyini hem de diğer kriterlerle olan korelasyon ilişkisini dikkate alan nesnel bir ağırlıklandırma yaklaşımıdır.

CRITIC yönteminde öncelikle her kriter için standart sapma değeri σ_j hesaplanır. Daha sonra kriterler arası korelasyon katsayıları kullanılarak her kriterin taşıdığı bilgi miktarı Eşitlik (12) ile belirlenir:

$$C_j = \sigma_j \sum_{k=1}^{n} (1 - \rho_{jk}) \tag{12}$$

Burada C_j, j. kriterin bilgi miktarını; σ_j, ilgili kriterin standart sapmasını; ρ_{jk}ise j. ve k. kriterler arasındaki korelasyon katsayısını ve n, toplam kriter sayısını göstermektedir. Son aşamada kriter ağırlıkları Eşitlik (13) ile hesaplanmıştır:

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^{n} C_k} \tag{13}$$

Eşitlik (12) ve Eşitlik (13) kullanılarak her bir kriter için CRITIC ağırlıkları hesaplanmış; elde edilen ağırlık değerleri Bulgular ve Tartışma bölümünde sunulmuştur.

2.2.3. MARCOS Yöntemiyle Ana Sıralamanın Elde Edilmesi

Bu çalışmada imalat işletmelerinin talep yanıtı katılım uygunluk sıralaması MARCOS yöntemi ile elde edilmiştir. MARCOS, alternatifleri ideal ve anti-ideal referans çözümlerle ilişkili olarak değerlendiren çok kriterli bir karar verme yöntemidir. Yöntem, alternatiflerin hem ideal çözüme yakınlığını hem de anti-ideal çözüme uzaklığını dikkate alarak nihai fayda değerlerini hesaplamaktadır. Stević ve arkadaşları [27] tarafından geliştirilen MARCOS yöntemi, farklı kriter ve alternatif sayısına sahip karar problemlerinde uygulanabilen referans temelli bir sıralama yaklaşımıdır.

Bu çalışmada MARCOS yöntemi, Eşitlik (9) – (11) ile elde edilen yönlü min–maks normalize edilmiş ve ε düzeltmesi uygulanmış pozitif performans matrisi üzerinden yürütülmüştür. Böylece negatif değer içeren C6 kriteri ve sıfır değer alabilen C5 kriterinin MARCOS hesaplama adımlarında oluşturabileceği sayısal uyumsuzluklar önlenmiştir. MARCOS uygulamalarında normalizasyon seçiminin karar sonuçlarını etkileyebildiği Trung [25] tarafından da vurgulandığından, bu çalışmada karar matrisinin veri yapısına uygun bir normalizasyon yaklaşımı tercih edilmiştir.

MARCOS uygulamasında öncelikle normalize performans matrisi için ideal ve anti-ideal referans değerler Eşitlik (14) ile belirlenmiştir:

$$A_j^+ = max_i r'_{ij} \ , \ A_j^- = min_i r'_{ij} \tag{14}$$

Burada A_j^+, j. kriter için ideal değeri; A_j^-, anti-ideal değeri; r'_{ij} ise ε düzeltmesi uygulanmış normalize performans değerini göstermektedir.

Daha sonra normalize performans matrisi CRITIC yöntemiyle elde edilen kriter ağırlıklarıyla Eşitlik (15)'te gösterildiği gibi çarpılarak ağırlıklı karar matrisi oluşturulmuştur:

$$v_{ij} = w_j r'_{ij} \tag{15}$$

Her alternatif için toplam ağırlıklı performans değeri Eşitlik (16) ile hesaplanmıştır:

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} v_{ij} \tag{16}$$

Aynı işlem ideal ve anti-ideal referans çözümler için de uygulanmıştır. Buna göre ideal çözümün toplam ağırlıklı performans değeri $S_{AI} = \sum_{j=1}^{n} w_j A_j^+$, anti-ideal çözümün toplam ağırlıklı performans değeri ise $S_{AAI} = \sum_{j=1}^{n} w_j A_j^-$olarak hesaplanmıştır. Burada S_{AI} ideal çözümün, S_{AAI} ise anti-ideal çözümün toplam ağırlıklı performans değerini ifade etmektedir. Bu değerler kullanılarak alternatiflerin anti-ideal ve ideal çözüme göre fayda dereceleri Eşitlik (17) ve Eşitlik (18) ile hesaplanmıştır:

$$K_i^- = \frac{S_i}{S_{AAI}} \tag{17}$$

$$K_i^+ = \frac{S_i}{S_{AI}} \tag{18}$$

Eşitlik (17) ve Eşitlik (18) ile elde edilen K_i^-ve K_i^+ değerleri, alternatiflerin anti-ideal ve ideal çözümlerle olan göreli ilişkisini göstermektedir. MARCOS yönteminde nihai fayda fonksiyonunun hesaplanabilmesi

için bu iki fayda derecesi, ideal ve anti-ideal çözüme göre yardımcı fayda fonksiyonlarına dönüştürülmektedir. Bu kapsamda $f(K_i^-)$ ve $f(K_i^+)$ değerleri Eşitlik (19) ve Eşitlik (20)'de gösterildiği şekilde hesaplanmıştır:

$$f(K_i^-) = \frac{K_i^+}{K_i^+ + K_i^-} \tag{19}$$

$$f(K_i^+) = \frac{K_i^-}{K_i^+ + K_i^-} \tag{20}$$

Bu yardımcı fayda fonksiyonları, alternatifin ideal çözüme yakınlığını ve anti-ideal çözümden uzaklığını birlikte dikkate alarak nihai MARCOS skorunun hesaplanmasına olanak sağlamaktadır. Son aşamada alternatiflerin nihai fayda fonksiyonu Eşitlik (21) ile hesaplanmıştır:

$$f(K_i) = \frac{K_i^+ + K_i^-}{1 + \frac{1-f(K_i^+)}{f(K_i^+)} + \frac{1-f(K_i^-)}{f(K_i^-)}} \tag{21}$$

MARCOS yönteminde $f(K_i)$ değeri yüksek olan alternatif daha iyi performansa sahip kabul edilmektedir. Bu çalışmada $f(K_i)$, ilgili işletmenin talep yanıtı programlarına katılım uygunluğunu temsil eden nihai MARCOS skoru olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen ana sıralama sonuçları bulgular bölümünde sunulmuştur.

2.2.4. Duyarlılık Analizi

Çok kriterli karar verme problemlerinde duyarlılık analizi, elde edilen sıralama sonuçlarının model varsayımlarına ve girdi verilerindeki değişimlere karşı ne ölçüde kararlı olduğunu incelemek amacıyla kullanılmaktadır. Więckowski ve Sałabun [28], çok kriterli karar verme bağlamında duyarlılık analizinin karar sonuçlarının kırılganlığını ve kararlılığını değerlendirmede yaygın biçimde kullanıldığını belirtmektedir.

Bu çalışmada duyarlılık analizi, iki temel veri işleme varsayımı üzerinden yürütülmüştür. Bunlardan ilki, C6 kriterinin hesaplanmasında kullanılan CBL yaklaşımıdır. CBL, talep yanıtı olayı gerçekleşmeseydi müşterinin beklenen tüketim düzeyini temsil eden referans değer olduğundan, bu değerin hesaplanma biçimi talep yanıtı performansının değerlendirilmesinde belirleyici olabilmektedir. CBL'nin doğru tahmin edilmesi, talep yanıtı etkisinin güvenilir biçimde değerlendirilebilmesi açısından kritik görülmektedir; farklı CBL yöntemlerinin doğruluk, karmaşıklık ve uygulama maliyeti bakımından farklı sonuçlar doğurabildiği belirtilmektedir [23]. Lee ve arkadaşları [6] tarafından sunulan veri setinde, imalat işletmelerinin elektrik tüketim değerlerinin yanı sıra talep yanıtı katılım tarihleri, zorunlu azaltım kapasiteleri ve gerçekleşen yanıt kapasiteleri de yer almaktadır. Bu nedenle C6 kriterine ilişkin duyarlılık senaryosu, CBL hesaplama yaklaşımındaki değişimin sıralama sonuçları üzerindeki etkisini incelemek üzere kurgulanmıştır.

Ana modelde C6 kriteri, kaynak veri setinde esas alınan CBL yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır. Alternatif CBL senaryosunda ise talep yanıtı olayının gerçekleştiği zaman aralığı için geçmiş beş uygun günün aynı zaman dilimindeki tüketim değerleri dikkate alınmış ve bu değerler arasından en yüksek üç günün ortalaması alınmıştır. Bu yaklaşım, kaynak veri setinde esas alınan CBL tanımına göre farklı bir referans yük varsayımı oluşturmakta ve CBL hesaplama tercihinin MARCOS sıralaması üzerindeki etkisini değerlendirmeye imkân vermektedir. Böylece S1 ve S3 senaryolarında, CBL hesaplama varsayımındaki değişimin sıralama sonuçları üzerindeki etkisi incelenmiştir.

İkinci duyarlılık unsuru, C7 kapasite karşılama oranının ele alınma biçimidir. Ana modelde C7 değeri, zorunlu azaltım kapasitesinin üzerinde gerçekleşen yanıtların karar matrisinde aşırı baskınlık oluşturmaması amacıyla %100 ile sınırlandırılmıştır. Ham C7 değerlerinde bazı alternatiflerin %100 sınırının üzerinde değerlere sahip olması nedeniyle, S2 ve S3 senaryoları bu aşırı değerlerin sıralama üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Böylece kapasite karşılama oranının sınırlandırılmış ve ham değerlerle ele alınmasının nihai MARCOS sıralaması üzerindeki etkisi karşılaştırılmıştır.

Duyarlılık analizinde CRITIC yöntemiyle ana modelde elde edilen kriter ağırlıkları sabit tutulmuş ve her senaryo için MARCOS sıralaması yeniden hesaplanmıştır. Böylece sıralama değişimlerinin ağırlıklandırma farklılığından değil, CBL hesaplama yaklaşımı ve C7 kapasite karşılama oranının işlenme biçiminden kaynaklanıp kaynaklanmadığı izlenmiştir. Analizde kullanılan senaryolar Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Duyarlılık analizi senaryoları

Senaryo	C6: Talep yanıtı azaltım oranı	C7: Kapasite karşılama oranı	Amaç
S0	Kaynak veri setindeki CBL yaklaşımı	%100'e sınırlandırılmış	Ana model
S1	Alternatif CBL yaklaşımı: geçmiş beş uygun gün içindeki en yüksek üç gün ortalaması	%100'e sınırlandırılmış	CBL seçiminin etkisini incelemek
S2	Kaynak veri setindeki CBL yaklaşımı	Ham C7 değeri	C7 sınırlandırma kararının etkisini incelemek
S3	Alternatif CBL yaklaşımı: geçmiş beş uygun gün içindeki en yüksek üç gün ortalaması	Ham C7 değeri	İki varsayım birlikte değiştiğinde sıralama kararlılığını incelemek

Senaryolar sonucunda elde edilen MARCOS sıralamaları, ana model sıralamasıyla karşılaştırılmıştır. Sıralama kararlılığını değerlendirmek için Spearman sıra korelasyon katsayısı kullanılmıştır. Spearman katsayısının yüksek olması, alternatif sıralamaların senaryolar arasında büyük ölçüde korunduğunu göstermektedir. Duyarlılık analizi sonuçları bulgular bölümünde sunulmuştur.

Buna ek olarak, MARCOS yöntemiyle elde edilen ana sıralamanın kullanılan ÇKKV yöntemine karşı kararlılığını değerlendirmek amacıyla yöntemler arası bir karşılaştırma yapılmıştır. Bu kapsamda, ana modelde kullanılan normalize karar matrisi ve CRITIC kriter ağırlıkları sabit tutularak Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) [29] ve EDAS [30] yöntemleri uygulanmıştır. Böylece kriter ağırlıkları ve veri işleme varsayımları değiştirilmeden yalnızca sıralama yönteminin alternatiflerin göreli konumları üzerindeki etkisi incelenmiştir. MARCOS ile TOPSIS ve EDAS yöntemlerinden elde edilen sıralamalar arasındaki uyum, Spearman sıra korelasyon katsayısı kullanılarak değerlendirilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. CRITIC Yöntemi ile Kriter Ağırlıklarının Değerlendirilmesi

CRITIC yöntemiyle elde edilen kriter ağırlıkları ile ağırlıklandırma sürecine ilişkin standart sapma (σ_j) ve kriter bilgi miktarı (C_j) Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 5. CRITIC yöntemi ara hesaplama değerleri ve kriter ağırlıkları

Kriter	Açıklama	σ_j	C_j	w_j
C1	Ortalama tüketim	0,3075	1,2540	0,1103
C2	Pik tüketim	0,3263	1,3422	0,1180
C3	Değişkenlik katsayısı	0,3743	1,8515	0,1628
C4	Yük faktörü	0,2793	1,8407	0,1619
C5	Eksik veri oranı	0,3093	1,8829	0,1656
C6	CBL'ye göre talep yanıtı azaltım oranı	0,2869	1,5240	0,1340
C7	Kapasite karşılama oranı	0,3334	1,6774	0,1475

Çizelge 5 incelendiğinde, en yüksek ağırlığın *C5 eksik veri oranı* kriterinde elde edildiği görülmektedir. Bu kriterler sırasıyla *C3 değişkenlik katsayısı*, *C4 yük faktörü* ve *C7 kapasite karşılama oranıdır.* Kriter ağırlıklarının büyükten küçüğe sıralaması aşağıdaki gibidir:

$$C5 > C3 > C4 > C7 > C6 > C2 > C1$$

Bu ağırlık dağılımı, talep yanıtı katılım uygunluğunun yalnızca tüketim büyüklüğü üzerinden açıklanamayacağını ortaya koymaktadır. C5 eksik veri oranının en yüksek ağırlığa sahip olması, veri

güvenilirliğinin karar modelinde belirleyici bir unsur olduğunu göstermektedir. Eksik veri oranı yüksek olan alternatiflerde tüketim profili ve talep yanıtı davranışı daha sınırlı güvenilirlikle değerlendirilebildiğinden, bu kriterin yüksek bilgi katkısı üretmesi beklenen bir sonuçtur.

C3 değişkenlik katsayısının ve C4 yük faktörünün yüksek ağırlık alması, tüketim profilinin yapısal özelliklerinin de karar sürecinde önemli olduğunu göstermektedir. Talep yanıtı programları açısından yüksek tüketim düzeyi tek başına yeterli değildir; tüketimin öngörülebilir, izlenebilir ve yönetilebilir bir profile sahip olması da önem taşımaktadır. Bu nedenle tüketim profilinin kararlılığını ve dalgalanma düzeyini temsil eden kriterlerin yüksek ağırlık alması, karar probleminin yapısıyla uyumludur.

C1 ortalama tüketim ve C2 pik tüketim kriterleri diğer kriterlere göre daha düşük ağırlık almıştır. Bu durum, iki kriterin tüketim ölçeğine ilişkin kısmen benzer bilgi taşımasıyla açıklanabilir. CRITIC yöntemi kriterler arası korelasyon yapısını dikkate aldığından, benzer bilgi içeren kriterlerin ağırlıklarının görece sınırlanması beklenmektedir. Elde edilen ağırlık yapısı, bu açıdan modelin yalnızca büyük tüketicileri öne çıkaran tek boyutlu bir değerlendirme üretmediğini; veri güvenilirliği, tüketim profili ve fiili talep yanıtı performansını birlikte dikkate aldığını göstermektedir.

3.2. MARCOS Yöntemi ile Ana Sıralama Sonuçları

CRITIC yöntemiyle elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak Eşitlik (14) – (21)'de tanımlanan MARCOS hesaplama adımları uygulanmıştır. Bu kapsamda öncelikle normalize performans matrisi üzerinden ideal ve anti-ideal referans değerler belirlenmiş, ardından kriter ağırlıklarıyla çarpılarak ağırlıklı karar matrisi oluşturulmuştur. Her alternatif için toplam ağırlıklı performans değeri (S_i) hesaplanmış; bu değerler ideal ve anti-ideal çözümlerin toplam performans değerleriyle karşılaştırılarak K_i^+ ve K_i^- fayda dereceleri elde edilmiştir. Son aşamada yardımcı fayda fonksiyonları kullanılarak nihai MARCOS fayda skoru $f(K_i)$ hesaplanmıştır. Bu işlem adımları sonucunda elde edilen ana sıralama sonuçları Çizelge 6'da sunulmuştur. MARCOS nihai fayda skoru yüksek olan alternatif, talep yanıtı programlarına katılım uygunluğu bakımından daha iyi alternatif olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 6. MARCOS ana sıralama sonuçları

Sıra	Alternatif	MARCOS skoru
1	Çelik-2	0,9124
2	Çimento-1	0,7101
3	Kâğıt	0,6754
4	Çimento-2	0,6501
5	Metal-1	0,6343
6	Metal-3	0,5647
7	Çelik-1	0,5109
8	Dövme-1	0,4785
9	Metal-2	0,4742
10	Dövme-2	0,3385

Çizelge 6'ya göre Çelik-2, en yüksek MARCOS skoruna sahip alternatif olarak belirlenmiştir. Çelik-2'nin ilk sırada yer alması; yüksek ortalama tüketim, yüksek pik tüketimi, düşük eksik veri oranı ve kapasite karşılama oranında ana modelde tam performans göstermesiyle ilişkilidir. Bu sonuç, tüketim ölçeği yüksek ve veri güvenilirliği güçlü işletmelerin talep yanıtı programları açısından öncelikli adaylar arasında değerlendirilebileceğini göstermektedir.

İkinci sırada Çimento-1, üçüncü sırada ise Kâğıt yer almıştır. Çimento-1, tüketim büyüklüğü ve talep yanıtı performansı açısından dengeli bir profil sunarken; Kâğıt, yük faktörü ve eksik veri oranı bakımından güçlü bir alternatif görünümündedir. Bu sıralama, talep yanıtı uygunluğunda tüketim büyüklüğünün yanı sıra tüketim profilinin kararlılığının ve veri kalitesinin de etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Çimento-2 dördüncü sırada yer almıştır. Bu alternatifin pik tüketim değeri yüksek olmasına karşın yük faktörünün düşük olması, dengeli tüketim profili açısından daha sınırlı bir performansa işaret etmektedir. Buna rağmen kapasite karşılama oranı ve eksik veri oranı bakımından olumlu değerlere sahip olması, Çimento-2'nin üst grupta konumlanmasını sağlamıştır.

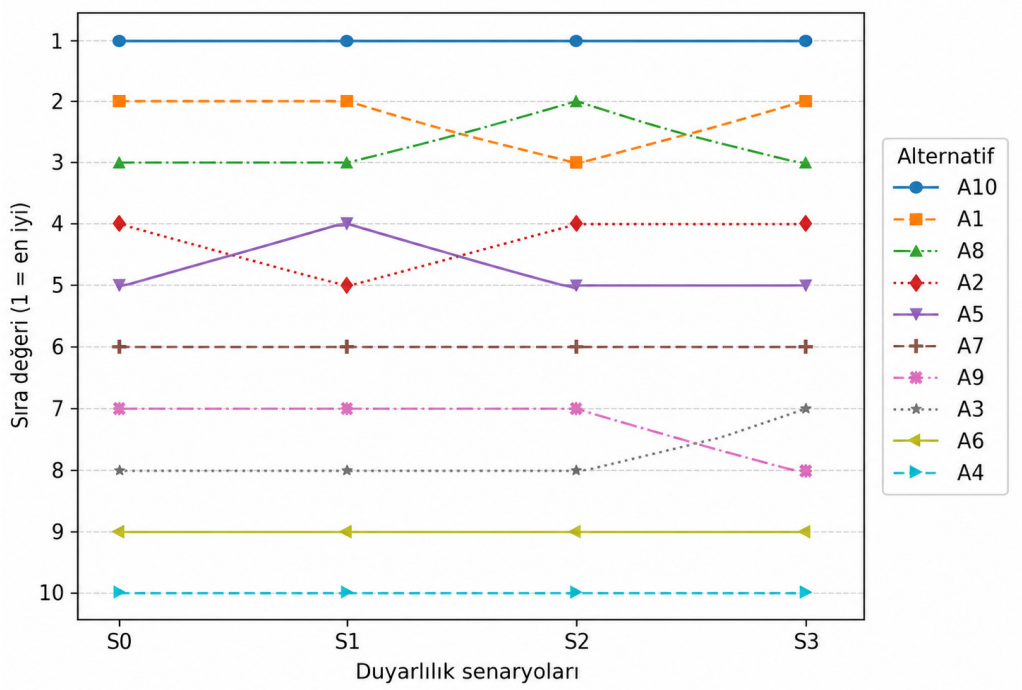
Metal-1 ve Metal-3 orta grupta yer alırken, Çelik-1, Dövme-1 ve Metal-2 alt grupta yer almaktadır. Metal-2'nin CBL'ye göre talep yanıtı azaltım oranı bakımından güçlü görünmesine rağmen dokuzuncu sırada yer alması dikkat çekicidir. Bu durum, büyük ölçüde Metal-2'nin yüksek eksik veri oranıyla ilişkilidir. Dolayısıyla model, yalnızca talep azaltım performansını değil, bu performansın güvenilir bir veri yapısı üzerinden değerlendirilebilir olup olmadığını da dikkate almaktadır.

En düşük MARCOS skoru Dövme-2 alternatifi için hesaplanmıştır. Dövme-2'nin CBL'ye göre talep yanıtı azaltım oranı negatif, kapasite karşılama oranı ise oldukça düşüktür. Bu bulgu, ilgili işletmenin talep yanıtı programına kayıtlı olmasına rağmen olay anında beklenen yük azaltımını sağlayamadığını göstermektedir. Bu nedenle Dövme-2 örneği, uygunluk değerlendirmesinde yalnızca kayıtlı kapasite veya tüketim büyüklüğünün yeterli olmadığını; fiili yanıt performansının ayrıca ölçülmesi gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Genel olarak MARCOS sonuçları, talep yanıtı katılım uygunluğunun çok boyutlu bir karar problemi olduğunu göstermektedir. Yüksek tüketim ölçeği önemli bir avantaj sağlamakla birlikte, veri güvenilirliği, yük profili ve gerçek talep yanıtı performansı sıralama üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır.

3.3. Duyarlılık Analizi Sonuçları

Ana model sıralamasının CBL hesaplama yaklaşımı ve C7 kapasite karşılama oranının ele alınma biçimine karşı kararlılığını değerlendirmek amacıyla dört senaryo analiz edilmiştir. Alternatiflerin senaryolar arasındaki sıra değişimleri Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Duyarlılık analizi senaryolarına göre alternatif sıralamalarındaki değişim

Şekil 2 incelendiğinde, ana model ile duyarlılık senaryoları arasındaki sıra değişimlerinin sınırlı kaldığı görülmektedir. Çelik-2 tüm senaryolarda birinci sıradaki konumunu korurken, Dövme-2 tüm senaryolarda son sırada yer almıştır. Bu sonuç, önerilen karar destek yapısının en uygun ve en zayıf alternatifleri belirlemede veri işleme varsayımlarına karşı kararlı sonuçlar ürettiğini göstermektedir.

Alternatif CBL yaklaşımının kullanıldığı S1 senaryosunda genel sıralama büyük ölçüde korunmuş, yalnızca orta grupta yer alan Çimento-2 ve Metal-1 alternatifleri arasında sınırlı bir sıra değişimi gözlenmiştir. Bu durum, C6 talep yanıtı azaltım oranının hesaplanmasında kullanılan CBL yaklaşımındaki değişimin bazı yakın performanslı alternatiflerin göreli konumunu etkileyebildiğini, ancak genel sıralama yapısını belirgin biçimde değiştirmediğini göstermektedir.

C7 kapasite karşılama oranının ham değerlerle kullanıldığı S2 senaryosunda da sınırlı bir sıra değişimi gerçekleşmiştir. Bu senaryoda Kâğıt ikinci sıraya yükselirken, Çimento-1 üçüncü sıraya gerilemiştir. Bu değişim, kapasite karşılama oranındaki yüksek değerlerin normalize performans yapısı üzerinde belirli ölçüde etkili olabildiğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, Çelik-2'nin birinci, Dövme-2'nin ise son sıradaki konumu değişmemiştir.

Alternatif CBL yaklaşımı ile ham C7 değerlerinin birlikte kullanıldığı S3 senaryosunda ise ana sıralama yine büyük ölçüde korunmuştur. Bu senaryoda yalnızca alt grupta yer alan Dövme-1 ve Çelik-1 arasında sınırlı bir sıra değişimi gerçekleşmiştir. Buna rağmen üst ve alt uçtaki alternatiflerin konumları değişmemiş; Çelik-2 en uygun, Dövme-2 ise en düşük uygunluğa sahip alternatif olarak kalmıştır.

Senaryo sıralamaları ile ana model sıralaması arasındaki Spearman sıra korelasyon katsayıları Çizelge 7'de verilmiştir.

Çizelge 7. Ana model ile duyarlılık senaryoları arasındaki sıra korelasyonları

Karşılaştırma	Spearman sıra korelasyonu
S0 – S1	0,988
S0 – S2	0,988
S0 – S3	0,988

Çizelge 7'ye göre, ana model ile tüm duyarlılık senaryoları arasında yüksek düzeyde sıra uyumu elde edilmiştir. S0–S1 karşılaştırmasında Spearman sıra korelasyon katsayısının 0,988 olması, alternatif CBL yaklaşımının genel sıralama yapısını büyük ölçüde koruduğunu göstermektedir. S0–S2 ve S0–S3 karşılaştırmalarında da aynı korelasyon değerinin elde edilmesi, C7 kapasite karşılama oranının ham veya sınırlandırılmış biçimde kullanılmasının ve CBL varsayımındaki değişimin ana sıralama üzerinde sınırlı etki yarattığını ortaya koymaktadır.

Genel olarak duyarlılık analizi sonuçları, önerilen CRITIC–MARCOS modelinin CBL ve C7'ye ilişkin veri işleme varsayımlarına karşı kararlı olduğunu göstermektedir. Sıra değişimleri yalnızca birbirine yakın performans gösteren bazı alternatifler arasında gerçekleşmiş; Çelik-2 ve Dövme-2'nin konumları tüm senaryolarda korunmuştur. Bu bulgu, önerilen karar destek yapısının talep yanıtı uygunluk değerlendirmesinde tek bir veri işleme varsayımına bağlı kalmadan tutarlı sonuçlar üretebildiğini göstermektedir.

3.3.1. Yöntemler Arası Karşılaştırma

MARCOS yöntemiyle elde edilen sıralamanın yöntemsel kararlılığını değerlendirmek amacıyla, aynı normalize karar matrisi ve CRITIC kriter ağırlıkları kullanılarak TOPSIS ve EDAS yöntemleriyle karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır. Böylece sıralama farklılıklarının kriter ağırlıklarından veya veri işleme tercihlerinden değil, yalnızca kullanılan sıralama yönteminden kaynaklanması sağlanmıştır. Karşılaştırma sonuçları Çizelge 8'de verilmiştir

Çizelge 8. MARCOS, TOPSIS ve EDAS yöntemlerine göre alternatif sıralamalarının karşılaştırılması

Alternatif	MARCOS	TOPSIS	EDAS
Çelik-2	1	1	1
Çimento-1	2	2	2
Kâğıt	3	3	4
Çimento-2	4	5	3
Metal-1	5	4	5
Metal-3	6	6	6
Çelik-1	7	7	8
Dövme-1	8	8	9
Metal-2	9	9	7
Dövme-2	10	10	10

Çizelge 8 incelendiğinde, Çelik-2'nin her üç yöntemde de birinci, Çimento-1'in ikinci ve Dövme-2'nin son sırada yer aldığı görülmektedir. Yöntemler arasındaki sıra farklılıkları yalnızca orta grupta ve birbirine yakın performans sergileyen alternatifler arasında gözlenmiştir. MARCOS sıralamasının TOPSIS ile

Spearman sıra korelasyonu 0,988, EDAS ile ise 0,952 olarak hesaplanmıştır. Bu yüksek uyum, ana sıralamanın kullanılan ÇKKV yöntemine karşı yüksek düzeyde kararlılık gösterdiğine işaret etmektedir.

3.4. Bulguların Tartışılması ve Pratik Çıkarımlar

Bu çalışmanın bulguları, aynı veri setini kullanan yakın dönem çalışmalardan farklı bir araştırma amacına yönelmektedir. Lee ve arkadaşları [6] tarafından sunulan veri seti, talep yanıtı programına katılan imalat işletmelerine ait elektrik tüketim verilerini ve talep yanıtı katılım bilgilerini birlikte içermektedir. Literatürde bu veri yapısının daha çok tüketim tahmini ve anomali tespiti gibi modelleme amaçlarıyla kullanıldığı görülmektedir. Örneğin Moon ve arkadaşları [7], endüstriyel tesislerde güç tüketiminin tahmin edilmesi ve anomali tespiti için XGBoost ve LSTM-AE tabanlı bir çerçeve geliştirmiştir. Yang ve arkadaşları [8] ise kısa dönem endüstriyel enerji tüketimi tahmini için paralel sinir ağı ve adaptif ayrıştırma temelli AUDPNet yaklaşımını önermiştir. Bu çalışmada ise aynı veri yapısı, tahminleme doğruluğunu artırmak amacıyla değil, imalat işletmelerinin talep yanıtı programlarına katılım uygunluğunu değerlendirmek ve önceliklendirmek amacıyla kullanılmıştır. Bu yönüyle çalışma, veri setinin kullanım alanını tahminleme probleminden karar destek problemine taşımaktadır.

Genel talep yanıtı literatürü açısından değerlendirildiğinde, sanayi işletmelerinin talep yanıtı potansiyelinin belirlenmesi ve uygun katılımcıların seçilmesi çok boyutlu bir karar destek problemi olarak öne çıkmaktadır. Rodríguez-García ve arkadaşları [3], endüstriyel müşteriler için talep yanıtı uygulamalarına yönelik bir maliyet-fayda değerlendirme aracı geliştirerek sanayi tesislerinin talep yanıtı stratejilerine katılımının sistematik biçimde analiz edilebileceğini ortaya koymuştur. Heitkoetter ve arkadaşları [31] ise bölgeselleştirilmiş talep yanıtı potansiyelini açık kaynak veri ve araçlarla değerlendirerek talep tarafı esnekliğinin teknik ve mekânsal göstergeler üzerinden incelenebileceğini göstermiştir. Bu çalışma, söz konusu karar destek çizgisine tüketim büyüklüğü, yük profili, eksik veri oranı, CBL'ye göre gerçekleşen azaltım oranı ve kapasite karşılama oranı gibi doğrudan veri setinden türetilen göstergelerle katkı sağlamaktadır. CRITIC yöntemiyle ağırlıkların nesnel olarak belirlenmesi ve MARCOS yöntemiyle uygunluk sıralamasının elde edilmesi, talep yanıtı değerlendirmesinin yalnızca tüketim düzeyine değil, ölçüm güvenilirliği, yük profili ve fiili yanıt performansına da dayandırılmasına olanak sağlamıştır.

CRITIC sonuçlarında C5 eksik veri oranının en yüksek ağırlığa sahip olması, veri sürekliliğinin talep yanıtı uygunluk değerlendirmesinde yalnızca teknik bir veri kalitesi konusu olmadığını, karar sonuçlarını doğrudan etkileyen bir unsur olduğunu göstermektedir. Talep yanıtı performansının güvenilir biçimde değerlendirilebilmesi için tüketim profillerinin ve olay anındaki yük değişimlerinin yeterli veri bütünlüğüyle izlenebilmesi gerekmektedir. Bu nedenle yüksek eksik veri oranına sahip işletmeler, güçlü talep azaltım performansı gösterseler dahi nihai uygunluk değerlendirmesinde dezavantajlı bir konuma gelebilmektedir. Nitekim Metal-2'nin C6 kriterinde görece güçlü bir performans sergilemesine rağmen yüksek eksik veri oranı nedeniyle alt sıralarda yer alması, veri güvenilirliğinin nihai uygunluk değerlendirmesi üzerindeki etkisini somutlaştırmaktadır. Bu bulgu, özellikle CBL temelli talep yanıtı performansının değerlendirilmesinde referans yükün ve ölçüm verilerinin güvenilirliğinin önemine ilişkin literatürle uyumludur [23]. Ayrıca bu sonuç, talep yanıtı uygunluğunun yalnızca tüketim büyüklüğüyle değil, teknik ve performans temelli göstergelerin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulayan çalışmalarla da uyumludur [4,5].

Türkiye bağlamında değerlendirildiğinde, bu çalışmadan elde edilen sıralama sonuçları doğrudan Türkiye sanayi işletmelerine genellenmemelidir; çünkü analiz, Lee ve arkadaşları [6] tarafından yayımlanan açık erişimli veri setinde yer alan 10 imalat işletmesine ait tüketim ve talep yanıtı katılım verilerine dayanmaktadır. Bununla birlikte, önerilen karar destek çerçevesi Türkiye'de gelişmekte olan talep tarafı katılımı ve toplayıcılık uygulamaları açısından uyarlanabilir bir ön değerlendirme yaklaşımı sunmaktadır. Elektrik Piyasasında Toplayıcılık Faaliyeti Yönetmeliği'nin 17 Aralık 2024 tarihli ve 32755 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanmasıyla, toplayıcıların elektrik piyasasında yürütebileceği faaliyetler ve toplayıcılık faaliyeti kapsamında yürütülecek işlemlere ilişkin usul ve esaslar düzenlenmiştir [32]. Ayrıca TEİAŞ tarafından 2025 yılı talep tarafı katılımı hizmeti tedarik süreçlerine ilişkin duyuruların yayımlanması, bu alandaki uygulama zeminini daha somut hâle getirmiştir [33]. Bu gelişmeler dikkate alındığında, sanayi tesislerinin talep yanıtı programlarına katılım potansiyelinin yalnızca kurulu güç veya tüketim büyüklüğüyle değil, veri kalitesi, yük profili ve gerçekleşen yanıt performansıyla birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir [4,5]. Bu nedenle önerilen CRITIC–MARCOS yaklaşımı, Türkiye'de toplayıcı portföylerin

oluşturulması ve sanayi tesislerinin talep tarafı katılımına hazırlık düzeylerinin ön değerlendirilmesi için kullanılabilecek esnek bir karar destek çerçevesi olarak değerlendirilebilir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, imalat işletmelerinin talep yanıtı programlarına katılım uygunluğunu değerlendirmek amacıyla açık erişimli endüstriyel elektrik tüketim ve talep yanıtı katılım verilerine dayalı bir karar destek yaklaşımı önerilmiştir. Lee ve arkadaşları [6] tarafından yayımlanan veri setindeki talep yanıtı programına katılan 10 imalat işletmesi karar alternatifi olarak ele alınmış; alternatifler tüketim büyüklüğü, yük profili, veri güvenilirliği ve fiili talep yanıtı performansını temsil eden yedi kriter üzerinden değerlendirilmiştir. Kriter ağırlıkları CRITIC yöntemiyle nesnel olarak belirlenmiş, işletmelerin talep yanıtı katılım uygunluk sıralaması ise MARCOS yöntemiyle elde edilmiştir.

CRITIC sonuçlarına göre en yüksek ağırlık C5 eksik veri oranı kriterinde elde edilmiştir. Bu kriteri C3 değişkenlik katsayısı ve C4 yük faktörü izlemiştir. Bu ağırlık yapısı, talep yanıtı uygunluğunun yalnızca tüketim büyüklüğüyle açıklanamayacağını; veri güvenilirliği ve tüketim profilinin kararlılığının da karar sürecinde belirleyici olduğunu göstermektedir. MARCOS ana sıralamasında Çelik-2 en uygun alternatif olarak belirlenmiştir. Çelik-2'nin ilk sırada yer alması, yüksek tüketim ölçeği, düşük eksik veri oranı ve kapasite karşılama performansı ile ilişkilidir. Buna karşılık, Dövme-2 son sırada yer almıştır. Dövme-2'nin CBL'ye göre negatif talep azaltım oranına ve oldukça düşük kapasite karşılama oranına sahip olması, talep yanıtı programına kayıtlı olmanın tek başına yeterli olmadığını; fiili yanıt performansının ayrıca değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Duyarlılık analizi, elde edilen sıralama sonuçlarının CBL hesaplama yaklaşımı ve kapasite karşılama oranının ele alınma biçimi karşısında genel olarak kararlı olduğunu göstermiştir. Alternatif CBL yaklaşımı kullanıldığında genel sıralama büyük ölçüde korunmuş ve yalnızca yakın performanslı alternatifler arasında sınırlı bir sıra değişimi gözlenmiştir. Kapasite karşılama oranının ham değerlerle kullanıldığı senaryolarda ise yalnızca sınırlı sıra değişimleri gözlenmiştir. Tüm senaryolarda Çelik-2 en uygun, Dövme-2 ise en zayıf alternatif olarak kalmıştır. Bu sonuç, önerilen karar destek yapısının özellikle en güçlü ve en zayıf alternatifleri belirlemede tutarlı sonuçlar ürettiğini göstermektedir.

Yöntemsel kararlılığı değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen karşılaştırmalı analizde, aynı normalize karar matrisi ve CRITIC ağırlıkları kullanılarak TOPSIS ve EDAS yöntemleri uygulanmıştır. Çelik-2 her üç yöntemde de birinci, Çimento-1 ikinci ve Dövme-2 ise son sırada yer almıştır. MARCOS sıralamasının TOPSIS ile Spearman sıra korelasyonu 0,988, EDAS ile ise 0,952 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, MARCOS ile elde edilen ana sıralamanın farklı ÇKKV yöntemleri altında da büyük ölçüde korunduğunu göstermektedir.

Çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Öncelikle analizler, Lee ve arkadaşları [6] tarafından yayımlanan veri setinde yer alan 10 imalat işletmesi ve belirli bir gözlem dönemiyle sınırlıdır. Bu nedenle, elde edilen kriter ağırlıkları ve alternatif sıralamaları farklı ülkeler, piyasa yapıları, sektörler veya dönemler için doğrudan genellenebilir sonuçlar olarak değerlendirilmemelidir. Buna karşılık, önerilen CRITIC–MARCOS tabanlı karar destek çerçevesi; yerel elektrik piyasası yapısı, talep yanıtı kuralları, CBL hesaplama yaklaşımı, sektörün operasyonel özellikleri ve mevcut veri yapısı dikkate alınarak kriterlerin yeniden hesaplanması ve gerekli uyarlamaların yapılması koşuluyla farklı coğrafya ve sanayi bağlamlarında uygulanabilir. İkinci olarak, modelde kullanılan kriterler veri setinden türetilen nicel göstergelerle sınırlandırılmıştır; elektrik fiyatları, üretim planları, süreç esnekliği, operasyonel kısıtlar ve talep yanıtı maliyetleri modele dahil edilmemiştir.

Gelecek çalışmalarda önerilen karar destek yapısı farklı sektörlerden ve ülkelerden elde edilecek endüstriyel tüketim verileriyle test edilebilir. Ayrıca mevcut CRITIC–MARCOS çerçevesi hiyerarşik bir ÇKKV yapısına genişletilebilir. Bu kapsamda değerlendirme kriterleri; teknik uygunluk, veri güvenilirliği, ekonomik uygunluk ve operasyonel esneklik gibi ana boyutlar altında gruplandırılabilir. Elektrik fiyatları, talep yanıtı teşvikleri ve katılım maliyetleri ekonomik uygunluk boyutunda; üretim çizelgeleri, süreç kesintiye uğrama riski, esnek yük türleri ve yük kaydırma kapasitesi ise operasyonel esneklik boyutunda modele dahil edilebilir. Böylece işletmelerin talep yanıtı uygunluğu yalnızca tüketim ve gerçekleşen yanıt performansı açısından değil, ekonomik motivasyonları ve üretim süreçlerinin esnekliği de dikkate alınarak daha kapsamlı biçimde değerlendirilebilir.

5. KAYNAKLAR

1. Siano, P. (2014). Demand response and smart grids-A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 30*, 461-478.
2. Gils, H.C. (2014). Assessment of the theoretical demand response potential in Europe. *Energy, 67*, 1-18.
3. Rodríguez-García, J., Álvarez-Bel, C., Carbonell-Carretero, J.F., Alcázar-Ortega, M. & Peñalvo-López, E. (2016). A novel tool for the evaluation and assessment of demand response activities in the industrial sector. *Energy, 113*, 1136-1146.
4. Fatras, N., Ma, Z. & Jørgensen, B.N. (2022). Process-to-market matrix mapping: A multi-criteria evaluation framework for industrial processes' electricity market participation feasibility. *Applied Energy, 313*, 118829.
5. Rusche, S., Weissflog, J., Wenninger, S. & Häckel, B. (2023). How flexible are energy flexibilities? Developing a flexibility score for revenue and risk analysis in industrial demand-side management. *Applied Energy, 345*, 121351.
6. Lee, E., Baek, K. & Kim, J. (2022). Datasets on South Korean manufacturing factories' electricity consumption and demand response participation. *Scientific Data, 9*, 227.
7. Moon, Y., Lee, Y., Hwang, Y. & Jeong, J. (2024). Long short-term memory autoencoder and extreme gradient boosting-based factory energy management framework for power consumption forecasting. *Energies, 17*(15), 3666.
8. Yang, F., Ge, S., Liu, J., Yan, K., Gao, A., Dong, Y., ... & Zhang, W. (2025). High-precision short-term industrial energy consumption forecasting via parallel-NN with adaptive universal decomposition. *Expert Systems with Applications*, *289*, 128366.
9. Mardani, A., Zavadskas, E.K., Khalifah, Z., Zakuan, N., Jusoh, A., Nor, K.M. & Khoshnoudi, M. (2017). A review of multi-criteria decision-making applications to solve energy management problems: Two decades from 1995 to 2015. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 71*, 216-256.
10. Kshanh, I. & Tanaka, M. (2024). Comparative analysis of MCDM for energy efficiency projects evaluation towards sustainable industrial energy management: Case study of a petrochemical complex. *Expert Systems with Applications, 255*, 124692.
11. Alcázar-Ortega, M., Álvarez-Bel, C., Escrivá-Escrivá, G. & Domijan, A. (2012). Evaluation and assessment of demand response potential applied to the meat industry. *Applied Energy, 92*, 84-91.
12. dos Santos, S.A.B., Soares, J.M., Barroso, G.C. & de Athayde Prata, B. (2023). Demand response application in industrial scenarios: A systematic mapping of practical implementation. *Expert Systems with Applications, 215*, 119393.
13. Ranaboldo, M., Aragüés-Peñalba, M., Arica, E., Bade, A., Bullich-Massagué, E., Burgio, A., Caccamo, C., Caprara, A., Cimmino, D., Domenech, B., Donoso, I., Fragapane, G., González-Font-de-Rubinat, P., Jahnke, E., Juanpera, M., Manafi, E., Rövekamp, J. & Tani, R. (2024). A comprehensive overview of industrial demand response status in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 203*, 114797.
14. Zenginoğlu, A. & Yüksel, F.Ş. (2026). Integrated life cycle assessment and multicriteria decision making framework for evaluating renewable energy technologies at Istanbul Airport. *Sci Rep., 16*, 9822.
15. Erik, A., Dündar, B. & Acer, D.C. (2022). Product mix optimization of fruit nectar with ıntegration of the analytic hierarchy process and mathematical programming. *Endüstri Mühendisliği, 33*(1), 96-114
16. Hamidy, S.M., Kuvvetli, B.İ. ve Erik, A. (2025). Deprem hazırlık kapsamında toplanma alanı alternatiflerinin belirlenmesi ve en uygun olan alternatiflerin seçilmesi: Adana Seyhan örneği. *Afet ve Risk Dergisi, 8*(3), 1440-1459.
17. Eşiyok, S., Ariş, E. & Antmen, F. (2023). Ranking and evaluation of G7 countries and Turkey by GGGI indicators using ENTROPY, CRITIC and EDAS methods. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *38*(3), 647-660.
18. Tör, O.B., Oğuz, H., Kısakürek, M., Kurşuncu, E.N. ve Köksal, A.O. (2021). Talep birleştiricilerin rol aldığı elektrik piyasa mekanizmaları ve Türkiye'deki mevcut durum analizi. *Sosyoekonomi, 29*(49), 307-322.
19. Çakmak, R. ve Altaş, İ. (2020). Türkiye'deki müşterilerin akıllı şebekelerde yük kaydırmaya dayalı talep tarafı yönetimine tepkileri. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 10*(2), 395-416.
20. Sancar, S., Erenoğlu, A. K., Şengör, İ. ve Erdinç, O. (2020). Güneş kollektörlü ve elektrikli şofbenli bir akıllı evin talep cevabı programı kapsamında enerji yönetimi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 19*, 92-104.

21. Yalçın, N. ve Karakaş, E. (2019). Kurumsal sürdürülebilirlik performans analizinde CRITIC-EDAS yaklaşımı. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 34*(4), 147-162.
22. Abdulvahitoğlu, A., Abdulvahitoğlu, A. ve Arslan, Z. (2025). Sürdürülebilir elektrikli ulaşım için stratejik planlama: Bursa ilinde elektrikli araç şarj istasyonu yer seçimi analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40*(4), 959-976.
23. Valentini, O., Andreadou, N., Bertoldi, P., Lucas, A., Saviuc, I. & Kotsakis, E. (2022). Demand response impact evaluation: A review of methods for estimating the customer baseline load. *Energies, 15*(14), 5259.
24. Aytekin, A. (2021). Comparative analysis of normalization techniques in the context of MCDM problems. *Decision Making: Applications in Management and Engineering, 4*(2), 1-25.
25. Trung, D.D. (2022). Development of data normalization methods for multi-criteria decision making: Applying for MARCOS method. *Manufacturing Review, 9*, 22.
26. Diakoulaki, D., Mavrotas, G. & Papayannakis, L. (1995). Determining objective weights in multiple criteria problems: The CRITIC method. *Computers & Operations Research, 22*(7), 763-770.
27. Stević, Ž., Pamučar, D., Puška, A. & Chatterjee, P. (2020). Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement alternatives and ranking according to compromise solution (MARCOS). *Computers & Industrial Engineering, 140*, 106231.
28. Więckowski, J. & Sałabun, W. (2023). Sensitivity analysis approaches in multi-criteria decision analysis: A systematic review. *Applied Soft Computing, 148*, 110915.
29. Pandey, V., Komal, K. & Dincer, H. (2023). A review on TOPSIS method and its extensions for different applications with recent development. *Soft Comput., 27*, 18011-18039.
30. Keshavarz Ghorabaee, M., Zavadskas, E.K., Olfat, L. & Turskis, Z. (2015). Multi-criteria inventory classification using a new method of evaluation based on distance from average solution (EDAS). *Informatica, 26*(3), 435-451.
31. Heitkoetter, W., Schyska, B. U., Schmidt, D., Medjroubi, W., Vogt, T. & Agert, C. (2021). Assessment of the regionalised demand response potential in Germany using an open source tool and dataset. *Advances in Applied Energy, 1*, 100001
32. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (2024). *Elektrik piyasasında toplayıcılık faaliyeti yönetmeliği.* Resmî Gazete, 17.12.2024, Sayı: 32755, https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2024/12/20241217-27.htm, Erişim tarihi: 08.07.2026.
33. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) (2025). *2025 yılı talep tarafı katılımı hizmeti tedarik süreçlerine ilişkin duyuru.* https://www.teias.gov.tr/duyurular/2025-yili-talep-tarafi-katilimi-hizmeti-tedarik-sureclerine-iliskin-duyuru, Erişim tarihi: 08.07.2026.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

Farklı Dayanım Sınıflarındaki Betonlarda Küp Numune Boyutunun Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Mehmet ALTIN [1,a], **İsmail Hakkı ÇAĞATAY** [2,b]

[1]*Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye*
[2]*Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0009-0004-8498-6117;* [b]***ORCID**: 0000-0001-5182-776X*

Makale Bilgileri
Geliş : 20.02.2026
Kabul : 05.10.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1894002

Sorumlu Yazar
Mehmet ALTIN
mehmetaltin@mersin.edu.tr

Anahtar Kelimeler
Basınç dayanımı
Boyut etkisi
Cidar etkisi
Küp numune

***Atıf şekli:** ALTIN, M., ÇAĞATAY, İ.H., (2026). Farklı Dayanım Sınıflarındaki Betonlarda Küp Numune Boyutunun Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 779-789.*

ÖZ

Bu çalışma, hedef basınç dayanımları 10-50 MPa aralığında değişen yedi farklı normal dayanımlı beton grubunda, numune boyutunun mekanik performans üzerindeki etkisini incelemektedir. Araştırma kapsamında; 70,7, 100, 120, 150 ve 200 mm kenar uzunluğuna sahip küp numuneler üretilerek boyutun dayanım üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Bulgular, K-I dışındaki tüm gruplarda, numune boyutu arttıkça dayanımın sistematik şekilde yükseldiğini göstermektedir. Özellikle K-VII serisinde dayanım, 70,7 mm'den 200 mm'ye geçildiğinde 31,67 MPa'dan 56,60 MPa'ya ulaşmıştır. İstatistiki analizler sonucu, boyut ile dayanım arasında $y=3{,}183x^{0{,}4836}$ ($R^2=0{,}9683$) formülüyle ifade edilen güçlü bir matematiksel korelasyon saptanmıştır. Küçük ölçeklerdeki düşük dayanımlar çeper (cidar) etkisi ve heterojenliğe bağlanırken; K-I'deki sapmada ise malzemenin düşük dayanım kapasitesinin, boyut etkisinin önüne geçerek kırılmada belirleyici faktör olduğu düşünülmektedir. Sonuç olarak, büyük numunelerin çeper etkisinden arınarak gerçek malzeme dayanımını daha kararlı yansıttığı belirlenmiştir.

Investigation of the Effect of Cube Sample Size on Compressive Strength in Concrete of Different Strength Classes

Article Info
Received : 20.02.2026
Accepted : 15.10.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1894002

Corresponding Author
Mehmet ALTIN
mehmetaltin@mersin.edu.tr

Keywords
Compressive strength
Size effect
Wall effect
Cube specimen

***How to cite:** ALTIN, M., ÇAĞATAY, İ.H., (2026). Investigation of the Effect of Cube Sample Size on Compressive Strength in Concrete of Different Strength Classes. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 779-789.*

ABSTRACT

This study investigates the effect of specimen size on mechanical performance across seven normal-strength concrete groups with target compressive strengths of 10–50 MPa. Cube specimens with edge lengths of 70.7, 100, 120, 150, and 200 mm were analyzed. Findings demonstrate a systematic increase in strength as specimen size increases in all groups except K-I. Specifically, K-VII series strength rose from 31.67 MPa to 56.60 MPa when scaling from 70.7 mm to 200 mm. Statistical analyses revealed a strong size-strength correlation, expressed as $y=3.183x^{0.4836}$ ($R^2=0.9683$). Lower strengths at smaller scales are attributed to the wall effect and heterogeneity. The K-I deviation suggests the material's low inherent strength overrides the size effect, governing the failure mechanism. Ultimately, larger specimens were found to eliminate the wall effect, thereby reflecting the true material strength more consistently.

1. GİRİŞ

Beton; hammadde kaynağı ulaşılabilirliği, üretim ve taşıma kolaylığı gibi önemli avantajları sayesinde inşaat sektörünün en vazgeçilmez yapı malzemesidir. Projelendirilen yapıların ihtiyaç duyduğu güvenlik ve dayanıklılık kriterleri, üretilen betonun kalitesiyle doğrudan ilişkilidir. Bu kalitenin denetiminde ise en temel parametre betonun basınç dayanımıdır.

Betonun karakteristik basınç dayanımının belirlenmesi amacıyla, taze betondan alınan numuneler standart kür koşullarında sertleşmeye bırakılmakta ve ardından laboratuvar ortamında tek eksenli basınç cihazları aracılığıyla kırılma yüküne tabi tutulmaktadır. Bu testlerde kullanılan numune geometrileri, ilgili yönetmeliklere göre değişiklik gösterse de, uygulamada yaygın olarak 150 mm'lik küp ve 150x300 mm'lik silindir numuneler esas alınmaktadır [1,2]. Ancak elde edilen dayanım değerleri; kür ortamı, yükleme hızı, agrega granülometrisi ve numune şekil ve boyutları gibi pek çok faktöre bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir.

Literatürde 'boyut' ve 'şekil etkisi' (size and shape effect) olarak tanımlanan numune geometrisinin basınç dayanımı üzerindeki belirgin etkisi, betonun mekanik davranış analizindeki en kritik ve tartışmalı başlıklardan biridir [3].

Boyut Etkisi (Size Effect), en genel tanımıyla, malzemenin nominal dayanımının numunenin geometrik boyutlarına bağlı olarak değişmesi olayıdır. Klasik sürekli ortam mekaniği teorileri (elastisite veya plastisite), dayanımın malzeme boyutundan bağımsız bir malzeme sabiti olduğunu varsaysa da; beton gibi yarı-gevrek (quasi-brittle) malzemelerde numune boyutu büyüdükçe nominal basınç dayanımının genellikle azaldığı, çok sayıda deneysel ve teorik çalışma ile ortaya konulmuştur [4-6].

1.1. Klasik Boyut Etkisi Üzerine Temel Çalışmalar

Betonun mekanik davranışında boyut etkisini inceleyen ilk kapsamlı çalışmalardan biri Gonnerman [7] tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırmacı, numunenin yükseklik/çap (l/d) oranının dayanım üzerindeki kritik rolünü saptamış; l/d oranı 1,5'in altına düştüğünde ölçülen dayanımın hızla arttığını, 3,0 ve 4,0 oranlarında ise dayanımın standart silindir dayanımının sırasıyla %95 ve %90'ına düştüğünü rapor etmiştir. Benzer şekilde, kütle betonları üzerine çalışan Blanks ve McNamara [8], 1:12 ölçeğine varan geniş çaplı silindir numunelerle yaptıkları testlerde, numune çapı arttıkça birim dayanımın sistematik bir düşüş eğilimi gösterdiğini deneysel verilerle kanıtlamışlardır.

Daha sonraki yıllarda Neville [9], farklı boyutlardaki (70, 125 ve 150 mm) küp numuneler üzerinde çalışarak, küçük numunelerin büyüklerden daha yüksek dayanım verdiğini doğrulamış ve farklı geometriye sahip numunelerin dayanımlarını birbirine dönüştüren genel bağıntılar geliştirmiştir. Yakın dönem çalışmalarından Gyurkó ve Nemes (2020) ise, C20/25 ile C50/60 arasındaki beton sınıflarında yaptıkları deneylerde, boyut etkisinin küp numunelerde silindirlere göre daha belirgin olduğunu; silindir numunelerin dayanımının 0,004 m^3 hacimden, küplerin ise 0,006 m^3 hacimden sonra stabilize olduğunu gözlemlemişlerdir [3].

Teorik çerçevede ise Bažant'ın Boyut Etkisi Yasası (SEL) ve Carpinteri'nin Çok Fraktal Ölçekleme Yasası (MFSL) öne çıkmaktadır. Kırılma mekaniğindeki enerji dengesine dayanan SEL, numune boyutu büyüdükçe davranışın sünekten gevreğe (lineer elastik kırılma mekanizması) geçtiğini ve dayanımın düştüğünü modeller [10]. MFSL ise malzemenin fraktal doğasına odaklanarak, boyut küçüldükçe dayanımın teorik olarak arttığını, ancak çok büyük boyutlarda sabit bir "homojen rejim" değerine yakınsadığını savunur [11].

1.2. Klasik Boyut Etkisi Üzerine Temel Çalışmalar

Literatürdeki genel eğilim "boyut arttıkça dayanım azalır" şeklinde olsa da, malzeme yapısı, çevresel koşullar ve deney parametrelerine bağlı olarak bu durumun tersine işlediği (boyut arttıkça dayanımın arttığı) çalışmalar da mevcuttur.

Örneğin Tokyay ve Özdemir [12], yüksek dayanımlı betonlarda 75 mm çapındaki küçük silindirlerin, daha büyük numunelerden daha düşük dayanım verdiğini saptamıştır. Bu durum, küçük numunelerde yüzey

alanı/hacim oranının yüksek olması nedeniyle oluşan "cidar etkisi" (çeper etkisi) ile açıklanmış; agreganın kalıp çeperi nedeniyle homojen dağılamamasının bu sonucu doğurduğu belirtilmiştir.

Benzer bir "ters boyut etkisi", kür koşullarına bağlı olarak Soroka ve Baum [13] tarafından da rapor edilmiştir. Standart nemli kürde klasik boyut etkisi görülürken, kuru ortamlarda (%40-65 bağıl nem) saklanan küçük numunelerin hızlı su kaybı ve büzülme (rötre) çatlakları nedeniyle dayanımlarının düştüğü, büyük numunelerin ise iç nemlerini koruyarak daha yüksek dayanım gösterdiği tespit edilmiştir.

Malzeme iç yapısının etkisi üzerine Yuki ve arkadaşları [14], tüf numuneleri üzerinde yaptıkları çalışmada, numune çapı arttıkça dayanımın monotonik olarak arttığını saptamış ve bu durumu malzeme içindeki sert parçacıkların fraktal dağılımıyla ilişkilendirmiştir. Kristal yapılı kayaçlar üzerine yapılan bir başka çalışmada ise, çok küçük boyutlarda (10-30 mm arası) dayanımın %39 ile %91 oranında arttığı bir "yükselen aşama" belirlenmiştir [15]. Bu artış, numune boyutunun malzemenin ortalama tane çapına oranının (tane ölçeği etkisi) artmasıyla malzemenin daha homojen davranmaya başlamasına ve kristaller arası makaslama direncinin artmasına bağlanmıştır. Ayrıca bazı yarma testlerinde, yük dağılım genişliğinin numune boyutuyla ilişkisinden kaynaklı olarak boyut etkisinin gözlenmediği veya tersine döndüğü durumlar da literatürde yer almaktadır [10].

1.3. Numune Geometrisi ve Mekanik Etkiler

Beton teknolojisinde en yaygın kullanılan iki numune şekli küp ve silindirdir. Aynı beton karışımından hazırlanan numunelerde, küp numunelerin dayanımı genellikle silindir numunelerden daha yüksek çıkmaktadır. Geleneksel betonlarda silindir dayanımı, küp dayanımının yaklaşık %80'i olarak kabul edilir [16]. Silindir numunelerin (özellikle 150x300 mm), yükleme altındaki gerilme dağılımının daha uniform olması ve test makinesinin başlıklarındaki sürtünme etkisinden daha az etkilenmesi nedeniyle daha güvenilir sonuçlar verdiği kabul edilir [17]. Ancak silindirlerin dezavantajı, yükleme yüzeylerinin düzeltilmesi için başlıklama veya taşlama gerektirmesidir.

1.4. Sürtünme ve Yanal Kısıtlama

Test sırasında makine tablaları ile numune yüzeyleri arasındaki sürtünme, numunenin serbestçe yana doğru genişlemesini engeller. Bu durum, numunenin uçlarında yanal bir kısıtlama oluşturarak tek eksenli yüklemeyi uç bölgelerde çok eksenli bir gerilme haline getirir [17].

Silindir numunelerde (l/d =2), numunenin orta kısmında bu kısıtlamadan etkilenmeyen yaklaşık 0.268d uzunluğunda serbest bir bölge kalırken, küplerde (l/d =1) bu kısıtlanmış bölgeler birbirinin üzerine biner. Bu durum, küp numunelerin tüm hacminin yanal olarak hapsedilmesine ve bu sayede yapay bir dayanım artışı göstermesine neden olur [8].

Numunenin narinliği, yani yüksekliğinin çapına veya enine (l/d) olan oranı, ölçülen dayanımı doğrudan belirler. Numunenin narinliği arttıkça ölçülen dayanım azalır. Standart silindirlerde bu oran 2.0 iken, küplerde 1.0'dır. Araştırmalar, dayanımın l/d oranı 1.5'in altına düştüğünde bu orana karşı çok daha hassas hale geldiğini ve dayanımın yapay olarak hızla arttığını göstermektedir [16]. l/d oranı 1.5 ile 2.5 arasında olan numunelerin dayanımı standart silindire çok yakınken (%5 sapma ile), bu oran 3.0 ve 4.0'a çıktığında dayanım standart değerin sırasıyla %95 ve %90'ına düşmektedir [7].

1.5. Düşük ve Normal Dayanımlı Betonlar (DNDB)

Betonun kendi dayanım seviyesi, şekil ve boyut etkisinin şiddetini belirleyen temel bir parametredir. Düşük ve normal dayanımlı betonlarda malzeme daha heterojendir. Bu heterojenlik, numune boyutları ve şekilleri arasındaki dayanım farklarının (boyut etkisi) daha şiddetli görülmesine yol açar [9]. DNDB için silindir/küp dayanım oranı genellikle 1.20 ile 1.25 arasındadır. Ayrıca, döküm yönü ve yerleşme sonrası oluşan boşluklar DNDB numunelerinde dayanımı daha fazla etkiler [18].

Betonun dayanımı arttıkça, içyapı daha homojen hale gelir ancak malzeme davranışı gevrekleşir. Beton sınıfı yükseldikçe, küp ve silindir numuneler arasındaki dayanım farkı azalır ve birbirine yaklaşır [16]. Bazı çalışmalar, yaklaşık 65 MPa dayanım seviyesinden sonra küp ve silindir dayanımlarının neredeyse eşitlendiğini göstermektedir [18].

Farklı geometrideki numunelerden elde edilen sonuçların kıyaslanabilmesi için uluslararası standartlarda ampirik dönüşüm katsayıları kullanılmaktadır. TS EN 206-1 [19], farklı beton sınıfları için karakteristik silindir ($f_{ck,sln}$) ve küp ($f_{ck,küp}$)dayanımı arasındaki ilişkiyi tanımlamış ve beton dayanımı arttıkça aradaki farkın azaldığını standartlaştırmıştır. İlgili standartta belirtilen karakteristik dayanım oranları Çizelge 1'de özetlenmiştir.

Çizelge 1. TS EN 206-1 e göre küp ve silindir numunelerin basınç dayanımını dönüşümü değerleri

Basınç dayanım sınıfı	En düşük karakteristik silindir dayanımı ($f_{ck,sil}$) (N/mm^2)	En düşük karakteristik küp dayanımı ($f_{ck,küp}$) (N/mm^2)	Dönüşüm oranı ($f_{ck,sil}$/ $f_{ck,küp}$)
C8/10	8	10	0,80
C12/15	12	15	0,80
C16/20	16	20	0,80
C20/25	20	25	0,80
C25/30	25	30	0,83
C30/37	30	37	0,81
C35/45	35	45	0,78
C40/50	40	50	0,80
C45/55	45	55	0,82
C50/60	50	60	0,83
C55/67	55	67	0,82
C60/75	60	75	0,80
C70/85	70	85	0,82
C80/95	80	95	0,84
C90/105	90	105	0,86
C100/115	100	115	0,87

Literatürde numune boyutunun basınç dayanımı üzerindeki etkisine dair birbirine zıt bulgular (artış veya azalış eğilimi) mevcuttur. Bu çalışmada, söz konusu çelişkili durumlar derinlemesine irdelenmiş olup; temel amaç, cidar etkisi ve çevresel kür koşullarının numune boyutu ve dayanım ilişkisi üzerindeki rolünü deneysel olarak ortaya koymaktır. Bu doğrultuda, hedef dayanım aralığı 10-50 MPa arasında değişen yedi farklı beton karışımı tasarlanmış; numuneler 28 gün boyunca açık hava koşullarında kürlenerek eksenel basınç dayanımları ölçülmüştür.

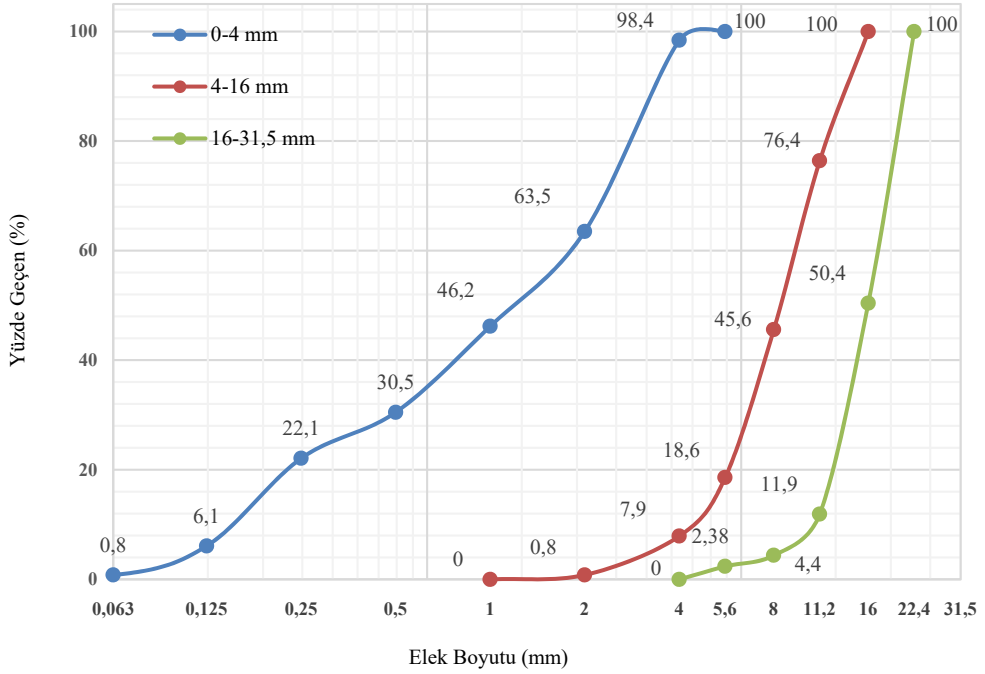
2. YÖNTEM

Bu çalışmada, numune geometrisinin betonun basınç dayanımı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla kapsamlı bir deneysel program yürütülmüştür. Çalışma kapsamında, hedef dayanımları 10 MPa ile 50 MPa arasında değişen yedi farklı beton karışımı tasarlanmıştır. Özellikle literatürde "Cidar Etkisi" olarak tanımlanan, kalıp yüzeyi ile agrega taneleri arasındaki etkileşimin dayanım üzerindeki rolünü belirginleştirmek amacıyla; karışımlarda kullanılan maksimum agrega çapı (D_{max}) 22,4 mm olarak belirlenmiştir. Üretilen tüm numuneler 28 gün boyunca laboratuvar ortamında açık havada kürlenmiş ve ardından eksenel basınç dayanımları ölçülmüştür. Hazırlanan yedi farklı karışımda bağlayıcı olarak CEM I 52.5 N tipi portland çimentosu kullanılmış olup TS EN 196-1 [20] standardına uygundur, endeks özellikleri Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 2. Kullanılan çimentonun endeks özellikleri

Kimyasal özellikler	Değerler (%)	Fiziksel özellikler	Değerler
SiO_2	18,90	Özgül ağırlık (gr/cm^3)	3,15
Al_2O_3	4,16	Özgül yüzey (cm^2/gr)	4170
Fe_2O_3	3,04	İncelik, 32µ (%)	5,5
CaO	65,14	İncelik, 90µ (%)	0,4
MgO	1,29	Priz başlangıcı (dakika)	180
SO_3	3,04	Priz bitiş süresi (dakika)	225
K_2O	0,72	Hacim genleşmesi (mm)	1,00
Na_2O	0,34	Mekanik özellikler	Değerler
Cl^-	0,013	Basınç dayanımı	(MPa)
Kızdırma kaybı	2,78	1 Günlük	28,9
Çözünmeyen kalıntı	0,59	2 Günlük	38,8
Toplam katkı (minör)	3,42	7 Günlük	48,6
Serbest CaO	1,10	28 Günlük	55,1

Karışımlar hazırlanırken kullanılan agregaların detaylı granülometrileri Şekil 1'de verilmiştir. Ayrıca, agregaların birim hacim ağırlığı gibi bazı temel fiziksel özellikleri Çizelge 3'te verilmiştir. Beton üretiminde karıştırma suyu olarak içme suyu kalitesinde şebeke suyu kullanılmıştır.



Şekil 1. Agrega elek analizi sonuçları

Çizelge 3. Agrega fiziksel özellikleri

Agregaların fiziksel özellikleri	Agrega tipi		
	0-4 mm	4-16 mm	16-31,5 mm
Kuru birim hacim ağırlığı γk (gr/cm3)	2,46	2,63	2,72
DKY halindeki birim hacim ağırlığı γd (gr/cm3)	2,54	2,67	2,74
İnce agrega görünen birim hacim ağırlık γG (gr/cm3)	2,68	2,72	2,77
Su emme kapasitesi (%)	3,27	1,27	0,72
Nem yüzdesi (%)	1,1	0,71	0,22

Hedef dayanım aralığı 10-50 MPa arasında değişen yedi farklı beton grubu için hazırlanan karışımların malzeme miktarları Çizelge 4'te detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 4. 1m^3 için karışım değerleri (kg)

Karışım no		K-I (kg)	K-II (kg)	K-III (kg)	K-IV (kg)	K-V (kg)	K-VI (kg)	K-VII (kg)
Su		144	165	146	143	159	150	154
Çimento		180	260	280	320	400	446	480
Akışkanlaştırıcı 1		0	3,38	2,32	3,38	4,4	5,85	6,5
Akışkanlaştırıcı 2		0	1,04	1,12	1,28	1,6	0	0
Agrega	0-4 mm	1190	1437	1122	1049	900	920	712
	4-16 mm	340	448	218	215	239	354	890
	16-31,5mm	596	0	599	650	667	636	240
Toplam		2450	2310	2365	2377	2365	2506	2576

Hedeflenen boyutlarda numunelerin üretimi için Şekil 2'de görünmekte olan küp kalıplar kullanılmış ve her boyuttan 3 adet olmak üzere toplamda 105 adet küp numune üretilmiştir.



Şekil 2. Numune üretiminde kullanılan kalıplar

Şekil 2'de görülen numuneler, dökümün ardından 24 saat boyunca kalıplarında bekletilmiş, ardından kalıptan çıkarılarak Şekil 3'te gösterildiği üzere 28 gün süreyle açık hava koşullarında kürlenmiştir. Kür süresinin tamamlanmasının ardından, numuneler TS EN 12390-3 [21] standardı esas alınarak, yükleme hızı 0,6 MPa olacak şekilde eksenel basınç testine tabi tutulmuştur.



Şekil 3. Numuneler ve eksenel basınç testi

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Beton küp numunelerde numune boyutunun etkisini araştırmak amacıyla hazırlanan 7 farklı beton karışımına (K I- VII) ait basınç dayanımı sonuçları ve standart sapma değerleri Çizelge 5'te sunulmuştur.

Çizelge 5. Farklı boyutlardaki küp numunelerin basınç dayanımı sonuçları ve standart sapmaları

	Basınç dayanımları (N/mm^2) ± Standart sapma						
Ebatlar (mm)	K-I	K-II	K-III	K-IV	K-V	K-VI	K-VII
70,7x70,7x70,7	9,73±0,31	16,47±0,55	21,13±1,39	29,73±0,91	29,43±1,86	29,43±1,93	31,67±1,10
100x100x100	8,37±0,68	16,63±0,70	23,50±0,92	42,30±1,47	39,23±1,26	42,60±1,15	44,10±0,26
120x120x120	8,03±0,21	20,13±0,21	29,37±0,38	44,43±4,05	39,35±2,76	41,13±2,57	43,93±2,70
150x150x150	9,47±0,45	23,37±3,09	32,40±1,39	47,95±3,61	40,03±0,99	51,47±1,34	50,87±1,75
200x200x200	10,10±0,20	26,67±1,53	33,73±1,90	49,17±0,81	50,23±0,71	53,99±4,44	56,60±0,50

Elde edilen veriler incelendiğinde;

Düşük Dayanımlı Grup (K-I): En düşük hedef dayanıma sahip olan K-I kodlu seride, numune boyutları arasındaki dayanım farklarının diğer gruplara kıyasla daha sınırlı kaldığı görülmüştür. Bu grupta en düşük

dayanım 120 mm kenar uzunluğuna sahip numuneden 8,03 MPa, en yüksek dayanım ise 200 mm kenar uzunluğuna sahip numuneden 10,10 MPa olarak ölçülmüştür.

Genel Artış Eğilimi (K-II – K-VII): K-I grubu haricindeki tüm karışımlarda (K-II, K-III, K-IV, K-V, K-VI ve K-VII), numune boyutu büyüdükçe ölçülen basınç dayanımının da arttığı tespit edilmiştir. İlgili grupların tamamında en düşük dayanım değerleri 70,7 mm boyutundaki numunelerden elde edilirken, en yüksek dayanım değerlerine 200 mm boyutundaki numunelerle ulaşılmıştır.

Standart Numune (150 mm) Referanslı Karşılaştırma:

Standart 150 mm'lik küp numunelerin dayanımı referans alınarak yapılan kıyaslamalarda şu bulgulara ulaşılmıştır:

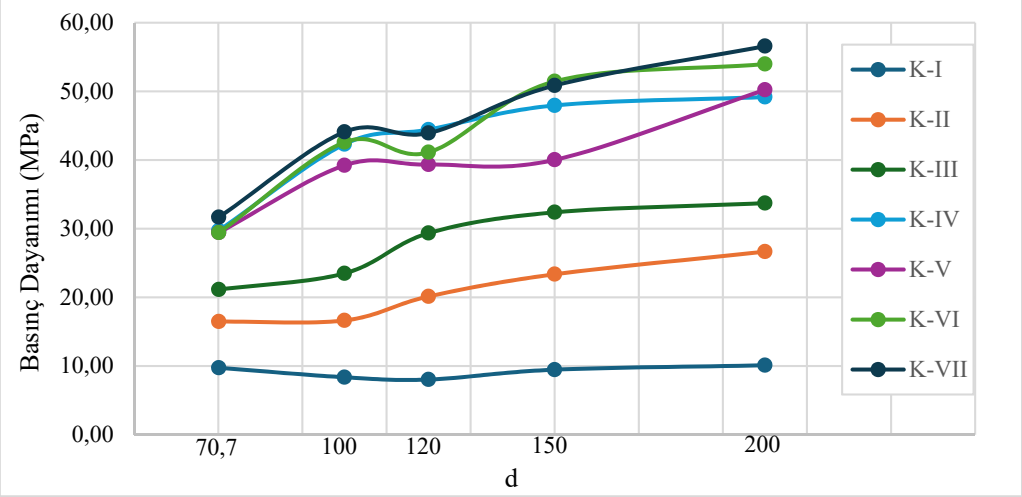
En Küçük Numuneye (70,7mm) Göre Değişim:

150 mm'lik standart numunelerin dayanımı, 70,7 mm'lik numunelere göre tüm serilerde daha yüksek çıkmıştır. Bu artış oranları sırasıyla; K-II grubunda %42, K-V grubunda %36, K-III grubunda %53,3, K-VII grubunda %60,6, K-IV grubunda %61,3 ve K-VI grubunda %74,9 olarak hesaplanmıştır.

En Büyük Numuneye (200 mm) Göre Değişim:

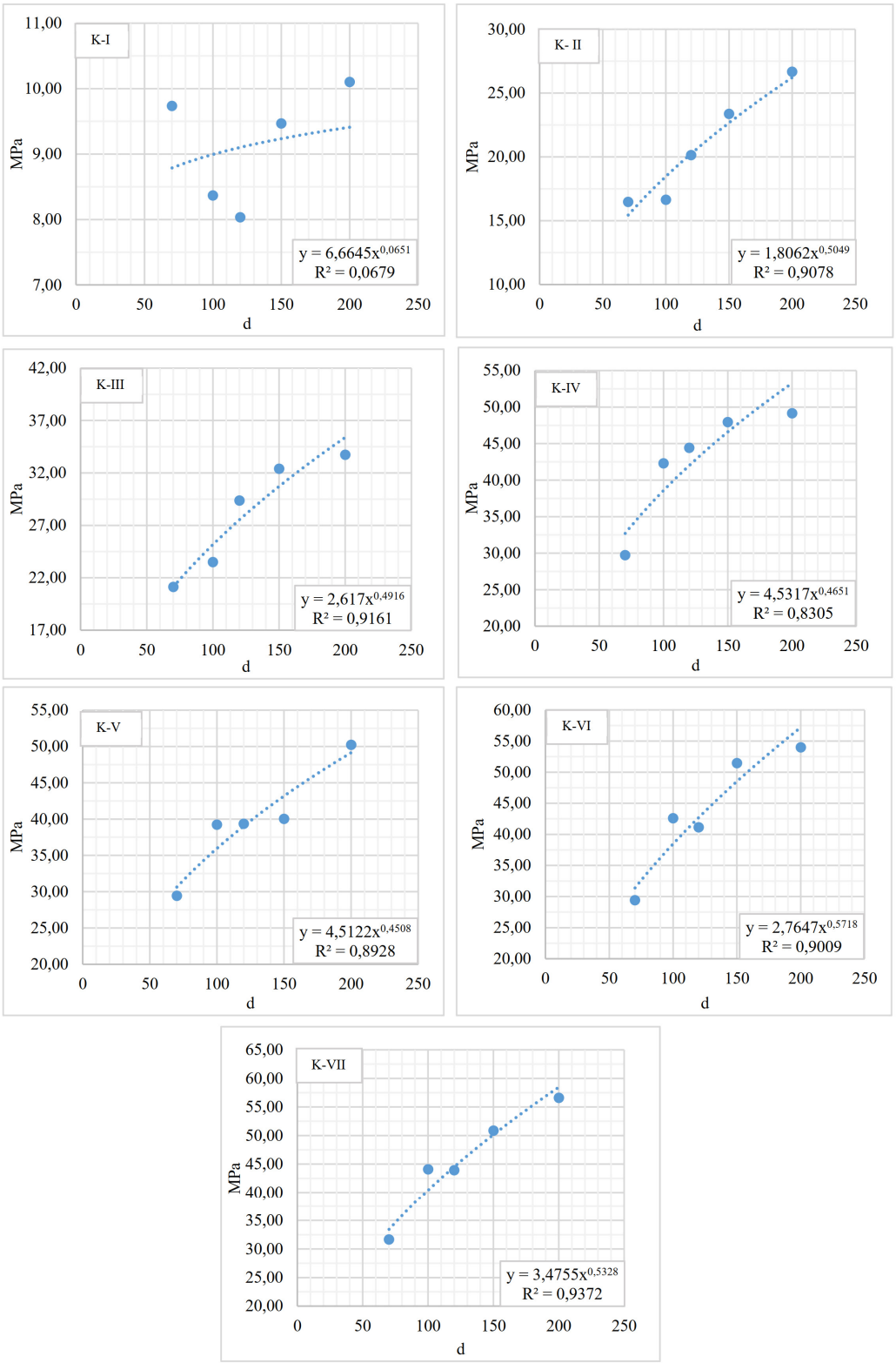
Öte yandan, 150 mm'lik standart numuneler, serinin en büyük hacimli numunesi olan 200 mm'lik küplerin gerisinde kalmıştır. K-IV (%2,4), K-III (%4) ve K-VI (%4,7) gruplarında standart numuneler 200 mm'lik numunelere oldukça yakın değerler verirken; bu fark K-VII grubunda %10,1, K-II grubunda %12,4 ve K-V grubunda %20,3 oranında daha düşük dayanım şeklinde kaydedilmiştir.

Farklı boyutlardaki ve farklı dayanım sınıflarındaki tüm karışımlara ait basınç dayanımı sonuçlarının değişim trendi Şekil 4'te grafiksel olarak gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde; en düşük dayanıma sahip olan K-I grubu dışındaki diğer tüm karışımlarda (K-II'den K-VII'ye), numune boyutu arttıkça basınç dayanımının da belirgin bir şekilde arttığı açıkça görülmektedir.



Şekil 4. Farklı boyutlardaki numunelerin basınç dayanımı değişimleri

Bununla birlikte, 10 MPa ile 50 MPa gibi birbirinden oldukça farklı gevreklik ve homojenlik özelliklerine sahip karışımların davranışlarını daha hassas incelemek ve kırılma mekanizmasındaki dayanım sınıfı etkisini detaylandırmak amacıyla; K-I'den K-VII'ye kadar olan her bir seri için ayrı eğilim çizgileri (regresyon denklemleri) oluşturulmuştur (Şekil 5). Sunulan bu ayrıntılı grafikler incelendiğinde; malzemenin hedef dayanımı ve buna bağlı olarak gevrekliği arttıkça, boyut-dayanım ilişkisinin çok daha belirginleştiği ve katsayıların (R^2) yükseldiği görülmektedir. Örneğin yüksek dayanımlı K-VII serisinde oldukça güçlü bir korelasyon (R^2 = 0,9372) gözlenirken; malzemenin kendi düşük yapısal kapasitesinin kırılmayı doğrudan belirlediği K-I serisinde, boyut etkisinin ihmal edilebilir düzeye indiği (R^2 = 0,0679) ve eğilimin yataya yakın bir karakter sergilediği sayısal olarak saptanmıştır.



Şekil 5. Farklı dayanım sınıfları için ayrı ayrı oluşturulmuş boyut-dayanım eğilim çizgileri

Seri bazındaki bu spesifik analizlerin ardından, numune boyutunun dayanım üzerindeki genel etkisini nicelleştirmek amacıyla tüm karışım gruplarının ortalaması alınarak elde edilen veriler ve 150 mm'lik standart küp numuneye göre hesaplanan rölatif dayanımlar Çizelge 6'da özetlenmiştir.

Tüm serilerin ortalaması baz alındığında, 70,7mm'lik numunelerin ortalama dayanımı 23,94 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değer, 150 mm'lik standart numunenin ortalama dayanımının (36,51 MPa) sadece 0,66'sına tekabül etmekte olup, standart numuneye kıyasla %52,5 oranında en belirgin dayanım düşüşüne işaret etmektedir.

Numune boyutu 100 mm'ye çıkarıldığında, cidar etkisinin azalmasına paralel olarak ortalama dayanım 30,96 MPa değerine yükselmiştir. Standart numuneye göre rölatif dayanım 0,85 seviyesine çıkmış, ancak dayanım kaybı %17,9 oranında devam etmiştir.

Artış eğilimi 120 mm'lik boyutta da sürerek ortalama dayanım 32,34 MPa olarak ölçülmüştür. Standart numuneye (150 mm) yaklaşıldıkça makas daralmış; rölatif oran 0,89'a yükselirken, dayanım farkı %12,9 seviyesine gerilemiştir.

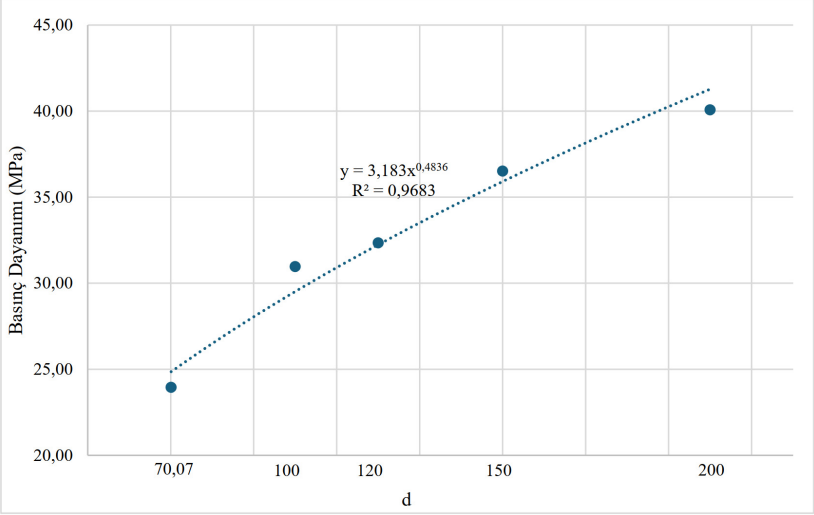
Çizelge 6. Ortalama dayanımlar ve standart küp numeye göre rölatif dayanımlar

Ebatlar (mm)	Ortalama basınç dayanımı (N/mm^2)	Rölatif dayanımlar
70,7x70,7x70,7	23,94	0,66
100x100x100	30,96	0,85
120x120x120	32,34	0,89
150x150x150	36,51	1,00
200x200x200	40,07	1,10

Numune boyutu 200 mm'ye ulaştığında, ortalama dayanım 40,07 MPa ile serinin en yüksek değerine ulaşmıştır. Standart numuneye kıyasla %8,9 oranında (Rölatif oran: 1,10) bir dayanım artışı kaydedilmiştir.

Bu veriler, numune hacmi arttıkça (ve yüzey alanı/hacim oranı düştükçe) dayanımın kademeli ve sistematik bir şekilde arttığını doğrulamaktadır. Küçük boyutlu numunelerde (özellikle 70,7 mm) kaydedilen bu belirgin dayanım düşüşünde, asıl etkinin kalıp yüzeyi ile agregalar arasındaki geometrik kısıtlamadan doğan cidar (çeper) etkisi olduğu düşünülmektedir. Numune boyutunun en büyük agrega çapına olan oranın düşmesi, agregaların homojen dağılımını güçleştirerek dayanımı zayıflattığı öngörülmektedir. Cidar etkisinin yarattığı bu yapısal zayıflığı destekleyen ve ivmelendiren bir diğer unsurun ise açık hava kürü koşulları olduğu tahmin edilmektedir. Yüzey alanı/hacim oranı yüksek olan küçük numunelerin iç suyunu büyük numunelere kıyasla daha hızlı kaybetmesinin, hidratasyonu yavaşlattığı ve kuruma büzülmesine (rötre) yol açarak taşıma kapasitesini daha da düşürdüğü değerlendirilmektedir. Buna karşın büyük hacimli numunelerin, hem cidar etkisinden daha az etkilendiği hem de iç nemini koruyarak daha stabil bir dayanıma ulaştığı düşünülmektedir.

Şekil 6'da sunulan ortalama dayanım verileri üzerinde gerçekleştirilen regresyon analizi sonucunda; numune boyutu (x) ile basınç dayanımı (y) arasında istatistiksel olarak anlamlı ve kuvvetli bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6. Ortalama dayanımlar ve eğilim çizgisi

Dağılımın karakteristiği, R^2 = 0,9683 gibi oldukça yüksek bir belirleyicilik katsayısına sahip olan $y=3{,}183x^{0{,}4836}$ üs fonksiyonu ile ifade edilmektedir. Türetilen modeldeki pozitif üs katsayısı ve eğilim çizgisinin yukarı yönlü eğimi; bu çalışmadaki deney koşullarında, numune boyutu arttıkça basınç dayanımının sistematik bir artış gösterdiğini matematiksel olarak doğrulamaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, farklı boyut ve dayanım sınıflarındaki küp numunelerin mekanik davranışları incelenmiş ve elde edilen veriler ışığında aşağıdaki temel sonuçlara ulaşılmıştır:

- Düşük dayanımlı K-I karışımı dışındaki tüm numune gruplarında, numune boyutunun artmasıyla birlikte basınç dayanımında belirgin bir artış kaydedilmiştir. Özellikle K-VII karışımında, numune boyutunun 70,7mm'den 200 mm'ye çıkarılmasıyla dayanım değerinin 31,67 MPa'dan 56,60 MPa'ya ulaşarak yaklaşık %78,7 oranında bir artış sergilediği görülmüştür. Bu durum, numune hacmi büyüdükçe malzeme yapısındaki heterojenliğin ve çeper (cidar) etkisinin azalmasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir.
- Küçük boyutlu numunelerin mekanik özelliklerinin, yapısal heterojenliklerden ve döküm esnasında oluşan çeper etkisinden daha fazla etkilendiği, bu durumun ise dayanım değerlerinde görece düşüşe neden olduğu saptanmıştır. Örneğin K-IV numunesinde 70,7mm'de 29,73 MPa olan dayanım, 200 mm'de 49,17 MPa değerine yükselerek boyutun mekanik performans üzerindeki güçlü etkisine işaret etmektedir.
- Genel eğilimin aksine, K-I karışımında numune boyutuyla birlikte belirgin bir dayanım artışı gözlenmemesi, doğrudan bu serinin elde ettiği düşük dayanım değerlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Taşıma kapasitesinin çok düşük olması nedeniyle, kırılmanın numune geometrisinden veya kalıp etkileşiminden ziyade, doğrudan malzemenin kendi sınırlarında gerçekleştiği düşünülmektedir. Başka bir deyişle, K-I karışımındaki düşük dayanım seviyesinin, boyut ve cidar etkilerinin mekanik davranışa yansımasının önüne geçtiği düşünülmektedir.
- Numune boyutu ile basınç dayanımı arasında istatistiksel olarak anlamlı ve oldukça güçlü bir ilişki saptanmıştır. Bu ilişki, $y = 3.183x^{0{,}4836}$ üs fonksiyonu ile modellenmiş ve R^2 = 0,9683 gibi yüksek bir korelasyon değeriyle matematiksel olarak doğrulanmıştır.
- Bažant'ın Boyut Etkisi Yasası, numune boyutu büyüdükçe dayanımın düşeceğini öngörür. Bu çalışmada gözlemlenen 'ters boyut etkisi' ise bu yasayla çelişmenin aksine, küçük numunelerde numune/agrega çapı (d/D_{max}) oranının çok düşük olmasından kaynaklanan cidar etkisinin, malzemenin klasik kırılma mekaniği kurallarını baskılayacak kadar belirleyici ve spesifik bir yapısal zayıflık oluşturduğunu göstermektedir.

5. KAYNAKLAR

1. ASTM International (2018). *ASTM C39/C39M-18: Standard test method for compressive strength of xylindrical concrete specimens*. West Conshohocken, PA.
2. Türk Standardları Enstitüsü (2013). *TS EN 12390-1: Beton - Sertleşmiş beton deneyleri – Bölüm 1: Deney Numunesi ve kalıplarının şekil, boyut ve diğer özellikleri*. Ankara.
3. Gyurkó, Z. & Nemes, R. (2020). Specimen size and shape effect on the compressive strength of normal strength concrete. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, *64*(1), 276-286.
4. Akçaözoğlu, K. ve Atiş, C.D. (2007). Farklı su bağlayıcı oranında hazırlanan harçlarda numune boy değişiminin basınç dayanımı ve birim kısalma üzerindeki etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *22*(1), 115-122.
5. Nikbin, I.M., Dehestani, M., Beygi, M.H.A. & Rezvani, M. (2014). Effects of cube size and placement direction on compressive strength of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, *59*, 144-150.
6. Bažant, Z.P. (1999). Size effect on structural strength: a review. *Archive of Applied Mechanics*, *69*(9-10), 703-725.
7. Murdock, J.W. & Kesler, C.E. (1955). Effect of length of specimen on apparent compressive strength of concrete. *TAM Report*, No. 515.
8. Wu, B., Liu, C. & Yang, Y. (2013). Size effect on compressive behaviours of normal-strength concrete cubes made from demolished concrete blocks and fresh concrete. *Magazine of Concrete Research*, *65*(19), 1155-1167.

9. Neville, A.M. (1966). A general relation for strengths of concrete specimens of different shapes and sizes. *Journal Proceedings*, *63*(10), 1095-1110.
10. Ince, R., Gör, M., Eren, M.E. & Alyamaç, K.E. (2015). The effect of size on the splitting strength of cubic concrete members. *Strain*, *51*(2), 135-146.
11. Carpinteri, A. & Chiaia, B. (1997). Multifractal scaling laws in the breaking behaviour of disordered materials. *Chaos, Solitons & Fractals*, *8*(2), 135-150.
12. Tokyay, M. & Özdemir, M. (1997). Specimen shape and size effect on the compressive strength of higher strength concrete. *Cement and Concrete Research*, *27*(8), 1281-1289..
13. Soroka, I. & Baum, H. (1994). Influence of specimen size on effect of curing regime on concrete compressive strength. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *6*(1), 15-22.
14. Darlington, W.J., Ranjith, P.G. & Choi, S.K. (2011). The effect of specimen size on strength and other properties in laboratory testing of rock and rock-like cementitious brittle materials. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *44*(5), 513-529.
15. Liang, Q., Lan, H., Yu, Z., Li, B., Sun, W., Shijie, L. & Lv, W. (2024). Reverse size effect of the unconfined compressive strength of crystalline rock: A grain-scale perspective. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *58*(2), 1651-1669.
16. Narayanan, S. (2024). Effect of size and shape of test specimen on compressive strength of concrete. *Concrete International*, *46*(1), 45-51.
17. Carpinteri, A., Ferro, G. & Monetto, I. (1999). Scale effects in uniaxially compressed concrete specimens. *Magazine of Concrete Research*, *51*(3), 217-225..
18. Yi, S.T., Yang, E.I. & Choi, J.C. (2006). Effect of specimen sizes, specimen shapes, and placement directions on compressive strength of concrete. *Nuclear Engineering and Design*, *236*(2), 115-127.
19. Türk Standardları Enstitüsü (2002). *TS EN 206-1: Beton - Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk*. Ankara.
20. Türk Standardları Enstitüsü (2009). *TS EN 196-1: Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini*. Ankara.
21. Türk Standardları Enstitüsü. (2003). *TS EN 12390-3: Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini*. Ankara.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

Biberiye ve Siyah Üzüm Çekirdeği Etanolik Ekstraktlarının Toplam Fenolik ve Flavonoid Madde Miktarlarının ve Biyolojik Aktivitelerinin Belirlenmesi

Ecem ÜNSAL [1,a], **Ayşegül İNAM** [1,b], **Furkan Ozan ÇÖVEN** [1,c], **Tülay ÖNCÜ ÖNER** [1,d]

[1]*Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, Manisa, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0009-0007-4646-1004; [b]**ORCID**: 0000-0002-9411-1232; [c]**ORCID**: 0000-0001-7696-3418; [d]**ORCID**: 0000-0001-6180-5409*

Makale Bilgileri

Geliş : 15.12.2025
Kabul : 06.10.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1841784

Sorumlu Yazar

Tülay ÖNCÜ ÖNER
tulay.oncu@cbu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Biberiye
Siyah üzüm çekirdeği
Sinerjik etki
Antibakteriyel
Sitotoksisite

***Atıf şekli:** ÜNSAL, E., İNAM, A., ÇÖVEN, F.O., ÖNCÜ ÖNER, T., (2026). Biberiye ve Siyah Üzüm Çekirdeği Etanolik Ekstraktlarının Toplam Fenolik ve Flavonoid Madde Miktarlarının ve Biyolojik Aktivitelerinin Belirlenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 791-806.*

ÖZ

Bu çalışmada, biberiye ve siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktlarının toplam fenolik madde ve toplam flavonoid madde içerikleri belirlenmiş; antioksidan ve antibakteriyel aktiviteleri değerlendirilmiş ve T24 ile HUVEC hücre hatları üzerindeki sitotoksik etkileri incelenmiştir. Ayrıca, sitotoksik ve antibakteriyel aktivitelerin değerlendirilmesinde ekstraktların kombinasyonlarının olası sinerjik etkileri de araştırılmıştır. En yüksek toplam fenolik madde miktarı biberiye ekstraktında 5,69 ± 0,03 mg GAE/mL, en yüksek toplam flavonoid madde miktarı ise yine biberiye ekstraktında 3,09 ± 0,12 mg CE/mL olarak belirlenmiştir. En yüksek antioksidan aktivite ise siyah üzüm çekirdeği ekstraktında %93,90 ± 2,32 olarak elde edilmiştir. Ekstraktların farklı oranlarda kombinasyonu sonucunda antibakteriyel aktivitenin arttığı gözlenmiştir. Bu ekstraktlarda *Staphylococcus aureus*'a karşı en yüksek antibakteriyel aktivite biberiye:siyah üzüm çekirdeği (3:1)'de, *Escherichia coli*'ye karşı ise biberiye:siyah üzüm çekirdeği (1:3) oranında elde edilmiştir. Sitotoksisite analizinde, biberiye ekstraktının 72. saatteki IC_{50} değerleri HUVEC hücrelerinde 309,96 ± 4,56 µg/mL ve T24 hücrelerinde 290,00 ± 17,49 µg/mL olarak hesaplanmıştır. Siyah üzüm çekirdeği ekstraktının IC_{50} değerleri ise HUVEC hücrelerinde 915,23 ± 17,90 µg/mL ve T24 hücrelerinde 827,30 ± 48,85 µg/mL olarak bulunmuştur.

Determination of Total Phenolic and Flavonoid Contents and Biological Activity of Rosemary and Black Grape Seed Ethanolic Extracts

Article Info

Received : 15.12.2025
Accepted : 06.10.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1841784

Corresponding Author

Tülay ÖNCÜ ÖNER
tulay.oncu@cbu.edu.tr

Keywords

Rosemary
Black grape seed
Synergistic effects
Antibacterial
Cytotoxicity

***How to cite:** ÜNSAL, E., İNAM, A., ÇÖVEN, F.O., ÖNCÜ ÖNER, T., (2026). Determination of Total Phenolic and Flavonoid Contents and Biological Activity of Rosemary and Black Grape Seed Ethanolic Extracts. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 791-806.*

ABSTRACT

In this study, the total phenolic content and total flavonoid content of ethanolic extracts of rosemary and black grape seeds were determined, their antioxidant and antibacterial activities were evaluated, and their cytotoxic effects on T24 and HUVEC cell lines were investigated. In addition, the potential synergistic effects of different extract combinations were evaluated in terms of their cytotoxic and antibacterial activities. The highest total phenolic content was determined in the rosemary extract, at 5.69 ± 0.03 mg GAE/mL, while the highest total flavonoid content was also obtained for the rosemary extract, at 3.09 ± 0.12 mg CE/mL. The highest antioxidant activity was observed for the black grape seed extract, with an inhibition rate of 93.90 ± 2.32%. An increase in antibacterial activity was observed following the combination of the extracts at different ratios. The highest antibacterial activity against *Staphylococcus aureus* was obtained with the rosemary:black grape seed combination at a ratio of 3:1, whereas the highest activity against *Escherichia coli* was observed at a ratio of 1:3. In the cytotoxicity assay, the IC_{50} values of the rosemary extract at 72 h were calculated as 309.96 ± 4.56 µg/mL in HUVEC cells and 290.00 ± 17.49 µg/mL in T24 cells. For the black grape seed extract, the IC_{50} values were determined as 915.23 ± 17.90 µg/mL in HUVEC cells and 827.30 ± 48.85 µg/mL in T24 cells.

1. GİRİŞ

Bitkisel kaynaklı ürünler, antik çağlardan günümüze kadar birçok hastalığın tedavisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Modern farmasötiklere kıyasla daha düşük toksisite ve sınırlı yan etki göstermeleri, bu ürünlerin özellikle halk hekimliğinde ve tamamlayıcı tıpta tercih edilmesine yol açmıştır. Bitkisel ilaçlar tek başına veya standart ilaçlarla birlikte, farklı hastalıkların tedavisi için çeşitli tıbbi tedavilerde kullanılmaktadır [1,2]. Son yıllarda doğal ve ekolojik ürünlere olan ilginin artması, aromatik ve tıbbi bitkilerin biyolojik aktivitelerinin daha kapsamlı bir şekilde araştırılmasına zemin hazırlamıştır [3]. Bunun en önemli nedenlerinden biri, kronik hastalıkların patogenezinde oksidatif stres ve serbest radikallerin rolünün açıkça ortaya konmuş olmasıdır. Serbest radikallerin dengesizliği, lipit peroksidasyonu, deoksiribonükleik asit ve protein oksidasyonuna yol açarak kanser, kardiyovasküler iletim bozuklukları, diyabet ve nörodejeneratif bozuklukları tetiklemektedir. Sentetik antioksidanların (örneğin Bütillenmiş Hidroksianisol: BHA, Bütillenmiş Hidroksitoluen: BHT) uzun süreli kullanımının toksik ve karsinojenik etkileri artırabileceğine dair bulgular, araştırmacıları doğal antioksidan kaynaklarına yönlendirmiştir [3,4]. Bu kapsamda, fenolik bileşikler, flavonoidler, tokoferoller ve resveratrol gibi sağlık üzerinde olumlu etkileri bulunan bitkisel ekstraktlar önem kazanmaktadır. Bitkisel kaynaklı ekstraktların biyolojik aktivitelerinin ortaya konması hem gıdalarda fonksiyonel ürünlerin kullanılması hem de sağlık alanında alternatif tedavi seçeneklerinin sağlanması açısından önemlidir [4]. Özellikle bitkilerin fenolik ve flavonoidler gibi farklı fitokimyasallar içermesi bu kaynakların hem geleneksel hem de modern yollarla çeşitli hastalıkların tedavisinde kullanılmasına yol açmış olup; son yıllarda bitki kaynaklı ticari ürünlere olan talep artmıştır [5].

Rosmarinus officinalis L. (*Salvia rosmarinus* Spenn.) tıbbi ve aromatik bitkiler arasında önemli bir yere sahiptir. Yaygın olarak biberiye ismiyle kullanılan *Salvia rosmarinus*, iğne benzeri yaprakları olan *Lamiaceae* familyasının hoş kokulu bir üyesidir. Biberiye, içerdiği karnosik asit, ursolik asit, rosmarinik asit ve flavonoidler sayesinde güçlü bir doğal antioksidan, anti-inflamatuar ve antimikrobiyal ajandır. Geleneksel kullanımının yanı sıra gıda, ilaç ve kozmetik endüstrisinde de değerlendirilmektedir [6]. Bu bileşiklerin aynı zamanda antikanser etkileri gösterdiği, hücre proliferasyonunu baskıladığı ve apoptoz mekanizmalarını aktive ettiği farklı çalışmalarda ortaya konmuştur [7,8]. Türkiye'de kalp damar rahatsızlıklarından sonra ölüm nedeni olarak ikinci sırada yer alan kanserin tedavisine yönelik metabolitlerin tespiti, bu noktada oldukça önemli hale gelmiştir [9]. Farklı biberiye ekstraktlarının antibakteriyel ve nöroprotektif özellikler gösterdiği de rapor edilmiştir. Özellikle gıda endüstrisinde doğal koruyucu olarak kullanımı yaygınlaşmaktadır [3]. Biberiyenin terapötik uygulamasına ilişkin araştırmalar, inflamatuar bozuklukların yanı sıra özellikle yara, cilt kanseri ve mikozları tedavi etmek için de kullanılabileceğini ortaya koymuştur [6]. Ayrıca biberiye, Akdeniz diyetinde besin olarak geniş ölçüde kullanılmaktadır [10]. Aromatik bir bitki olan biberiyenin sahip olduğu antiviral, antifungal, antibakteriyel, antikanser, antidepresan, antitrombotik ve antinosiseptif özellikleri sağlık alanında popüler hale gelmesini sağlamıştır. Bu bitki, cilt ve solunum rahatsızlıklarının yanı sıra dolaşım, nörolojik, mide-bağırsak, genitoüriner, karaciğer ve üreme sistemi hastalıklarının tedavisi gibi bir dizi tıbbi kullanımla ilişkilendirilmektedir [11]. Ekstraksiyon yöntemine bağlı olarak ekstraktlar arasında farklılık gösterebilen polifenoller, flavonoidler ve diterpenler gibi çeşitli bileşikleri içermektedir [12]. Biberiyenin içerdiği flavonoidler genellikle yapraklarda, çiçeklerde ve köklerde bulunmaktadır ve bu bileşikler eriocitrin, luteolin 3'-O-β-D-glukuronid, hesperidin, diosmin, izoscutellarein 7-O-glukozit, hispidulin 7-O-glukozit ve genkwanin olarak belirlenmiştir [13]. Fenolik bileşikler arasında kafeik, ferulik, p-kumarik, gallik, kinik ve şirinjik asitler bulunmaktadır [14]. Özellikle diterpen karnosol ve karnosik asit gibi bileşikler bitkinin antioksidan potansiyelinin %90'ına kadar katkıda bulunmaktadır [12]. Biberiyenin anti-inflamatuar aktivitesi ise, sinerjik olarak etki eden karnosol ve karnosik, ursolik, rosmarinik, oleanolik ve mikromerik gibi bileşiklerle ilişkilendirilmiştir [15]. Literatürde, biberiye ekstraktlarının hem Gram-pozitif hem de Gram-negatif bakterilere karşı etkili olduğu, kanser hücre hatlarında antiproliferatif ve sitotoksik özellikler gösterdiği bildirilmektedir [16,17].

Siyah üzüm olarak bilinen *Vitis vinifera*, dünyanın birçok yerinde yetiştirilmektedir ve farklı tıbbi kullanımlara sahiptir. Antioksidan, anti-inflamatuar, antibakteriyel aktiviteler ve yara iyileştirici etkileri kanıtlanan biyolojik aktiviteleri arasındadır [18]. Siyah üzüm çekirdeği ekstraktı ise resveratrol, kateşin, epikateşin ve proantosiyanidinler açısından zengindir. Bu bileşikler, üzüm çekirdeğini güçlü bir antioksidan ve antikanser ajan haline getirmektedir. Fenolik bileşikler bakımından zengin olan üzüm, yaşlanma

geciktirici etkilere sahip olduğu bildirilen ve Alzheimer hastalığına karşı potansiyel koruyucu etki gösterebilecek aktif bileşenler içermektedir [19]. Farklı kullanım amaçlarına yönelik farklı üzüm türleri yetiştirilmektedir. İçeriğinde siyanidin, malvidin ve peonidin içeren antosiyaninler; kersetin, kateşin ve epikateşin içeren flavonoller; polifenoller; resveratrol içeren stilbenler; karbonhidratlar; kalsiyum, magnezyum, potasyum ve demir içeren tuzlar; ve A, D, C ve E vitaminleri; ayrıca doymuş veya doymamış yağlar bulunmaktadır [18]. Besin değeri yüksek olan bu bitkinin, yaprakları, sapları ve meyveleri gibi parçalarının ve tohumlarının sayısız farmakolojik etkisi kanıtlanmıştır [20]. Üzüm sapı ekstraktlarının antioksidan ve antimikrobiyal aktivitelere sahip olduğu bildirilmiştir. Meyve ve çekirdeğinde bulunan resveratrol ve proantosiyanidin sayesinde farklı kanser hücre hatları üzerinde sitotoksik aktiviteler tespit edilmiştir [21]. Siyah üzüm çekirdeği de fenolik bileşikler, flavonoidler, resveratrol ve tokoferoller açısından zengin bir kaynaktır. Antioksidan ve antimikrobiyal aktiviteleri yanında sitotoksik etkileri de birçok çalışmada gösterilmiştir. Üzüm çekirdeği ekstraktlarının kanser hücre hatları üzerinde seçici toksisite oluşturduğu, aynı zamanda bakterilere ve mantarlara karşı da inhibitör etki gösterdiği bilinmektedir [22,23]. Yapılan çalışma, üzüm çekirdeği proantosiyanidinlerinin kolon kanseri hücrelerinde PI3K/Akt yolunu devre dışı bırakarak apoptozu indüklediğini göstermiştir [22]. Benzer şekilde başka bir araştırma, üzüm kabuğu ve çekirdek ekstraktlarının epidermoid karsinom hücrelerinde apoptotik etki oluşturduğunu rapor etmiştir [24]. Üzüm çekirdeği ekstraktının antimikrobiyal potansiyeli bulunmaktadır; özellikle Gram-pozitif bakterilere karşı yüksek etki gösterdiği bilinmektedir [19]. Bu bilgiler ışığında, bitkisel ekstraktların biyolojik aktivitelerinin araştırılması hem sağlık hem de endüstriyel uygulamalar açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle fenolik ve flavonoid bileşiklerin antioksidan ve antimikrobiyal potansiyeli, doğal ürünlere dayalı yeni tedavi ve koruyucu yaklaşımların geliştirilmesinde yol gösterici olmaktadır.

Tüm bu veriler, farklı bitkisel kaynaklardan elde edilen ekstraktların fenolik içerikleri, antioksidan etkileri, sitotoksisite ve antibakteriyel özelliklerinin belirlenmesinin hem biyomedikal hem de farmasötik uygulamalara yönelik yeni potansiyel biyoaktif ajanların geliştirilmesi açısından önemli olduğunu göstermektedir. Bu çalışmanın amacı, biberiye ve siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktlarının toplam fenolik ve toplam flavonoid madde miktarlarının belirlenmesi ve biyolojik aktivitelerinin (antioksidan, sitotoksik ve antibakteriyel) değerlendirilmesidir. Bu kapsamda ekstraktların hem bireysel hem de kombine olarak etkilerinin test edilmesi planlanmış, özellikle sinerjik etki potansiyelinin ortaya konması hedeflenmiştir. Bu ekstraktların farklı kanser hücre hatları ve bakteri türleri üzerindeki etkileri sistematik bir şekilde incelenmiştir. Literatürde biberiye ve siyah üzüm çekirdeğinin tek başına biyolojik aktiviteleri üzerine çeşitli çalışmalar bulunmasına rağmen [25,26], birlikte kullanımının potansiyel sinerjik etkilerini değerlendiren çalışmalar sınırlıdır. Dolayısıyla söz konusu ekstraktların toplam fenolik ve toplam flavonoid madde miktarlarının belirlenmesi ve antioksidan, antibakteriyel ve sitotoksik aktivitelerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi hem literatürdeki boşlukların doldurulmasına hem de biyolojik ajanların yeni uygulama alanlarının tanımlanmasına katkı sağlamıştır.

2. MATERYAL YÖNTEM

2.1. Ekstraksiyon İşlemi

Biberiye ve siyah üzüm çekirdekleri Arpaş Arifoğlu Pazarlama Dağıtım ve Ticaret A.Ş. (Türkiye) firmasından temin edilmiştir. Siyah üzüm çekirdekleri hazır toz formunda bulunurken, biberiye bitkisi öğütücüde öğütülerek toz hale getirilerek kullanılmıştır. Her iki bitkinin ekstraksiyonu yapılan ön çalışmalara bağlı olarak farklı polaritedeki bileşiklerin ekstrakte edilmesi amacıyla etanol:su (70:30) çözeltisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, 10 gram toz örneğin üzerine 100 mL çözelti eklenmiş, karışım homojen hale getirildikten sonra ultrasonik destekli ekstraksiyon 1 saat boyunca uygulanmıştır. Bu işlem için oda sıcaklığında sonikasyon sağlayan su banyosu kullanılmıştır. Sıcaklık kontrolü ise termometre ile sağlanmış, gerektiğinde kavitasyonel sıcaklık artışına soğuk su desteği yapılmıştır. Ekstraksiyonun ardından, çöktürme işlemi 50 mL hacmindeki falkon tüplerde 20 °C'de 4000 rpm'de 15 dakika süreyle santrifüj edilerek yapılmıştır. Elde edilen süpernatant, önce 40 °C'de evaporasyonla etanolden arındırılmış, daha sonra -56 °C kondenser sıcaklığında; 1,1 mbar basınç altında liyofilizasyon (Christ 1-2 LDplus) yapılarak sudan tamamen uzaklaştırılmıştır. Kurutulmuş ekstraktlar, analizler gerçekleştirilinceye kadar -20 °C'de, ağzı kapaklı 250 mL şilifli balonlarda yaklaşık 1 ay süreyle muhafaza edilmiştir. Son aşamada, kurutulmuş ekstraktlar testlerde kullanılmak üzere 1:10 (ağırlık/hacim) oranında etanol:su (70:30) içerisinde çözülerek hazırlanmıştır.

2.2. Ekstraktların Antioksidan Aktivitelerinin Belirlenmesi

Antioksidan aktivite, Seyrekoğlu ve Temiz (2020) çalışmasında açıklanan DPPH (2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl) yöntemi baz alınarak modifiye edilmiş bir protokolle belirlenmiştir. Ekstrakt örneklerinden 50 µL alınarak cam tüplere aktarılmış ve hacim, metanol eklenerek 200 µL'ye tamamlanmıştır. Ardından, her bir tüpe 3,8 mL 0,1 mM metanol ile hazırlanmış DPPH çözeltisi ilave edilmiştir. Karışımlar vorteks yardımıyla homojenize edilmiş ve literatürde belirtildiği üzere tüpler inkübasyon süresi olarak 60 dakika boyunca karanlık ortamda bekletilmiştir. Süre sonunda absorbans değerleri spektrofotometrede 515 nm dalga boyunda ölçülmüştür. Kontrol grubunda ise 200 µL etanol:su (70:30) çözeltisi, aynı işlem basamakları izlenerek değerlendirilmiştir [27]. Elde edilen sonuçlar, aşağıdaki Eşitlik (1) kullanılarak % inhibisyon olarak hesaplanmıştır:

$$\% \text{ inhibisyon} = (Abs_{\text{pozitif kontrol}} - Abs_{\text{örnek}}) / Abs_{\text{pozitif kontrol}} \times 100 \quad (1)$$

2.3. Ekstraktların Toplam Fenolik Madde Miktarı Tayini

Toplam fenolik madde miktarı, Folin-Ciocalteu yöntemi ile 96 kuyucuklu mikroplakalar kullanılarak belirlenmiştir. Ekstrakt örneklerinden 20 µL alınarak kuyucuklara aktarılmış, ardından üzerine 100 µL 0,2 N Folin-Ciocalteu reaktifi eklenmiş ve karışım 2,5 dakika boyunca karanlıkta inkübe edilmiştir. Daha sonra her kuyucuğa %7'lik Na_2CO_3 çözeltisinden 80 µL ilave edilerek pipetleme ile homojenizasyon sağlanmıştır. Hazırlanan karışımlar, oda sıcaklığında ve karanlık koşullarda literatürde belirtildiği üzere inkübasyon süresi olarak 60 dakika boyunca bekletilmiştir. Süre sonunda absorbans ölçümleri spektrofotometrede 775 nm dalga boyunda gerçekleştirilmiştir. Gallik asit standardı için hazırlanan çözeltiler de aynı prosedüre göre işleme tabi tutulmuş ve kalibrasyon eğrisi oluşturulmuştur. Sonuçlar, gallik asit eşdeğeri (GAE) olarak mg GAE/mL biriminden ifade edilmiştir [28].

2.4. Ekstraktların Toplam Flavonoid Madde Miktarı Tayini

Toplam flavonoid miktarı, Molan ve Mahdy (2014) tarafından rapor edilen alüminyum klorür kolorimetrik yöntemi ile 96 kuyucuklu mikroplakalar kullanılarak belirlenmiştir. Mikroplakanın her bir kuyucuğuna sırasıyla 25 µL ekstrakt, 100 µL distile su ve %5 $NaNO_2$ çözeltisinden 7 µL eklenmiştir. Oda sıcaklığında 5 dakika inkübasyon süresinin tamamlanmasının ardından, karışıma %10 $AlCl_3$ çözeltisinden 7 µL ilave edilmiş ve karışım 5 dakika daha bekletilmiştir. Sonrasında reaksiyonu tamamlamak üzere 50 µL 1 M NaOH ve 60 µL distile su eklenmiştir. Absorbans ölçümleri, mikroplaka okuyucusunda 490 nm dalga boyunda gerçekleştirilmiş olup sonuçlar kateşin eşdeğeri (CE) olarak mg CE/mL biriminden ifade edilmiştir [29].

2.5. Ekstraktların Sitotoksik Aktivitelerinin Belirlenmesi

Bu çalışmada, ekstraktların sitotoksik etkilerinin değerlendirilmesinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biri olan MTT [3-(4,5-Dimethylthiazol-2-yl)-2,5-Diphenyltetrazolium Bromide] testi uygulanmıştır. Analiz kapsamında, biberiye ve siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktlarının T24 insan mesane kanseri hücre hattı ile sağlıklı kontrol olarak kullanılan HUVEC (insan göbek kordonu ven endotel) hücre hattı üzerindeki sitotoksik etkileri incelenmiştir. Tüm hücreler, %10 FBS (fetal bovine serum), %1 L-glutamin, %1 sodyum piruvat, %1 penisilin/streptomisin ve %1 esansiyel olmayan aminoasit içeren DMEM (Dulbecco's Modified Eagle Medium) besiyerinde kültüre edilmiştir. Hücreler T75 flasklara ekildikten sonra 37 °C sıcaklıkta, %5 CO_2 ve %95 nem koşullarında inkübe edilmiştir. Hücreler yaklaşık %80 konfluent seviyesine ulaştığında, tripsin-EDTA kullanılarak flask yüzeyinden kaldırılmış ve Neubauer lamı ile trypan blue boyama yöntemi kullanılarak hücre sayımı gerçekleştirilmiştir. Daha sonra 96 kuyucuklu mikroplakalara her kuyucuğa 100 µL hacimde 10^4 hücre ekilmiştir. Plakalar 24 saat inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon sonrası hücreler, farklı konsantrasyonlarda hazırlanan ekstraktlarla muamele edilmiştir. Biberiye ve siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktları için 50, 100, 250, 500, 1000, 2000 ve 4000 µg/mL konsantrasyonları uygulanmıştır. Kontrol gruplarında ise yalnızca çözücü etkisini değerlendirmek amacıyla etanol:su (70:30) kullanılmıştır. Ekstrakt uygulamasının ardından hücreler 24, 48 ve 72 saat boyunca aynı inkübasyon koşullarında bekletilmiştir. Belirtilen sürelerin sonunda her kuyucuğa 10 µL 5 mg/mL MTT/PBS (Fosfat tamponlu salin) çözeltisi eklenmiş ve plakalar 3,5 saat boyunca inkübatörde tutulmuştur. Bu süre içinde canlı hücrelerde bulunan mitokondriyal enzimlerin indirgeme aktivitesi sonucu formazan kristalleri oluşmuştur. İnkübasyon tamamlandığında kültür ortamı

uzaklaştırılmış ve oluşan kristallerin çözünmesi için her kuyucuğa 100 µL dimetil sülfoksit (DMSO) eklenerek homojenizasyon sağlanmıştır. Ardından absorbans değerleri mikroplaka okuyucu cihazda 570 nm dalga boyunda ölçülmüştür [30]. Sitotoksisite düzeyleri aşağıdaki Eşitlik (2) kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\% \text{ Hücre canlılığı} = (Abs_{\text{test kuyucuğu}} / Abs_{\text{kontrol kuyucuğu}}) \times 100 \quad (2)$$

Kontrole kıyasla %50 oranında sitotoksik etki oluşturan konsantrasyon, sitotoksik doz (IC_{50}) olarak tanımlanmıştır. Biberiye ve siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktlarının bireysel IC_{50} değerleri belirlenmiş; ayrıca bu iki ekstraktın farklı konsantrasyonları karıştırılarak deneyler tekrarlanmış ve böylelikle sitotoksik aktivite üzerinde olası sinerjik etkileri değerlendirilmiştir.

2.6. Ekstraktların Antibakteriyel Aktivitelerinin Belirlenmesi

Antibakteriyel aktivitenin belirlenmesi amacıyla mikrodilüsyon yöntemi kullanılarak minimum inhibisyon konsantrasyonu (MIC) değerleri tayin edilmiş ve agar plakalarda disk difüzyon testi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Gram-pozitif *Staphylococcus aureus* ve Gram-negatif *Escherichia coli* bakteri türleri kullanılmıştır. Her iki bakteri türü, Nutrient Broth besiyerinde 37 °C'de, çalkalamalı inkübatörde 24 saat süreyle kültüre edilmiştir. Elde edilen kültürlerin bulanıklığı, 600 nm dalga boyunda absorbans değeri 0,6 olacak şekilde seyreltilerek standartlaştırılmıştır. MIC belirlenmesi için ekstraktlar stok çözeltiden (100 µL) başlayarak seri seyreltme yöntemi ile hazırlanmış ve 96 kuyucuklu mikroplakalara 5×10^5 CFU/mL yoğunlukta bakteri süspansiyonu (100 µL) eklenmiştir. Plakalar 24 saat inkübasyona bırakıldıktan sonra 600 nm'de absorbans ölçümleri yapılarak MIC değerleri hesaplanmıştır [31,32].

Disk difüzyon yönteminde ise 24 saatlik inkübasyonun ardından bakteri kültürlerinin türbiditesi yine 600 nm'de absorbans 0,6 değerine ayarlanmıştır. Hesaplamalar doğrultusunda 1×10^6 CFU/mL olacak şekilde hazırlanan bakteri süspansiyonları, Mueller Hinton Agar (MHA) plakalarına yayma plaka yöntemiyle inoküle edilmiştir. Steril 6 mm çapındaki Oxoid diskler, ekstraktlardan 30 µL emdirilerek agar yüzeyine yerleştirilmiştir. Plakalar 37 °C'de 24 saat inkübe edildikten sonra oluşan inhibisyon zonlarının çapları (mm) ölçülmüştür. Ayrıca biberiye ve siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktlarının 1:1, 1:2, 1:3, 2:1 ve 3:1 oranlarında karışımları hazırlanarak olası sinerjik etkileri değerlendirilmiştir [31,32].

2.7. İstatistiksel Analiz

Sitotoksisite ve antibakteriyel aktivite testlerinde verilerin istatistiksel analizleri GraphPad Prism, (Sürüm 8.4.2) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her konsantrasyon üç bağımsız tekrar halinde yürütülmüştür. Elde edilen sonuçlar ortalama ± standart sapma olarak ifade edilmiş ve $p<0,05$ istatistiksel olarak anlamlı kabul edilmiştir. Verilerin normal dağılımı Shapiro–Wilk testi ile değerlendirilmiştir. Gruplar arasındaki karşılaştırmalarda One-way ANOVA ve Tukey post-hoc testi kullanılmıştır. Normal dağılım göstermeyen veriler için Mann–Whitney veya Kruskal–Wallis testi uygulanmıştır [30].

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Ekstraktların Antioksidan Aktivitelerinin Tespit Edilmesi

Biberiye ve siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktlarının antioksidan aktiviteleri DPPH yöntemine göre belirlenmiştir. Ekstraktların serbest radikalleri yok etme aktivitesi %inhibisyon olarak ifade edilmiştir (Çizelge 1). Bu sonuçlara göre en yüksek antioksidan aktivite siyah üzüm çekirdeğinin etanolik ekstraktında elde edilmiştir. İnhibisyon değeri siyah üzüm çekirdeği ekstraktında %93,90 ± 2,32, biberiye ekstraktında %92,84 ± 2,53 olarak hesaplanmıştır. Bunun yanında standart olarak kullanılan Bütillenmiş Hidroksi Anisol (BHA)'de bu konsantrasyondaki antioksidan aktivite değeri %97,09 olarak tespit edilmiştir. Siyah üzüm çekirdeği ve biberiye ekstraktlarında BHA'ya yakın aktivite değerleri bulunmuştur.

Çizelge 1. Ekstraktların antioksidan aktivite sonuçları

Ekstrakt	%inhibisyon
Biberiye	92,84 ± 2,53
Siyah üzüm çekirdeği	93,90 ± 2,32

3.2. Ekstraktların Toplam Fenolik Madde Miktarının Tespit Edilmesi

Ekstraktların toplam fenolik madde miktarı analizi Folin-Ciocalteu metoduna göre uygulanmıştır. Gallik asit eşdeğerliğinde (GAE) en yüksek toplam fenolik madde miktarı biberiyede elde edilmiştir. Toplam fenolik madde miktarı biberiye etanolik ekstraktında 5,69 ± 0,03 mg GAE/mL, siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktında 5,25 ± 0,02 mg GAE/mL olarak bulunmuştur (Çizelge 2).

Çizelge 2. Ekstraktların toplam fenolik madde miktarı sonuçları

Ekstrakt	Toplam fenolik madde miktarı
Biberiye	5,69 ± 0,03 mg GAE/mL
Siyah üzüm çekirdeği	5,25 ± 0,02 mg GAE/mL

3.3. Ekstraktların Toplam Flavonoid Madde Miktarının Tespit Edilmesi

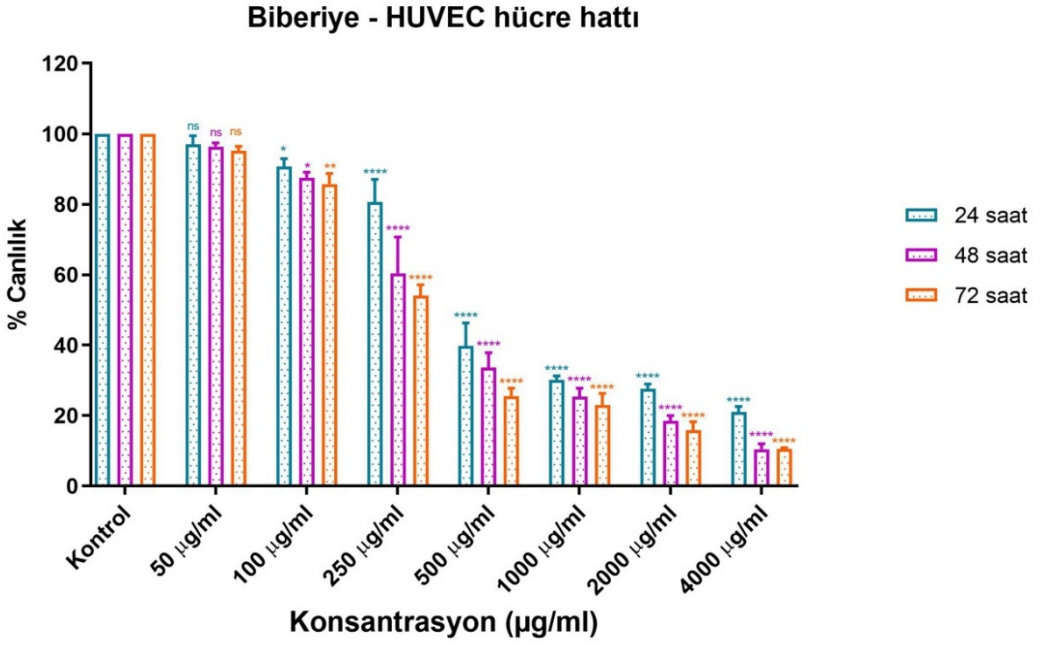
Ekstraktların toplam flavonoid madde miktarı analizi alüminyum klorür kolorimetrik metoduna göre uygulanmıştır. En yüksek flavonoid madde miktarı biberiye etanolik ekstraktındadır. Toplam flavonoid madde miktarı biberiye etanolik ekstraktında 3,09 ± 0,12 mg CE/mL, siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktında 1,71 ± 0,06 mg CE/mL olarak bulunmuştur (Çizelge 3).

Çizelge 3. Ekstraktların toplam flavonoid madde miktarı sonuçları

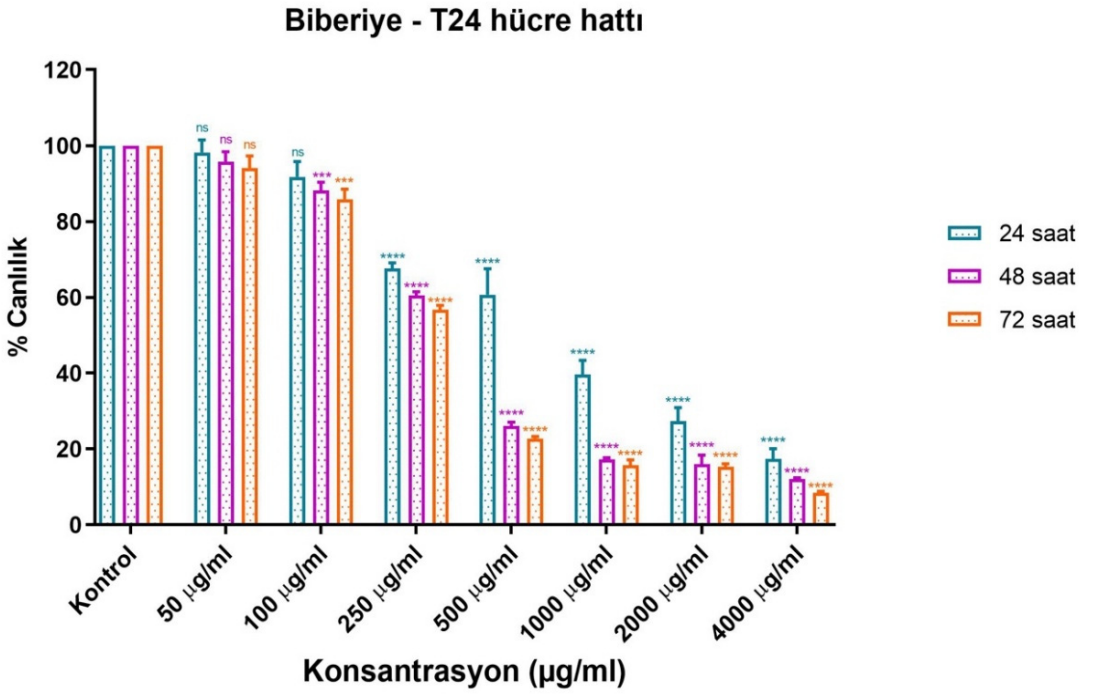
Ekstrakt	Toplam flavonoid madde miktarı
Biberiye	3,09 ± 0,12 mg CE/mL
Siyah üzüm çekirdeği	1,71 ± 0,06 mg CE/mL

3.4. Ekstraktların Sitotoksik Aktivitelerinin Tespit Edilmesi

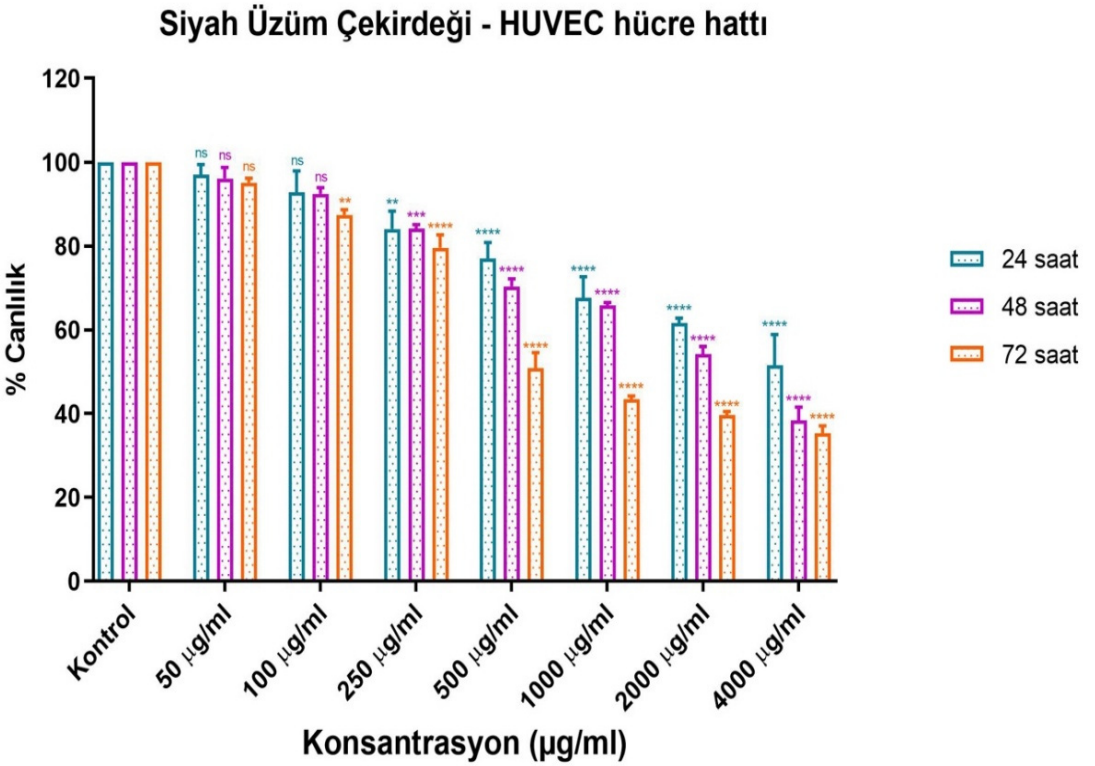
Öncelikle biberiye ve siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktlarının bireysel sitotoksik aktiviteleri MTT testi ile belirlenmiştir. Farklı dozlarla muamele edilen hücrelerde üç farklı zaman diliminde yüzde canlılıklar hesaplanmıştır. 24., 48., ve 72. saatte alınan absorbans sonuçları kontrol kuyucuklarına kıyaslanmış ve ekstraktların hücre canlılığını azaltma yüzdeleri belirlenmiştir (Şekil 1-4).



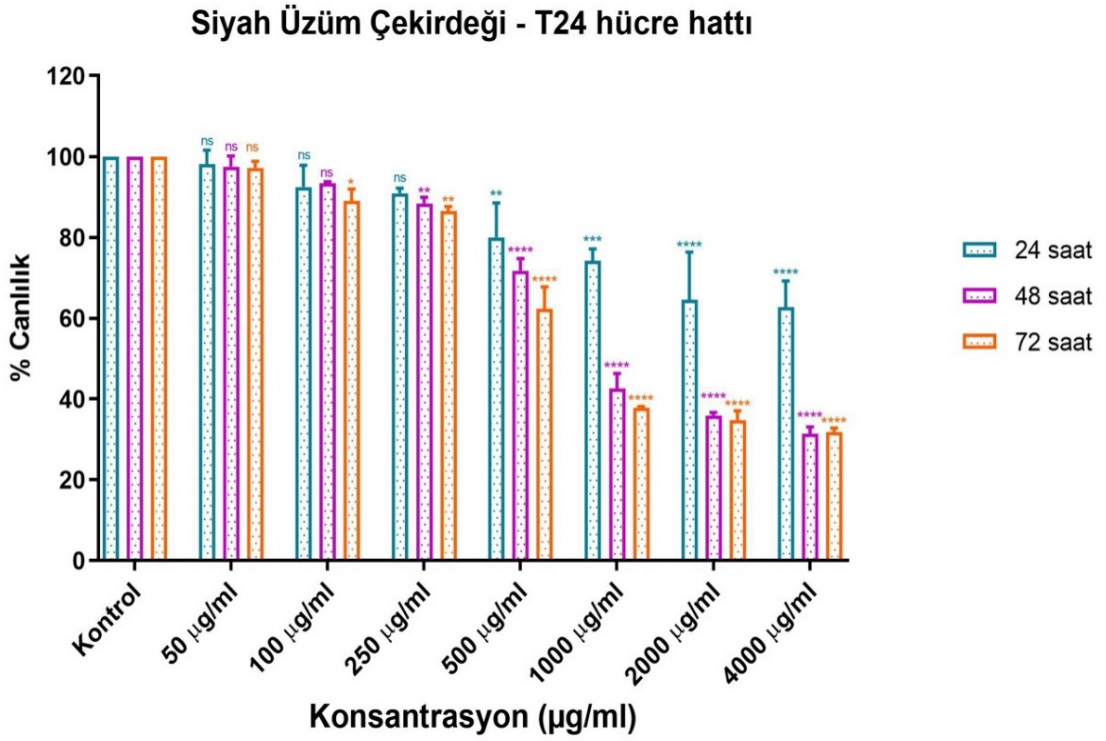
Şekil 1. Biberiye etanolik ekstraktının HUVEC hücrelerinde 24, 48 ve 72 saat sonrası yüzde canlılık değerleri (Hata çubukları standart sapmayı (SD) göstermektedir (n=3)) (ns: istatistiksel olarak anlamlı değil; *p < 0,05; **p < 0,01; ***p < 0,001; ****p < 0,0001)



Şekil 2. Biberiye etanolik ekstraktının T24 hücrelerinde 24, 48 ve 72 saat sonrası yüzde canlılık değerleri. (Hata çubukları standart sapmayı (SD) göstermektedir (n=3)) (ns: istatistiksel olarak anlamlı değil; *p < 0,05; **p < 0,01; ***p < 0,001; ****p < 0,0001)



Şekil 3. Siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktının HUVEC hücrelerinde 24, 48 ve 72 saat sonrası yüzde canlılık değerleri. (Hata çubukları standart sapmayı (SD) göstermektedir (n=3)) (ns: istatistiksel olarak anlamlı değil; *p < 0,05; **p < 0,01; ***p < 0,001; ****p < 0,0001).



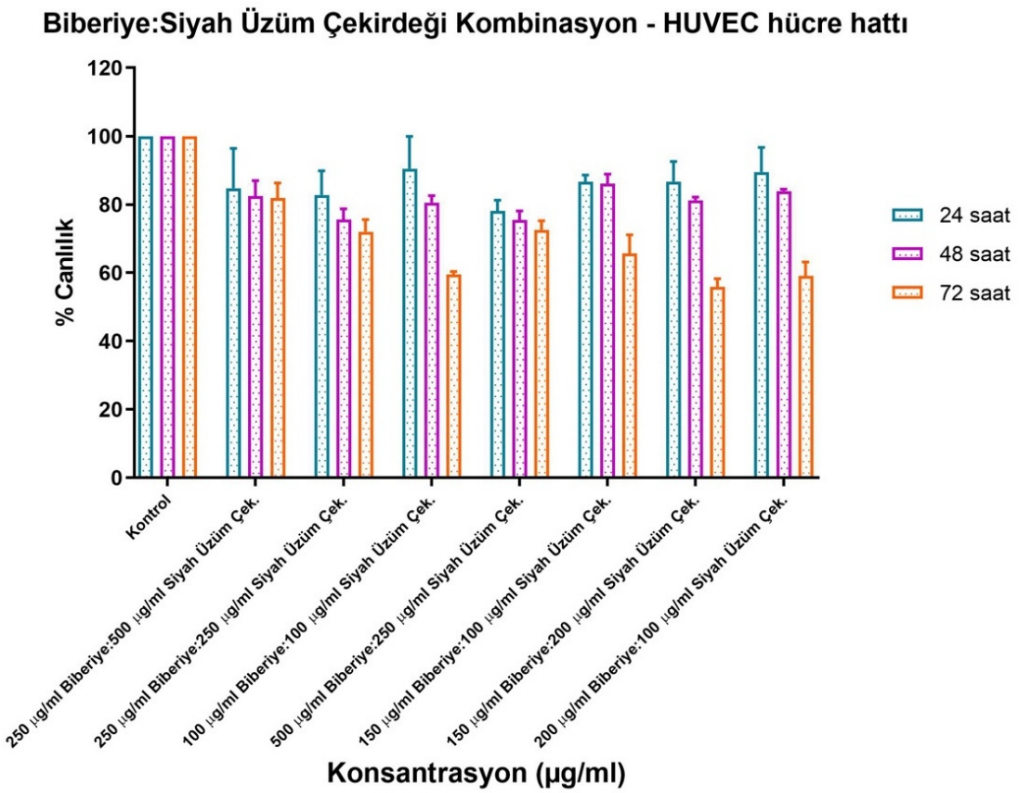
Şekil 4. Siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktının T24 hücrelerinde 24, 48 ve 72 saat sonrası yüzde canlılık değerleri. (Hata çubukları standart sapmayı (SD) göstermektedir (n=3)) (ns: istatistiksel olarak anlamlı değil; *p < 0,05; **p < 0,01; ***p < 0,001; ****p < 0,0001)

Hücrelerin yüzde canlılık değerlerine göre GraphPad Prism 8.4.2. yazılımı (San Diego, CA, ABD) kullanılarak ekstraktların IC_{50} değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4). Çalışmada biberiye ve siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktlarının IC_{50} değeri HUVEC ve T24 hücrelerine karşı 24., 48. ve 72. saat sonunda belirlenmiştir.

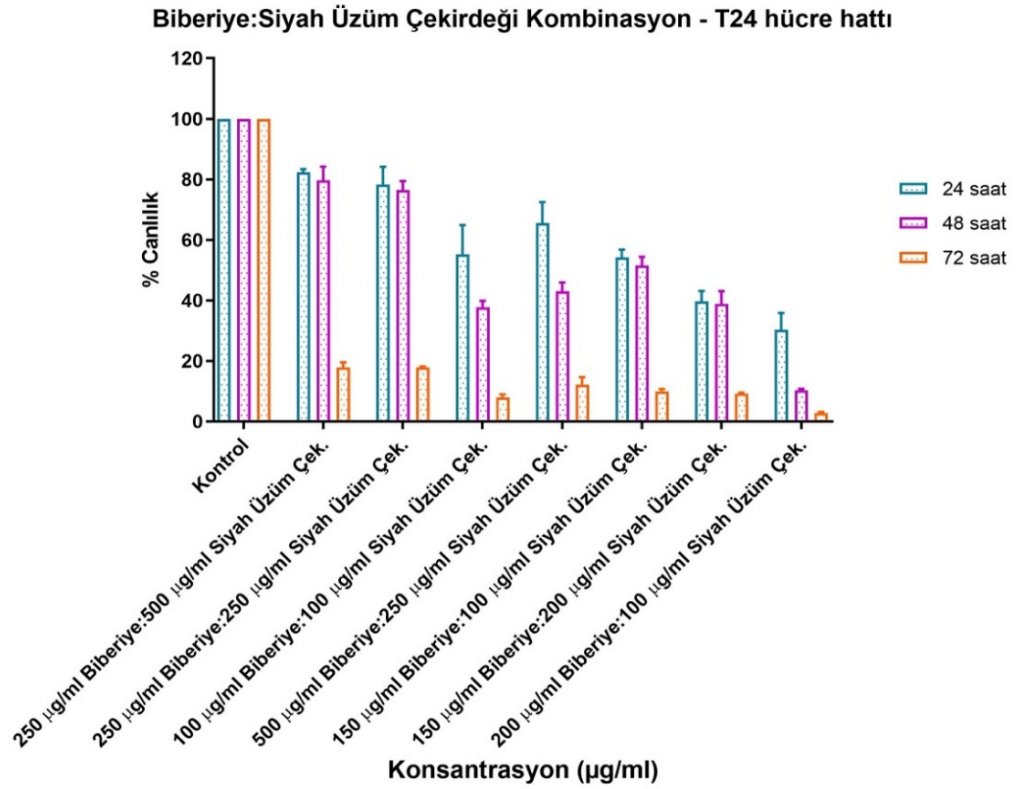
Çizelge 4. Ekstraktların IC_{50} değerleri (µg/mL) (± değerleri standart sapmayı (SD) ifade etmektedir(n=3))

Ekstrakt	Hücre Hattı	24h	48h	72h
Biberiye	HUVEC	482,03 ± 23,18	387,60 ± 26,98	309,96 ± 4,56
	T24	712,30 ± 55,22	327,16 ± 13,96	290,00 ± 17,49
Siyah Üzüm Çekirdeği	HUVEC	4244,33 ± 282,63	2193,33 ± 134,81	915,23 ± 17,90
	T24	4542,33 ± 106,16	931,66 ± 41,10	827,30 ± 48,85

Biberiye ve siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktları HUVEC hücrelerine göre T24 hücrelerinde daha fazla sitotoksik aktivite sergilemiştir. Siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktında en etkili sonuç T24 hücresine karşı 72 saat sonunda 827,30 ± 48,85 µg/mL değeri ile bulunmuştur. Biberiye etanolik ekstraktında da benzer bir şekilde T24 hücresine karşı 72 saat sonunda IC_{50} değeri 290,00 ± 17,49 µg/mL olarak hesaplanmıştır. Tüm örneklerde saate ve doza bağlı olarak hücre canlılığında azalma gözlemlenmiştir. Tek başına sitotoksik aktivitelerinin değerlendirilmelerinin yanında, biberiye ve siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktlarının farklı oranlarda karışımları hem HUVEC hem de T24 hücrelerine karşı 24., 48. ve 72. saat sonunda sitotoksik potansiyelleri incelenmiştir. Biberiye ve siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktlarının farklı kombinasyonları T24 hücrelerine karşı 72 saat sonunda hücre canlılığını %50'nin altına düşürmüştür. Kombinasyonlar arasında en etkili olanlar 150 µg/mL biberiye:200 µg/mL siyah üzüm çekirdeği ve 200 µg/mL biberiye:100 µg/mL siyah üzüm çekirdeği oranlarında hazırlananlar olmuştur. Bu kombinasyonlarda tüm saat aralıklarında %50'nin altında hücre canlılığı tespit edilmiştir. Buna karşı, hiçbir kombinasyonda HUVEC hücrelerine karşı neredeyse bir etki gözlenmemiştir (Şekil 5-6).



Şekil 5. Biberiye-siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktı karışımlarının HUVEC hücrelerinde 24, 48 ve 72 saat sonrası yüzde canlılık değerleri. (Hata çubukları standart sapmayı (SD) göstermektedir (n=3))



Şekil 6. Biberiye-siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktı karışımlarının T24 hücrelerinde 24, 48 ve 72 saat sonrası yüzde canlılık değerleri. (Hata çubukları standart sapmayı (SD) göstermektedir (n=3))

3.5. Ekstraktların Antibakteriyel Aktivitelerinin Tespit Edilmesi

Ekstraktların *Staphylococcus aureus* ve *Escherichia coli* bakterilerine karşı antibakteriyel aktiviteleri öncelikle disk difüzyon yöntemine göre belirlenmiştir. Sonuçlar mm cinsinden hesaplanmıştır. Ekstraktların farklı kombinasyon oranlarıyla elde edilen karışımlarına da aynı şekilde disk difüzyon yöntemi uygulanmıştır. Tüm sonuçlar Çizelge 5'te verilmiştir. Antibakteriyel aktivite sonuçlarına göre biberiye:siyah üzüm çekirdeği 1:1 oranındaki kombinasyonda inhibisyon zon sonucu her iki bakteri için de ekstraktların kendilerine göre daha yüksek olarak ölçülmüştür. *S. aureus* bakterisinde biberiye ve siyah üzüm çekirdeğinin kendisi 6,37 ± 0,22 mm ve 6,72 ± 0,18 mm iken *E. coli* bakterisinde 6,42 ± 0,17 mm ve 6,68 ± 0,12 mm olarak elde edilmiştir. 1:1 kombinasyonda ise bu bakterilere karşı sırasıyla 7,59 ± 0,10 mm ve 6,71 ± 0,22 mm zon çapları ölçülmüştür. Biberiye ve siyah üzüm çekirdeğinin 1:3 oranındaki kombinasyon sonucu da 7,22 ± 0,28 mm ve 7,46 ± 0,25 mm olarak her iki ekstraktın kendisine göre daha yüksek değerler elde edilmiştir. Biberiye ve siyah üzüm çekirdeğinin 3:1 oranındaki değerleri de 7,87 ± 0,21 mm ve 6,91 ± 0,23 mm olarak kaydedilmiştir. Buna göre iki ekstraktın bu oranlarda bir arada kullanılması antibakteriyel aktivitede sinerjik etki oluşturmuştur. Negatif kontrol olarak uygulanan %70 etanol solventinde ise herhangi bir aktivite saptanmamıştır.

Çizelge 5. %70 etanolik ekstraktların ve kombinasyonlarının disk difüzyon yöntemine göre antibakteriyel aktivite sonuçları

İnhibisyon Zonları (mm)	*Staphylococcus aureus*	*Escherichia coli*
Biberiye	6,37 ± 0,22	6,42 ± 0,17
Siyah üzüm çekirdeği	6,72 ± 0,18	6,68 ± 0,12
Biberiye:Siyah üzüm çekirdeği (1:1)	7,59 ± 0,10	6,71 ± 0,22
Biberiye:Siyah üzüm çekirdeği (2:1)	6,36 ± 0,21	6,83 ± 0,20
Biberiye:Siyah üzüm çekirdeği (1:2)	7,39 ± 0,12	6,39 ± 0,14
Biberiye:Siyah üzüm çekirdeği (1:3)	7,22 ± 0,28	7,46 ± 0,25
Biberiye:Siyah üzüm çekirdeği (3:1)	7,87 ± 0,21	6,91 ± 0,23

Ekstraktların *S. aureus* ve *E. coli* bakterilerine karşı antibakteriyel aktivitelerinde uygulanan diğer yöntem ise minimum inhibisyon konsantrasyonu belirleme yöntemidir. Sonuçlar mg/mL cinsinden hesaplanmıştır. Ekstraktların kendilerinin dışında farklı kombinasyon oranlarıyla elde edilen karışımlara da aynı şekilde MIC yöntemi uygulanmıştır. Tüm sonuçlar Çizelge 6'da verilmiştir. Antibakteriyel analizlerde MIC sonuçları da disk difüzyon sonuçlarıyla paralellik göstermiştir. Biberiye ve siyah üzüm çekirdeğinin kombinasyonlarının sinerjik etki yarattığı söylenebilir. Negatif kontrol olarak uygulanan %70 etanol solventinde ise herhangi bir aktivite saptanmamıştır. Sonuçların var/yok şeklinde nitel olarak değerlendirilmesi ve tüm deney tekrarlarında aynı kuyucuklarda aynı bulgunun gözlenmesi nedeniyle, bu sonuçlar için standart sapma değerleri hesaplanmamıştır.

Çizelge 6. %70 etanolik ekstraktların ve kombinasyonlarının MIC yöntemine göre antibakteriyel aktivite sonuçları

MIC (mg/mL)	*Staphylococcus aureus*	*Escherichia coli*
Biberiye	6,25	6,25
Siyah üzüm çekirdeği	6,25	6,25
Biberiye:Siyah üzüm çekirdeği (1:1)	3,125	3,125
Biberiye:Siyah üzüm çekirdeği (2:1)	6,25	6,25
Biberiye:Siyah üzüm çekirdeği (1:2)	6,25	6,25
Biberiye:Siyah üzüm çekirdeği (1:3)	6,25	3,125
Biberiye:Siyah üzüm çekirdeği (3:1)	3,125	6,25

4. TARTIŞMA

Bu çalışmada biberiye ve siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktlarının toplam fenolik ve toplam flavonoid madde miktarları, antioksidan aktiviteleri, sitotoksik ve antibakteriyel özellikleri incelenmiştir. Folin-Ciocalteu yöntemi kullanılarak ekstraktların toplam fenolik madde miktarı, alüminyum klorür kolorimetrik

testi kullanılarak ekstraktların toplam flavonoid madde miktarı, DPPH yöntemi kullanılarak ekstraktların antioksidan aktiviteleri tayin edilmiştir. MTT yöntemi kullanılarak biberiye ve siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktlarının T24 insan mesane kanseri ve HUVEC insan göbek kordonu ven endotel hücreleri üzerindeki sitotoksik aktivitelerinin tayini yapılmıştır. Ayrıca disk difüzyon yöntemi ve minimum inhibisyon konsantrasyonu (MIC) yöntemiyle ekstraktların *Staphylococcus aureus* (Gram-pozitif) ve *Escherichia coli* (Gram-negatif) bakterileri üzerindeki antibakteriyel aktiviteleri test edilmiştir. Biberiye ve siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktlarının birlikte kullanımının sitotoksik ve antibakteriyel aktiviteye etkisi belirlenmiştir. Fenolik ve flavonoid bileşikler bakımından zenginlik, bitki ekstraktlarının biyolojik aktivitelerinin temel belirleyicisidir. Çalışmamızda en yüksek antioksidan aktivite değeri siyah üzüm çekirdeği ekstraktında %93,90 olarak, biberiye ekstraktında ise %92,84 olarak hesaplanmıştır. Toplam fenolik madde miktarı biberiye etanolik ekstraktında 5,69 ± 0,03 mg GAE/mL, siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktında 5,25 ± 0,02 mg GAE/mL olarak bulunmuştur. Toplam flavonoid madde miktarı ise biberiye etanolik ekstraktında 3,09 ± 0,12 mg CE/mL, siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktında 1,71 ± 0,06 mg CE/mL olarak elde edilmiştir. Üzüm çekirdeğinin etanol:su (70:30) çözeltisiyle ekstraksiyonu yapılan bir çalışmada sırasıyla 256,15 ± 17,40 mg GAE/gram kuru ağırlık ve 14,08 ± 0,64 mg CE/gram kuru ağırlık olarak toplam fenolik ve flavonoid madde miktarları elde edilmiştir. Üzüm çekirdeği ekstraktında gerçekleştirilen LC/MS analizi prosiyanidin zenginliğini ortaya koymuştur [33]. Biberiye ekstraktlarının sitotoksik etkileri de literatürde geniş ölçüde rapor edilmiştir. Özellikle karnosol ve karnosik asit gibi diterpenlerin antikanser aktivitesi öne çıkmaktadır. Cattaneo ve arkadaşları (2015) biberiye ekstraktının A375 melanoma kanseri hücreleri üzerindeki sitotoksik aktivitesini çalışmışlardır [7]. Brindisi ve arkadaşları (2020)'nın iki farklı meme kanseri hücre hattı, MCF-7 (ERα +) ve MDA-MB-231 (triple negatif), kullandığı çalışmada 10, 20, 40 ve 60 µg/mL konsantrasyonlarıyla MTT testi yapılmıştır. Tüm ekstraktların, her iki meme kanseri hücresinde, IC_{50} değerini 6,83 µg/mL ile 15,67 µg/mL arasında değiştirdiği ve konsantrasyona bağlı olarak hücre proliferasyonunu inhibe ettiği saptanmıştır [10]. Yesil-Celiktas ve arkadaşları (2010), biberiye ekstraktlarının yanı sıra ekstraktın başlıca fenolik bileşenleri olan karnosik asit ve rosmarinik asidin farklı insan kanser hücre hatlarının proliferasyonu üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışmada, biberiye ekstraktlarının ve bu bileşiklerin çeşitli kanser hücrelerinde büyümeyi inhibe ettiği ve bu etkinin kullanılan ekstraktın bileşimine ve hücre hattına bağlı olarak değiştiği bildirilmiştir [34]. Kakouri ve arkadaşları (2022) ise glioblastoma (A172) ve rabdomyosarkom (TE671) hücrelerinde zaman ve doza bağlı sitotoksisite oluşturduğunu göstermiştir. En düşük IC_{50} değerleri 72 saat sonra TE671 hücre hattı için 0,25 ± 1,09 mg/mL ve A172 hücre hattı için ise 0,58 ± 0,98 mg/mL olarak elde edilmiştir [8].

Siyah üzüm çekirdeği ekstraktlarının biyolojik aktivitesi, içerdiği polifenoller ve resveratrol gibi bileşiklerden kaynaklanmaktadır. Engelbrecht ve arkadaşları (2007), üzüm çekirdeği proantosiyanidinlerinin kolon kanseri hücrelerinde apoptozu indüklediğini rapor etmiştir [22]. Grace Nirmala ve arkadaşları (2018), üzüm kabuğu ve çekirdek ekstraktlarının epidermoid karsinom hücrelerinde apoptotik etki gösterdiğini ortaya koymuştur [24]. Bir çalışmada *Vitis vinifera* L. atıklarının, MCF-7 göğüs adenokarsinomu ve HeLa servikal karsinomu hücrelerini öldürebilecek sitotoksik özelliklere sahip olduğu keşfedilmiştir [35]. Başka bir çalışmada ise Caco-2 kolon kanseri hücrelerinde ve normal kolon epitel hücrelerinde (NCM 460 hücreleri) hücre canlılığı araştırılmıştır. Kırmızı üzüm çekirdeği ekstraktının 10-100 µg/mL arasındaki konsantrasyonları kullanılmıştır. Kontrol grubuyla kıyaslandığında 10, 50 ve 100 µg/mL konsantrasyonlarının, kanser hücre hattında hücre canlılığını önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir. Farklı bir çalışmada üzüm posası ve çekirdeği ekstraktlarının fibroblastlar ile Caco-2, HT-29 kolon kanseri hücreleri üzerindeki antitümör etkileri incelenmiştir. Aynı kaynaklardan saflaştırılmış ekstraktlar hazırlanmış ve üzüm çekirdeğinden elde edilen saflaştırılmış ekstraktın en yüksek etkiyi Caco-2 hücreleri üzerinde gösterdiği bildirilmiştir. HT-29 hücrelerinin, bu saflaştırılmış ekstraktlara karşı daha duyarlı olduğu tespit edilmiştir [36]. Üzüm çekirdeği sulu ekstresi 100 µg/mL'de, muamelenin ilk 24 saatinde 3T6 hücreleri üzerinde %3,88 oranında toksisiteye neden olurken, 48 saate kadar uzatılmış etkisi bu toksisiteyi %0,5'in altına düşürmüştür. 24 ve 48 saatlik muamelede HeLa ve BCPAP hücreleri için sırasıyla %18,39 ila %23,79 ve %10,30 ila %20,37 arasında bir hücre ölümü elde edilmiştir. Sonuç olarak, bu ekstraktın sağlıklı hücreler üzerindeki yararlı etkisiyle birlikte anti-proliferatif bir ajan olarak daha düşük konsantrasyonlarda kullanılması önerilmiştir [33].

Bu çalışmada ise biberiye ve siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktlarının kanser ve normal hücre hatları üzerindeki sitotoksik etkileri MTT testi sonucunda elde edilen IC_{50} değerleri üzerinden değerlendirilmiştir. Biberiye ve siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktları HUVEC hücrelerine göre T24 hücrelerinde daha fazla sitotoksik aktivite sergilemiştir. Siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktında en etkili sonuç T24

hücresine karşı 72 saat sonunda 827,30 ± 48,85 µg/mL değeri ile bulunmuştur. Biberiye etanolik ekstraktında da benzer bir şekilde T24 hücresine karşı 72 saat sonunda IC_{50} değeri 290,00 ± 17,49 µg/mL olarak hesaplanmıştır. Elde edilen tüm sonuçlar, zamanın artmasıyla birlikte ekstraktların hücre proliferasyonunu baskılayıcı etkilerinin belirgin şekilde arttığını göstermiştir. Biberiye ekstraktı, T24 mesane kanseri hücrelerinde zamanla azalan IC_{50} değerleriyle güçlü bir antiproliferatif etki ortaya koymuştur. Aynı örnek HUVEC normal endotel hücrelerinde daha yüksek IC_{50} değerleri sunarak kanser hücresine karşı seçici toksisite profili sergilemiştir. Bu yönü ile kanser hücrelerini hedefleyen çalışmalarda kullanılabilecek doğal bir ajan olma potansiyeli taşıdığı söylenebilir. Siyah üzüm çekirdeği ekstraktının her iki hücre hattında da başlangıçta çok yüksek IC_{50} değerleri verdiği gözlenmiş, ancak ilerleyen zaman noktalarında etkinliğinde kademeli bir artış saptanmıştır. Buna rağmen elde edilen değerler, bu ekstraktın doğrudan sitotoksik etki potansiyelinin daha düşük olduğunu ve antioksidan özelliklerinin baskın olabileceğini düşündürmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, ekstraktların tamamı zaman bağımlı sitotoksik aktivite sergilemiştir. Ancak etkinlik ve hücre tipi seçiciliği dikkat çekmektedir. Biberiye kanser hücrelerinde daha belirgin antiproliferatif etki göstererek gelecekteki preklinik çalışmalar için güçlü bir aday olma potansiyelindedir. Biberiye ve siyah üzüm çekirdeği ekstraktlarının birlikte uygulanması ile elde edilen sitotoksisite sonuçları incelendiğinde, kombinasyon uygulamasının HUVEC hücre canlılığı üzerinde zaman ve konsantrasyon bağımlı bir azalma oluşturduğu belirlenmiştir. Genel olarak 24 saatlik uygulamalarda canlılık oranları %80'in üzerinde seyrederken, 48 ve özellikle 72 saatlik inkübasyon sürelerinde belirgin bir düşüş görülmüştür. Bu durum, kombinasyonun hücre proliferasyonunu geciktirici ve zamana bağlı bir sitotoksik etki geliştirdiğini göstermektedir. Konsantrasyonlar karşılaştırıldığında, özellikle 100 µg/mL biberiye:100 µg/mL siyah üzüm çekirdeği ve 150 µg/mL biberiye:200 µg/mL siyah üzüm çekirdeği kombinasyonlarının 72 saat sonunda hücre canlılığını yaklaşık %60 seviyelerine düşürdüğü görülmektedir. Bu düşüş, kombinasyonun belirli oranlarda sinerjik toksik etki oluşturabileceğine işaret etmektedir. Diğer kombinasyonlarda ise canlılık oranlarının genellikle %70-85 arasında kaldığı ve etkinliğin daha sınırlı olduğu görülmüştür. Ancak yüksek konsantrasyonlarda canlılık oranlarının tamamen düşmemesi, kombinasyonun daha çok hücre büyümesini baskılayıcı etki gösterdiğini ortaya koymaktadır. T24 mesane kanseri hücre hattında gerçekleştirilen MTT analizleri, biberiye ve siyah üzüm çekirdeği ekstraktlarının kombinasyon halinde uygulanmasının, doz ve zamana bağlı olarak hücre canlılığını belirgin şekilde azalttığını göstermiştir. Özellikle 48 ve 72 saatlik inkübasyon sürelerinde gözlenen düşüşler, kombinasyonun sitotoksik etkinliğinin zaman bağımlı olduğunu ortaya koymaktadır. Yüksek konsantrasyonlarda (250 µg/mL biberiye:500 µg/mL siyah üzüm çekirdeği ve 250 µg/mL biberiye:250 µg/mL siyah üzüm çekirdeği) 24 saatlik sürede canlılık %80 civarında seyrederken, 72 saatte ise %10–20'ye kadar düşmektedir. Bu sonuç, kombinasyonun güçlü bir antiproliferatif etki oluşturduğunu düşündürmektedir. Daha düşük konsantrasyonlarda da (örneğin 150 µg/mL biberiye:100 µg/mL siyah üzüm çekirdeği ve 200 µg/mL biberiye:100 µg/mL siyah üzüm çekirdeği), 72. saat sonunda canlılık oranlarının %5–10 seviyelerine kadar gerilediği görülmüştür. Bu durum, kombinasyonun düşük dozlarda bile kanser hücrelerine karşı etkili olabileceğini göstermektedir. Ayrıca, bireysel ekstrakt uygulamalarında gözlemlenen sınırlı sitotoksik etkiye kıyasla kombinasyonun hücre canlılığını daha belirgin şekilde düşürmesi, biberiye ve siyah üzüm çekirdeği ekstraktları arasında potansiyel sinerjik bir etkileşim olabileceğine işaret etmektedir.

Biberiye ekstraktlarının antibakteriyel etkisi rosmaridifenol, karnosol, epirosmanol, rosmanol, izorosmanol, karnosik asit ve rosmarinik asit gibi fenolik bileşiklerden kaynaklanmaktadır [37]. Literatürde biberiye esansiyel yağının *S. aureus* (MIC: 3,9 µL/mL) ve *P. aeruginosa* (MIC: 7,8 µL/mL) gibi klinik öneme sahip bakterilere karşı güçlü inhibisyonu rapor edilmiştir [38]. Yapılan çalışmalarda biberiyenin *Candida albicans, S. aureus, Enterococcus faecalis, Streptococcus mutans* ve *Pseudomonas aeruginosa* mikroorganizmalarına ve biyofilm oluşumuna karşı antimikrobiyal aktivitesi araştırılmıştır. Biberiye en güçlü aktiviteyi sırasıyla 0,78 mg/mL ve 3,13 mg/mL MIC ve minimum mikrobisidal konsantrasyon (MMC) ile *C. albicans*'a karşı göstermiştir. Ayrıca *P. aeruginosa*'da 6,25 mg/mL'lik değerleri elde edilmiştir. *S. aureus, S. mutans* ve *E. faecalis* büyümeleri >25 mg/mL'de engellenmiş ancak mikrobisidal bir konsantrasyona ulaşılamamıştır. Çalışma ayrıca biberiyenin *C. albicans, P. aeruginosa, S. aureus* ve *S. mutans*'ın biyofilm oluşumuna karşı başarılı olduğunu da göstermiştir. Poli-mikrobiyal filmlerde *C. albicans*, diğer dört bakteri ile 48 saat boyunca kültürlenmiş ve 5 dakika boyunca biberiye ile işlenmiştir. Biberiye ile mikrobiyal büyümedeki en önemli azalma *C. albicans* ile *E. faecalis* ve *C. albicans* ile *P. aeruginosa*'da meydana gelmiştir [12]. Diğer bir çalışmada biberiyenin etanol ekstraktının MIC değerleri 0,39-3,13 mg/mL aralığında tespit edilmiştir. MBC (minimum bakterisidal konsantrasyon) değerleri ise MIC'lere eşit veya iki katı değerinde elde edilmiştir [39]. Farklı çalışmalarda biberiyenin metanol ve etanol ekstraktlarının etkinliği *E. coli, S. aureus, P. aeruginosa, B. cereus (Bacillus cereus), E. faecalis, C.*

albicans, V. fluvialis (Vibrio fluvialis) ve *V. damsela (Vibrio damsela)* dahil sekiz farklı türe karşı test edilmiştir. Karnosik asit varlığından dolayı metanol ekstraktı, bakteriyel büyümeye karşı daha yüksek oranda inhibisyon etkisi sağlamıştır [40-42]. Biberiye ekstraktının hem Gram-pozitif hem Gram-negatif bakterilere karşı yüksek inhibisyon oluşturması bu verileri destekler niteliktedir. Üzüm ekstraktları ile yapılan bir araştırmada *S. aureus, Pseudomonas aeruginosa* ve *Salmonella typhimurium*'a karşı güçlü antibakteriyel özellikler tespit edilmiştir [23]. Diğer bir çalışmada siyah üzüm çekirdeği ekstraktının antibakteriyel etkisi MIC testiyle farklı mikroorganizmalara karşı denenmiştir. *Klebsiella pneuminae*'ye karşı hiçbir etki tespit edilememiş, fakat patojenik türler *P. aeruginosa, E. coli, Bacillus* sp.*, S. aureus, E. faecalis* ve *C. albicans*'a karşı değişken inhibitör etkiler gözlemlenmiştir. Ayrıca bu ekstraktın Gram-pozitif bakterilere karşı daha etkili olduğu ve patojenik *C. albicans*'a karşı da etkili olduğu saptanmıştır [19]. Başka bir çalışmada, siyah üzüm çekirdeğinin metanolik ekstraktının *S. aureus* ve *S. haemolyticus*'a karşı antibiyofilm aktivitesi test edilmiş ve biyofilm oluşumunun metanolik ekstraktlar tarafından engellendiği gösterilmiştir [43].

Bu çalışmada biberiye ve siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktları hem Gram-pozitif bakteri olan *S. aureus* hem de Gram-negatif bakteri olan *E. coli* üzerinde belirli düzeyde antibakteriyel aktivite göstermiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, inhibisyon zonlarının oldukça sınırlı olduğu görülmekle birlikte, bazı kombinasyonlar bireysel uygulamalara göre daha yüksek etki yaratmıştır. *S. aureus* üzerinde en yüksek inhibisyonu, biberiye:siyah üzüm çekirdeği 3:1 kombinasyonu (7,87 ± 0,21 mm) göstermiştir. Bunu sırasıyla 1:1 (7,59 ± 0,10 mm) ve 1:2 (7,39 ± 0,12 mm) kombinasyonları takip etmektedir. Bu durum, biberiye ekstraktının antibakteriyel etkisinin siyah üzüm çekirdeği ile birlikte uygulanmasıyla sinerjik olarak artabileceğini göstermektedir. Tekli uygulamalara bakıldığında siyah üzüm çekirdeği ekstraktının (6,72 ± 0,18 mm), biberiye ekstraktına (6,37 ± 0,22 mm) göre daha yüksek antibakteriyel etki gösterdiği tespit edilmiştir. *E. coli*'ye karşı ise genel olarak daha düşük inhibisyon zonları kaydedilmiştir. Bunun Gram-negatif bakterilerin sahip olduğu dış membran yapısından kaynaklanan doğal direnç ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bu bakımdan en güçlü etkinin biberiye:siyah üzüm çekirdeği 1:3 kombinasyonu (7,46 ± 0,25 mm) ile ortaya çıkması, yüksek üzüm çekirdeği ekstrakt oranının özellikle Gram-negatif bakterilere karşı daha avantajlı olduğunu işaret etmektedir. Bu bulgular, kombinasyonların etkisinin kullanılan ekstrakt oranına bağlı olarak değiştiğini ve her iki bakteri türü için ideal formülasyonun farklılık gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak; biberiye ve siyah üzüm çekirdeği ekstraktlarının özellikle Gram-pozitif bakterilere karşı daha güçlü bir potansiyele sahip olduğu belirlenmiştir. Buna göre bazı kombinasyonların sinerjik etki oluşturduğu söylenebilir.

Ayrıca çalışmada biberiye, siyah üzüm çekirdeği ekstraktları tekil ve kombinasyon uygulamalarının *S. aureus* ve *E.coli* üzerindeki antibakteriyel etkileri MIC yöntemi ile de değerlendirilmiştir. Genel olarak hem bireysel bitki ekstraktlarının hem de kombinasyonlarının bakteriyel büyüme inhibisyonunda farklı düzeylerde etkinlik gösterdiği belirlenmiştir. Biberiye ve siyah üzüm çekirdeği ekstraktlarının tekli uygulamalarında, her iki bakteriye karşı MIC değeri 6,25 mg/mL olarak belirlenmiştir. Bu değerler, ekstraktların hem Gram-pozitif hem de Gram-negatif bakteriler üzerinde benzer düzeyde etki gösterdiğine işaret etmektedir. Bununla birlikte iki ekstraktın 1:1 oranındaki kombinasyonu ile MIC değerinin *S. aureus* ve *E. coli* için 3,125 mg/mL'ye düştüğü görülmüştür. Bu durum, iki ekstraktın eşit oranda birlikte kullanımının belirgin bir sinerjik etki sağladığını ortaya koymaktadır. Biberiye oranının baskın olduğu 3:1 kombinasyonunda, *S. aureus* üzerinde 3,125 mg/mL MIC değeri gözlenmiş olup, Gram-pozitif bakteriye karşı sinerjik etkinin korunduğu düşünülmektedir. Siyah üzüm çekirdeği oranının baskın olduğu 1:3 kombinasyonunda ise *E. coli* üzerinde MIC değerinin 3,125 mg/mL'ye düştüğü tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, Gram-pozitif ve Gram-negatif bakterilerde sinerji oluşumunun farklı ekstrakt oranlarına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Diğer kombinasyon oranlarında ise tekli uygulamalardaki etkinliğin korunduğu fakat ek bir sinerjik artış gözlenmediği belirlenmiştir. Çalışmamızın özgün yönü, bu iki farklı ekstraktın hem bireysel hem de birlikte kullanımının biyolojik aktivitelerinin incelenmiş olmasıdır. Özellikle sinerjik etki potansiyeli, literatürde sınırlı sayıda çalışılmış bir konu olup bu araştırma bu açıdan yeni katkılar sunmaktadır. Kanser ve diğer kronik hastalıkların toplum sağlığı üzerindeki yükünün artması, hastalıkların önlenmesine yönelik doğal kaynakların araştırılmasına olan ilgiyi artırmaktadır. Bu kapsamda, temel besleyici özelliklerinin yanı sıra antioksidan ve antibakteriyel gibi biyolojik aktiviteler gösterebilen doğal bileşenler, fonksiyonel gıda ve gıda takviyesi geliştirilmesinde önemli bir potansiyele sahiptir [44,45]. Fonksiyonel gıdaların tüketiciye besin sağlamanın ötesinde ek sağlık yararları sunabilmesi, bu ürünlere yönelik bilimsel araştırmaların daha fazla önem kazanmasına ve tüketici ilgisinin artmasına katkıda bulunacaktır.

5. SONUÇLAR

Son zamanlarda tüketicilerin doğal ve ekolojik ürünleri tercih etmesi nedeniyle tıbbi ve aromatik bitkilere ve bu bitkilerden elde edilen ekstraktlara olan ilgi artmaktadır. Biberiye ve siyah üzüm çekirdeği, içerikleri nedeniyle farklı çalışmalara konu olmaktadır. Bu çalışmada biberiye ve siyah üzüm çekirdeğinin etanolik ekstraktlarının toplam fenolik madde miktarı ve toplam flavonoid madde miktarı tespit edilmiş; biyolojik aktivitelerinden antioksidan, sitotoksik ve antibakteriyel aktiviteleri belirlenmiştir. Ayrıca sitotoksik ve antibakteriyel aktivite testlerinde bitkilerin etanolik ekstraktlarının hem bireysel olarak hem de kombinasyon şeklinde gösterdikleri aktiviteler test edilmiştir. Mevcut literatür bilgimiz doğrultusunda, biberiye ve siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktlarının T24 insan mesane kanseri hücre hattı ve HUVEC insan göbek kordonu ven endotel hücre hattı üzerindeki sitotoksik aktivitelerini değerlendiren herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Toplam fenolik madde miktarı 5,69 ± 0,03 mg GAE/mL değeriyle biberiye etanolik ekstraktında; toplam flavonoid madde miktarı 3,09 ± 0,12 mg CE/mL değeriyle biberiye etanolik ekstraktında; antioksidan aktivite ise %93,90 ± 2,32 inhibisyon değeriyle siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktında, en yüksek miktarlar olarak tespit edilmiştir. Biberiye ve siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktlarının farklı oranlarda karıştırılıp uygulanması sonucunda antibakteriyel aktivitede artış gözlenmiştir. Bu iki ekstraktın *Staphylococcus aureus*'a karşı en yüksek antibakteriyel aktivite biberiye:siyah üzüm çekirdeği (3:1) kombinasyonunda, *Escherichia coli*'ye karşı en yüksek antibakteriyel aktivite ise biberiye:siyah üzüm çekirdeği (1:3) kombinasyonunda elde edilmiştir. Sitotoksik aktivite sonuçlarına göre biberiye ve siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktlarının HUVEC insan göbek kordonu ven endotelyal hücre hattı ve T24 insan mesane kanseri hücre hattında doza ve zamana bağlı olarak hücre canlılığını azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, tekli ekstrakt uygulamalarında gözlemlenen sınırlı sitotoksik etkiye kıyasla kombinasyonun hücre canlılığını daha belirgin şekilde düşürmesi, biberiye ve siyah üzüm çekirdeği ekstraktları arasında potansiyel sinerjik bir etkileşim olabileceğine işaret etmektedir. Sonuç olarak bazı bitkisel bileşenlerin birlikte kullanımı, tek başına kullanımına kıyasla daha yüksek biyolojik aktivite gösterebilmektedir. Özellikle biberiye ve siyah üzüm çekirdeğinin birlikte kullanıldığında sinerjik etki oluşturabildiği gözlenmiştir. İlerleyen çalışmalarda biberiye ve siyah üzüm çekirdeği etanolik ekstraktlarının HPLC, LC-MS/MS gibi yöntemlerle bileşen analizleri yapılarak bu bileşenlerin ayrı ayrı ve kombinasyon etkilerine bakılabilir. Farklı hücre hatları ve farklı bakteri türleri kullanılarak biyolojik etkinlik taraması yapılabilir. Ayrıca sitotoksik aktivite sonrası apoptoz tayini yapılarak hücre ölüm mekanizmaları araştırılabilir.

6. TEŞEKKÜR

Bu çalışma Manisa Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir (Proje Numarası: 2024-079).

7. KAYNAKLAR

1. Caili, F.U., Huan, S. & Quanhong, L.I. (2006). A review on pharmacological activities and utilization technologies of pumpkin. *Plant Foods for Human Nutrition*, *61*, 70-77.
2. Kelleci, K., Ihlamur, M., Özkan, M. ve Abamor, E.Ş. (2024). *Momordica charantina* ekstraktının amfotericin b ve miltefosin ilaç kombinasyonları ile leishmania parazitleri üzerindeki sitotoksik etkilerinin incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *39*(1), 1-7.
3. Malayoğlu, H.B. (2010). Biberiyenin (*Rosmarinus officinalis* L.) antioksidan etkisi. *Hayvansal Üretim*, *51*(2), 59-67.
4. Shahidi, F. & Ambigaipalan, P. (2015). Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: antioxidant activity and health effects—A Review. *Journal of Functional Foods*, *18*, 820-897.
5. Beşen, B.S., Karahan, L.E., Parlakyiğit, P., Kırılmış, C. ve Erdoğan, S. (2022). Bazı bitki kaynaklarının farklı çözgenlerde hazırlanan ekstrelerinin antimikrobiyal aktivitesinin araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *37*(2), 543-554.
6. De Macedo, L.M., Santos, É.M.D., Militão, L., Tundisi, L.L., Ataide, J.A., Souto, E.B. & Mazzola, P.G. (2020). Rosemary (*Rosmarinus officinalis* L., syn *Salvia rosmarinus* Spenn.) and its topical applications: A Review. *Plants*, *9*(5), 651.
7. Cattaneo, L., Cicconi, R., Mignogna, G., Giorgi, A., Mattei, M., Graziani, G., Ferracane, R., Grosso, A., Aducci, P., Schininà, M.E. & Marra, M. (2015). Anti- proliferative effect of *Rosmarinus officinalis* L. extract on human melanoma A375 cells. *PloS One*, *10*(7), e0132439.

8. Kakouri, E., Nikola, O., Kanakis, C., Hatziagapiou, K., Lambrou, G.I., Trigas, P., Kanaka-Gantenbein C. & Tarantilis, P. A. (2022). Cytotoxic effect of *Rosmarinus officinalis* extract on glioblastoma and rhabdomyosarcoma cell lines. *Molecules*, *27*(19), 6348.

9. Aydın, E.A. (2014). Meme kanseri tespitinde mikrodalgaların önemi ve kanserli/sağlıklı meme dokularının yapay zeka algoritmaları ile tanımlanabilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *29*(2), 27-38.

10. Brindisi, M., Bouzidi, C., Frattaruolo, L., Loizzo, M.R., Tundis, R., Dugay, A., Deguin, B., Cappello, A.R. & Cappello, M.S. (2020). Chemical profile, antioxidant, anti-inflammatory, and anticancer effects of Italian *Salvia rosmarinus* Spenn. methanol leaves extracts. *Antioxidants*, *9*(9), 826.

11. Begum, A., Sandhya, S., Ali, S.S.A., Vinod, K.R., Reddy, S. & Banji, D. (2013). An in-depth review on the medicinal flora *Rosmarinus officinalis* (Lamiaceae). *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, *12*(1), 61-74.

12. Veenstra, J.P. & Johnson, J.J. (2021). Rosemary (*Salvia rosmarinus*): Healthpromoting benefits and food preservative properties. *International Journal of Nutrition*, *6*(4), 1.

13. Del Baño, M.J., Lorente, J., Castillo, J., Benavente-García, O., Marín, M.P., Del Río, J.A., Ortuño, A. & Ibarra, I. (2004). Flavonoid distribution during the development of leaves, flowers, stems, and roots of *Rosmarinus officinalis*. Postulation of a biosynthetic pathway. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 52*(16), 4987-4992.

14. Pizani, R.S., Viganó, J., De Souza Mesquita, L.M., Contieri, L.S., Sanches, V.L., Chaves, J.O., Souza, M.C., Da Silva, L.C. & Rostagno, M.A. (2022). Beyond aroma: A review on advanced extraction processes from rosemary (*Rosmarinus officinalis*) and sage (*Salvia officinalis*) to produce phenolic acids and diterpenes. *Trends in Food Science & Technology*, *127*, 245-262.

15. Reuter, J., Jocher, A., Hornstein, S., Mönting, J. & Schempp, C. (2007). Sage extract rich in phenolic diterpenes inhibits ultraviolet-induced erythema *in vivo*. *Planta Medica*, *73*(11), 1190-1191.

16. Moreno, S., Scheyer, T., Romano, C.S. & Vojnov, A.A. (2006). Antioxidant and antimicrobial activities of rosemary extracts linked to their polyphenol composition. *Free radical research*, *40*(2), 223-231.

17. Ghasemzadeh Rahbardar, M. & Hosseinzadeh, H. (2025). Toxicity and safety of rosemary (*Rosmarinus officinalis*): a comprehensive review. *Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology*, *398*(1), 9-23.

18. Niknami, E., Sajjadi, S., Talebi, A. & Minaiyan, M. (2020). Protective effect *of Vitis vinifera* (black grape) seed extract and oil on acetic acid-induced colitis in rats. *DOAJ (DOAJ: Directory of Open Access Journals)*, *11*, 102.

19. Al-Taie, K.L.S. (2014). Antimicrobial effect of black grape seed extract. *Iraqi Journal of Science*, *55*(2A), 382-385.

20. Myles, S., Boyko, A.R., Owens, C.L., Brown, P.J., Grassi, F., Aradhya, M.K., Prins, B., Reynolds, A., Chia, J., Ware, D., Bustamante, C.D. & Buckler, E.S. (2011). Genetic structure and domestication history of the grape. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *108*(9), 3530-3535.

21. Jo, J.Y., De Mejia, E.G. & Lila, M.A. (2006). Cytotoxicity of bioactive polymeric fractions from grape cell culture on human hepatocellular carcinoma, murine leukemia and non-cancerous PK15 kidney cells. *Food and Chemical Toxicology*, *44*(10), 1758-1767.

22. Engelbrecht, A., Mattheyse, M., Ellis, B., Loos, B., Thomas, M., Smith, R., Peters, S., Smith, C. & Myburgh, K. (2007). Proanthocyanidin from grape seeds inactivates the PI3- kinase/PKB pathway and induces apoptosis in a colon cancer cell line. *Cancer Letters*, *258*(1), 144-153.

23. Abdel-Hamid, N., Abdel-Khalek, H., Mattar, Z., Abou-Taleb, K. & Ramadan, E. (2017). Screening of some Egyptian plant extracts for biological activity against some pathogenic bacteria. *Arab Universities Journal of Agricultural Sciences*, *25*(2), 377-386.

24. Grace Nirmala, J., Evangeline Celsia, S., Swaminathan, A., Narendhirakannan, R.T. & Chatterjee, S. (2018). Cytotoxicity and apoptotic cell death induced by *Vitis vinifera* peel and seed extracts in A431 skin cancer cells. *Cytotechnology*, *70*, 537- 554.

25. Nassiri-Asl, M. & Hosseinzadeh, H. (2009). Review of the pharmacological effects of *Vitis vinifera* (Grape) and its bioactive compounds. *Phytotherapy Research: An International Journal Devoted to Pharmacological and Toxicological Evaluation of Natural Product Derivatives*, *23*(9), 1197-1204.

26. Albalawi, A., Alhasani, R.H.A., Biswas, L., Reilly, J. & Shu, X. (2017). Protective effect of carnosic acid against acrylamide-induced toxicity in RPE cells. *Food and Chemical Toxicology*, *108*, 543-553.

27. Seyrekoğlu, F. & Temiz, H. (2020). Effect of extraction conditions on the phenolic content and DPPH radical scavenging activity of *Hypericum perforatum* L. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, *8*(1), 226-229.

28. Eroglu, E. & Girgin, S.N. (2021). A unique phenolic extraction method from olive oil macerate of *Hypericum perforatum* using DMSO: Assessment of *in vitro* anticancer activity, LC-MS/MS profile, total phenolic content and antioxidant capacity. *South African Journal of Botany*, *139*, 6-11.
29. Molan, A.L. & Mahdy, A.S. (2014). Iraqi medicinal plants: Total flavonoid contents, free-radical scavenging and bacterial beta-glucuronidase inhibition activities. *IOSR Journal of Dental and Medical Sciences*, *13*(5), 72-7.
30. Lim, F.P.K., Bongosia, L.F.G., Yao, N.B.N. & Santiago, L.A. (2014). Cytotoxic activity of the phenolic extract of virgin coconut oil on human hepatocarcinoma cells (HepG2). *International Food Research Journal*, *21*(2), 729-733.
31. Maltaş, E., Uysal, A., Yıldız, S. & Durak, Y. (2010). Evaluation of antioxidant and antimicrobial activity of *Vitex agnus-castus* L. *Fresenius Environmental Bulletin*, *19*, 3094-9.
32. Abdel-Mohsen, A.M., Jancar, J., Massoud, D., Fohlerova, Z., Elhahdy, H., Soptz, Z. & Hebeish, A. (2016). Novel chitin/chitosan-glucan wound dressing: Isolation, characterization, antibacterial activity and wound healing properties, *International Journal of Pharmaceutics*, 510, 86-99.
33. Ghouila, Z., Laurent, S., Boutry, S., Vander Elst, L., Nateche, F., Muller, R.N. & Baaliouamer, A. (2017). Antioxidant, antibacterial and cell toxicity effects of polyphenols from *Ahmeur Bouamer* grape seed extracts. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, *9*(1), 392-420.
34. Yesil-Celiktas, O., Sevimli, C., Bedir, E. & Vardar-Sukan, F. (2010). Inhibitory effects of rosemary extracts, carnosic acid and rosmarinic acid on the growth of various human cancer cell lines. *Plant Foods for Human Nutrition*, *65*(2), 158-163.
35. Peixoto, C.M., Dias, M.I., Alves, M.J., Calhelha, R.C., Barros, L., Pinho, S.P. & Ferreira, I.C. (2018). Grape pomace as a source of phenolic compounds and diverse bioactive properties. *Food Chemistry*, *253*, 132-138.
36. Pérez-Ortiz, J.M., Alguacil, LF., Salas, E., Hermosín-Gutiérrez, I., Gómez-Alonso, S. & González-Martín, C. (2019). Antiproliferative and cytotoxic effects of grape pomace and grape seed extracts on colorectal cancer cell lines. *Food Science & Nutrition*, *7*(9), 2948-2957.
37. Nieto, G., Ros, G. & Castillo, J. (2018). Antioxidant and antimicrobial properties of rosemary (*Rosmarinus officinalis*, L.): A review. *Medicines*, *5*(3), 98.
38. Harfouch, R.M., Darwish, M., Al-Asadi, W., Mohammad, A.F., Gharib, N.M. & Haroun, M. (2019). Antibacterial activity of essential oils of *Rosmarinus officinalis*, *Salvia officinalis* and *Anthemis nobilis* widespread in the Syrian coast. *Research Journal of Pharmacy and Technology*, *12*(7), 3410.
39. Jarrar, N., Abu-Hijleh, A. & Adwan, K. (2010). Antibacterial activity of *Rosmarinus officinalis* L. alone and in combination with cefuroxime against methicillin– resistant *Staphylococcus aureus*. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, *3*(2), 121-123.
40. Al-Sereiti, M.R., Abu-Amer, K.M. & Sen, P. (1999). Pharmacology of rosemary (*Rosmarinus officinalis* Linn.) and its therapeutic potentials. *Indian Journal of Experimental Biology*, *37*(2), 124-130.
41. Bernardes, W.A., Lucarini, R., Tozatti, M.G., Souza, M.G., Andrade Silva, M.L., da Silva Filho, A.A., Gomes Martins, C.H., Miller Crotti, A.E., Pauletti, P.M., Groppo, M. & Cunha, W.R. (2010). Antimicrobial activity of *Rosmarinus officinalis* against oral pathogens: relevance of carnosic acid and carnosol. *Chemistry & Biodiversity*, *7*(7), 1835-1840.
42. Vázquez, N.M., Fiorilli, G., Guido, P.A.C. & Moreno, S. (2016). Carnosic acid acts synergistically with gentamicin in killing methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* clinical isolates. *Phytomedicine*, *23*(12), 1337-1343.
43. Al-Mousawi, A.H., Al-Kaabi, S.J., Albaghdadi, A.J., Almulla, A.F., Raheem, A. & Algon, A.A.A. (2020). Effect of black grape seed extract (*Vitis vinifera*) on biofilm formation of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* and *Staphylococcus haemolyticus*. *Current Microbiology*, *77*(2), 238-245.
44. Yılmaz, B. ve Gürsel, A. (2023). Cilt kanseri tanısında tıbbi görüntüleri kıldan temizlemek için kullanılan iki yeni filtre. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *38*(4), 1139-1149.
45. Özçelik, S. & Gör, R. (2024). The use of the Hıngedan (*Ferula pseudalliacea*) in the production of functional gluten-free biscuits. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *39*(1), 145-156.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

Poliklorlu Bifenillerin (PCB'lerin) Ortam Havasındaki Konsantrasyonları, Mekânsal Değişimleri ve Kaynakları

Mehmet Ferhat SARİ [1,a], **Fatma ESEN** [2,b]

[1]*İstanbul Arel Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Çevre Koruma Teknolojileri Bölümü, Su ve Atık Yönetimi Teknikerliği Programı, İstanbul, Türkiye*
[2]*Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0001-7114-7286; [b]**ORCID**: 0000-0002-1445-0868*

Makale Bilgileri

Geliş : 25.09.2025
Kabul : 07.10.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1790825

Sorumlu Yazar

Mehmet Fatih SARİ
mehmetferhatsari@arel.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Bursa
Kirletici kaynakları
Mekansal dağılım
Pasif hava örnekleyicileri
Zamansal dağılım

***Atıf şekli:** SARİ, M.F., ESEN, F., (2026). Poliklorlu Bifenillerin (PCB'lerin) Ortam Havasındaki Konsantrasyonları, Mekânsal Değişimleri ve Kaynakları. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 807-817.*

ÖZ

Bu çalışmanın amacı, Bursa Nilüfer Çayı havzasındaki farklı arazi kullanım özelliklerini temsil eden bölgelerde atmosferik poliklorlu bifenillerin (PCB'lerin) konsantrasyon seviyelerini belirlemek; mekânsal, zamansal değişimlerini ve olası kaynaklarını değerlendirmektir. Bu kapsamda, altı farklı örnekleme noktasında pasif hava örnekleyicileri kullanılarak bir yıl süreyle dış ortam havası örnekleri toplanmış ve noktalar arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Tespit edilen toplam 41 PCB ($\sum_{41}$PCB) konsantrasyonları 341,2–2025,9 pg/m^3 arasında değişmiş, ortalama $\sum_{41}$PCB konsantrasyonu ise 945,9 ± 491,6 pg/m^3 (ortalama ± SS) olarak belirlenmiştir. En düşük PCB konsantrasyonu arka plan (Keles) bölgesinde ölçülürken, en yüksek konsantrasyon sanayi ve tarımsal faaliyetlerin etkisindeki örnekleme noktasında (Karacabey) belirlenmiştir. PCB'lerin olası kaynaklarının ve atmosferik davranışlarının değerlendirilmesinde homolog grup dağılımları ile Clausius–Clapeyron yaklaşımından yararlanılmıştır. Mekânsal dağılımlar, endüstriyel ve tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu bölgelerde gözlenen yüksek PCB konsantrasyonlarında bu faaliyetlerin etkili olabileceğine işaret etmiştir. Mevsimsel değerlendirmelerde ise sıcak dönemlerde artan konsantrasyonların, kirlenmiş yüzeylerden sıcaklığa bağlı gerçekleşen yeniden buharlaşma süreçleriyle ilişkili olduğunu göstermektedir.

Concentrations, Spatial Variations, and Sources of Polychlorinated Biphenyls (Pcbs) in Ambient Air

Article Info

Received : 25.09.2025
Accepted : 07.10.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1790825

Corresponding Author

Mehmet Fatih SARİ
mehmetferhatsari@arel.edu.tr

Keywords

Bursa
Pollutant sources
Spatial distribution
Passive air samplers
Temporal distribution

***How to cite:** SARİ, M.F., ESEN, F., (2026). Concentrations, Spatial Variations, and Sources of Polychlorinated Biphenyls (Pcbs) in Ambient Air. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 807-817.*

ABSTRACT

The aim of this study is to determine the concentration levels of atmospheric polychlorinated biphenyls (PCBs) in regions representing different land-use characteristics within the Bursa Nilüfer River basin, Türkiye, and to evaluate their spatial and temporal variations as well as potential sources. Within this scope, ambient air samples were collected for one-year using passive air samplers at six different sampling sites, and the relationships among the sites were examined. The detected total concentrations of the 41 PCB congeners ($\sum_{41}$PCBs) ranged from 341.2 to 2025.9 pg/m^3, with an average $\sum_{41}$PCBs concentration determined as 945.9 ± 491.6 pg/m^3 (mean ± SD). The lowest PCB concentration was measured at the background site (Keles), whereas the highest concentration was observed at the sampling site influenced by industrial and agricultural activities (Karacabey). Homolog group distributions and the Clausius–Clapeyron approach were used to assess the potential sources and atmospheric behavior of PCBs. The spatial distribution indicated that industrial and agricultural activities may have contributed to the elevated PCB concentrations observed in areas where these activities were more intensive. Seasonal evaluations demonstratethat increased concentrations during warm periods are associated with temperature-dependent re-volatilization processes from contaminated surfaces.

1. GİRİŞ

Kimyasal formülü $C_{12}H_nCl(10-n)$ $(9\geq n\geq 0)$ olan poliklorlu bifeniller (PCB'ler), benzen halkasındaki hidrojen atomlarının klor ile yer değiştirmesi sonucu oluşan bileşiklerdir [1]. PCB'ler, düşük elektrik iletkenliği ve alev geciktirici özellikleri sebebi ile 1930'lardan itibaren elektrikli cihazlarda, boyalarda ve plastikleştiricilerde yaygın olarak dielektrik ve soğutucu sıvı olarak kullanılmıştır [2]. Yapılan birçok çalışma, PCB'lerin çevre ve insan sağlığı üzerinde istenmeyen etkileri olan yüksek derecede toksik bileşikler olduğunu göstermiş ve olumsuz etkileri nedeniyle 1970'lerin sonlarında küresel olarak yasaklanmıştır [3]. PCB'lerin içerdiği klor sayısına bağlı olarak fiziksel ve kimyasal özellikleri değişmektedir. PCB'lerin çevrede bulundukları ortamlar da bu fizikokimyasal özelliklerine göre değişiklik göstermektedir [4].

PCB'lerin doğal kaynakları bilinmemekle birlikte, hava ve su gibi değişik ortamlardaki dolanımlarıyla küresel ölçekte sürekli döngü halindedirler. PCB içeren ürünlerin kazara sızması, dökülmesi veya yakılması atmosferdeki PCB konsantrasyonlarının artmasına sebep olur [5,6]. Kalıcı özelliğe sahip olan PCB'ler, fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak Kutup Bölgelerine kadar her yere taşınabilmektedir. İçeriğinde düşük klor bulunduran PCB'ler daha uçucu özelliğe sahip olup, atmosferde daha uzun mesafelere kadar taşınabilmektedirler [7].

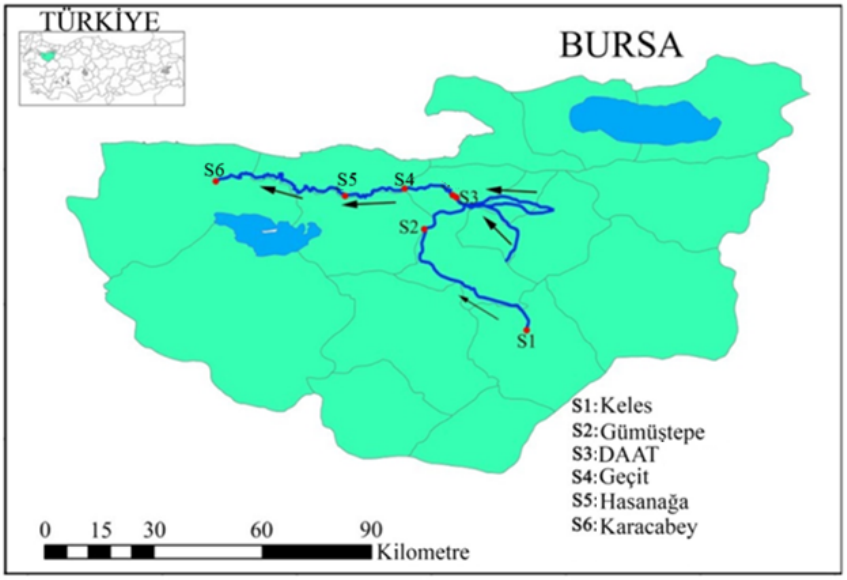
Atmosferde yaygın olarak bulunan ve hava kalitesi açısından önemli kirleticilerden olan PCB'lerin seviyelerini belirlemek üzere ulusal [8,11] ve uluslararası [3,12-14] birçok çalışma yapılmıştır. PCB'lerin atmosferik konsantrasyonlarının belirlenmesinde, son yıllarda pasif hava örnekleyicileri (PHÖ) yaygın olarak kullanılmaktadır. PHÖ'ler, düşük maliyetli, enerji gerektirmeyen ve uzun süreli örnekleme yapabilme özellikleri sayesinde özellikle geniş alanlarda zamana bağlı ortalama konsantrasyonların belirlenmesine yönelik çalışmalarda tercih edilmektedir. Örnekleme aparatı olarak poliüretan köpüğün (PÜK) kullanıldığı bu örnekleyiciler, aktif sistemlere kıyasla daha az bakım gerektirmekte ve iç-dış ortam farkı gözetilmeksizin uygulanabilmektedirler [15]. Bu avantajları sayesinde PHÖ'ler, hem kırsal hem de kentsel alanlarda PCB dağılımının belirlenmesinde önemli bir araç haline gelmiştir. Bursa, yoğun nüfusu, gelişmiş sanayi altyapısı ve tarımsal faaliyetlerin geniş alanlara yayılması nedeniyle atmosferik PCB kirliliğinin farklı arazi kullanım özellikleri açısından değerlendirilmesine uygun bir çalışma alanı niteliğindedir. Nilüfer Çayı havzası boyunca kentsel, endüstriyel ve tarımsal faaliyetlerin bir arada bulunması ve çeşitli evsel ve endüstriyel deşarjların havza üzerinde oluşturduğu çevresel baskı, bölgedeki PCB'lerin mekânsal ve zamansal dağılımlarının araştırılmasını önemli hale getirmektedir. Bursa'da daha önce atmosferik PCB düzeylerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiş olmakla birlikte, farklı arazi kullanım özelliklerini temsil eden noktaların aynı yıllık izleme dönemi içerisinde karşılaştırılması ve elde edilen mekânsal ve zamansal desenlerin olası kaynak süreçleriyle birlikte değerlendirilmesi bölgedeki PCB kirliliğinin daha kapsamlı olarak anlaşılmasına katkı sağlayabilir. Bu yönüyle çalışma, farklı özelliklere sahip örnekleme bölgelerindeki atmosferik PCB düzeylerini karşılaştırmanın yanı sıra, elde edilen güncel verilerin Bursa'da önceki dönemlerde bildirilen konsantrasyonlarla değerlendirilmesine de olanak sağlamaktadır. Bu çalışmanın ana amaçları şunlardır: (1) Ortam havasında PCB konsantrasyonlarının düzeylerini; (2) mekânsal ve zamansal değişimlerini değerlendirmek ve (3) olası kaynaklarını ortaya koymaktır.

2. YÖNTEM

2.1. Örnekleme Bölgeleri ve Programı

Bursa Nilüfer Çayı güzergahı boyunca Ekim 2020 ile Eylül 2021 tarihleri arasındaki bir yıllık periyotta her ay ortam havası örnekleri alınmıştır (Şekil 1). Bursa, ekonomik ve endüstriyel potansiyeli ile yüksek nüfus yoğunluğu açısından Türkiye'nin önde gelen büyükşehirlerinden biridir [16,17]. İl sınırları içerisinde 17 organize sanayi bölgesi yer almakta olup, başlıca sanayi kollarını tekstil, gıda, otomotiv, makine ve mobilya sektörleri oluşturmaktadır. Birçok küçük derenin birleşmesiyle oluşan Nilüfer Çayı, yıl boyunca kesintisiz akışıyla Bursa'nın içme suyu ihtiyacını karşılayan Doğancı Barajı'nın en önemli besleyici akarsularından biridir. Uludağ'ın güney yamaçlarında (Keles) doğan çay, şehir merkezinden geçerek yaklaşık 203 km uzunluğunda bir güzergâhla Karacabey üzerinden Marmara Denizi'ne ulaşır. Nilüfer Çayı boyunca hem evsel hem de endüstriyel kaynaklı atıksuların arıtıldığı çeşitli arıtma tesisleri bulunmaktadır ve bu tesislerde arıtılan sular çaya deşarj edilmektedir. Çayın yıllık toplam akış hacmi 743,77 hm^3 ve ortalama debisi

yaklaşık 24 m^3/s olarak belirlenmiştir. Örnekleme noktalarının büyük bölümü, sanayi ve tarımsal faaliyetlerin yoğun olarak yürütüldüğü alanlarda konumlanmaktadır.



Şekil 1. Örnekleme bölgeleri

Şekil 1'den de görüldüğü gibi hava örnekleri altı farklı örnekleme noktasından alınmıştır. Örnekleme Noktası 3 ile 4 arasındaki mesafe yaklaşık 500 metredir. Atmosferik örnekleme açısından 500 m çok kısa bir mesafe olduğu için S3 ve S4 tek bir örnekleme alanı olarak değerlendirilmiştir. Ancak, bu iki örnekleme noktasının her birinden ayrı ayrı su ve sediment örnekleri de alınmış olup, sonuçları bu makalede verilmemiştir. Örnekleme noktaları; arka plan, yarı-kentsel, kentsel/sanayi, sanayi, sanayi/tarım ve kentsel/tarım bölgelerinden seçilmiştir. Bu farklı özelliklere sahip örnekleme noktaları, PCB'lerin çevresel dağılımını belirlemek için önem arz etmektedir. Örnekleme noktaları ile ilgili açıklamalar aşağıda verilmektedir. Keles (S1), 1 numaralı örnekleme alanı, arka plan bölgesi olarak tanımlanmış olup Keles Delice Köprüsü yakınında konumlanmaktadır. Tarımsal faaliyetlerin ve yerleşimin yoğun olduğu bu nokta, sanayi bölgelerinden en uzak konumda yer almakta ve Nilüfer Çayı'nın kaynağını temsil etmektedir. Gümüştepe (S2), Bursa-Orhaneli karayolu üzerinde, ormanlarla çevrili eğimli bir araziye kurulmuş tarihi bir yerleşim alanıdır. Bursa merkeze yaklaşık 12 km mesafededir ve kentin içme suyunu sağlayan Doğancı Barajı'nın ardından gelen ilk örnekleme noktasıdır. Atıksu Arıtma Tesisi (S3), Bursa Doğu Atıksu Arıtma Tesisi (DAAT), kentin doğu havzasından gelen evsel atıksuların arıtımı için Küçük Balıklı mevkiinde kurulmuştur ve şehirsel/endüstriyel karakter göstermektedir. Geçit (S4), bu noktaya, Demirtaş Organize Sanayi Bölgesi (DOSAB), Kestel ve Gürsu Sanayi Bölgeleri ile Doğu Atıksu Arıtma Tesisi deşarjlarının karıştığı sular ulaşmaktadır. Bu nedenle bölge hem tarımsal hem de endüstriyel özellik taşımaktadır. Hasanağa (S5), 4 numaralı örnekleme alanına benzer biçimde, Bursa'nın Güney Havzası'ndan gelen tüm atıksuların birleşim noktasıdır. Endüstriyel niteliğe sahip olan bu bölgeye Nilüfer Organize Sanayi Bölgesi (NOSAB), Organize Sanayi Bölgesi (OSB) ve Batı Atıksu Arıtma Tesisi çıkış suları ulaşmaktadır. Karacabey (S6), Bursa'nın batısında bulunan ve nüfus açısından ilin beşinci büyük ilçesi olan Karacabey, tarım ve hayvancılıkla öne çıkmaktadır. Şehirsel/tarımsal özellik taşıyan bu örnekleme noktası, Nilüfer Çayı'nın Susurluk Çayı ile birleşmeden önceki son durağını temsil etmektedir. Örnekleme noktalarının seçiminde farklı arazi kullanım özelliklerinin yanı sıra sanayi bölgeleri, atıksu arıtma tesisleri, kentsel yerleşimler ve tarımsal alanlar gibi olası yerel PCB kaynaklarıyla olan ilişkileri de dikkate alınmıştır. Bu kapsamda Keles ve Gümüştepe sanayi faaliyetlerinden görece daha az etkilenen alanları temsil ederken, DAAT, Geçit ve Hasanağa noktaları kentsel ve/veya endüstriyel faaliyetlerin yoğun olduğu bölgelerde, Karacabey ise tarımsal ve kentsel faaliyetlerin birlikte bulunduğu bir alanda yer almaktadır. Bu farklı arazi kullanım özellikleri, örnekleme noktaları arasında gözlenen PCB konsantrasyonlarının mekânsal olarak yorumlanmasında dikkate alınmıştır. Bununla birlikte, örnekleme dönemi boyunca rüzgâr hızı, baskın rüzgâr yönü ve diğer meteorolojik parametreler kaynak değerlendirmesine nicel olarak dâhil edilmemiştir. Bu nedenle atmosferik taşınıma ilişkin değerlendirmeler, arazi kullanım özellikleri ve olası yerel kaynaklar çerçevesinde yapılmıştır.

2.2. Enstrümental Analiz

Ortam havası örnekleri, poliüretan köpük (PÜK) diskler içeren pasif hava örnekleyicileri kullanılarak alınmıştır. Örnekleyiciler yerden yaklaşık 1,5-2 m yüksekliğe monte edilmiştir. Kullanılan PÜK disklerin kalınlığı 1,35 cm, çapı 14 cm, ağırlığı 4,40 g, yüzey alanı 365 cm^2, hacmi 207 cm^3 ve yoğunluğu 0,0213 g/cm^3'tür. Örnek hazırlama; Pasif hava örnekleyicilerinde kullanılacak PÜK diskler 24 saat boyunca saf suda bekletilmiş, ardından iki kez Aseton (ACE) ve 24 saat boyunca Aseton/Hekzan (ACE/HEX) karışımı (1:1) ile Soxhlet cihazında temizlenmiştir. Temizlenen PÜK'ler alüminyum folyo ile sarılarak −20 °C'de saklanmıştır. PÜK diskler örnekleyiciye yerleştirilmeden önce, örnekleyici de saf su, ardından ACE/HEX ile temizlenmiştir. Daha sonra PÜK diskler örnekleyiciye yerleştirilmiş ve 1 ay örnekleme için beklenmiştir. Bir ayın sonunda alınan PÜK disklere ekstraksiyon, temizleme ve yoğunlaştırma adımları uygulanır.

Ekstraksiyon için tüm PÜK diskler soxlet ekstraksiyonuna yerleştirilmiş ve üzerlerine ACE/HEX (1:1) karışımı eklenmiş, ardından PCB izleme standardı (PCB#14, #65, #166, her biri 4 ng) eklendikten sonra 24 saat soxlet ekstraksiyonu yapılmıştır. Daha sonra rotary evaporatör ile hacimleri 2 mL'ye düşürülmüştür [18,19]. Temizleme için katı faz ekstraksiyon kartuşları (Agilent Bond Elute SI) kullanılmış, önce 10 mL HEX ile şartlandırılmıştır. 2 mL'ye yoğunlaştırılmış örnekler kartuşlara eklenmiş, ardından 20 mL HEX ve 30 mL ACE geçirilmiştir. Toplam 50 mL ekstrakt önce 5 mL'ye, ardından 1 mL'ye indirilmiştir.

Tüm örnekler Agilent 6890N GC/MS cihazında analiz edilmiş ve 41 PCB bileşiği PCB #17, 18, 28, 31, 33, 44, 49, 52, 70, 74, 82, 87, 95, 99, 101, 105, 110, 118, 128, 132, 138, 149, 151, 153, 156, 158, 169, 170, 171, 177, 180, 183, 187, 191, 194, 195, 199, 205, 206, 208, and 209 tespit edilmiştir. Cihazda Elektron iyonizasyon (EI) modu ve taşıyıcı gaz olarak helyum kullanılmıştır. Fırın sıcaklık programı: 50 °C (1 dk), 200 °C'ye 25 °C/dk hızla, ardından 300 °C'ye 8 °C/dk hızla çıkılmış ve 5,5 dk bu sıcaklıkta bekletilmiştir [11].

Pasif hava örnekleyicilerinden geçen hava hacimlerinin hesaplanmasında Herkert ve arkadaşları [24] tarafından önerilen model kullanılmıştır. Pasif örnekleme sistemlerinde örneklenen hava hacmi, aktif örnekleme sistemlerinde olduğu gibi doğrudan ölçülen sabit bir hava akışına değil, model ile tahmin edilen örnekleme oranlarına dayanmaktadır. Bu nedenle hesaplanan örnekleme hacimleri belirli düzeyde belirsizlik içerebilmektedir. Özellikle rüzgâr hızı ve sıcaklık gibi meteorolojik koşullardaki değişimler PÜK disklerin kirleticileri tutma hızını ve dolayısıyla etkin örnekleme hacmini etkileyebilmektedir. Bu nedenle model kullanılarak hesaplanan atmosferik PCB konsantrasyonları, meteorolojik koşullara bağlı bu olası belirsizlikler dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

2.3. Kalite Kontrol ve Kalite Güvenirlik

Laboratuvar aşamasında kullanılan tüm cam ekipmanlar önce saf su, ardından ACE ve DCM ile yıkanarak temizlenmiştir. Temizlik işlemi tamamlanan malzemeler 105 °C'de 24 saat süreyle etüvde bekletilmiş, ardından desikatörde soğutulmuştur. Steril hale getirilen malzemeler, kullanım anına kadar alüminyum folyo ile sarılarak ışık almayan bir ortamda saklanmıştır.

PÜK diskler ve örneklemede kullanılan diğer malzemelerde kontaminasyon riskini azaltmak amacıyla, toplam örnek sayısının en az %10'u oranında şahit örnek alınmıştır. PÜK diskler ve örneklemede kullanılan diğer malzemelerde olası kontaminasyonu değerlendirmek amacıyla toplam örnek sayısının en az %10'u oranında saha şahit örneği kullanılmıştır. Saha şahitleri, gerçek örneklerle aynı taşıma ve saha koşullarına maruz bırakılmış ancak aktif örnekleme sürecine alınmamıştır. Böylece örnek hazırlama, taşıma ve saha uygulamalarından kaynaklanabilecek olası kontaminasyon kontrol edilmiştir. Bu şahitlerdeki PCB kütle değerleri, gerçek örneklerde uygulanan aynı analiz prosedürü izlenerek belirlenmiştir. Elde edilen şahit verilerinin ortalamasına, standart sapmanın üç katı eklenerek belirleme limiti (LOD) hesaplanmıştır [11,20]. Dış ortam hava örneklerinde elde edilen PCB kütle değerleri, eğer LOD'un altında kalmışsa hesaplamalara dâhil edilmemiştir. Cihazın kalibrasyonu beş farklı konsantrasyonda (4, 10, 40, 60, 1000 ng/mL) gerçekleştirilmiş, $R^2 > 0,99$ elde edilmiştir. Çalışmada %60–120 aralığı kabul edilebilir geri kazanım kriteri olarak değerlendirilmiş ve bu aralığın altında kalan örnekler veri güvenirliğinin korunması amacıyla nicel hesaplamalara dâhil edilmemiştir. Bu kapsamda, Ağustos ayında Keles örnekleme noktasından elde edilen örneğin geri kazanım değerinin %60'ın altında kalması nedeniyle söz konusu örnek

değerlendirme dışında bırakılmıştır. LOD ve LOQ değerleri şahit numunelere göre hesaplanmış, ölçülen örneklerdeki PCB değerleri LOD'nin üzerinde bulunmuştur. Bu yaklaşım, LOD'un altındaki değerlerin analitik yöntemle güvenilir ve nicel olarak belirlenememesi nedeniyle tercih edilmiştir. Bununla birlikte, LOD altındaki değerlerin hesaplamalardan tamamen çıkarılmasının özellikle düşük konsantrasyonların gözlendiği örneklerde ortalama konsantrasyonların yukarı yönlü etkilenmesine neden olabileceği dikkate alınmıştır. Çalışmada nicel değerlendirmeye dâhil edilen PCB konsantrasyonlarının ilgili LOD değerlerinin üzerinde bulunması nedeniyle bu etkinin mevcut veri seti üzerindeki etkisinin sınırlı olduğu değerlendirilmiştir.

2.4. Korelasyon ve Clausius–Clapeyron

Çalışmada, dış ortam havasında ölçülen PCB konsantrasyonları arasındaki bağıntının belirlenmesinde Pearson korelasyon katsayısı (R) yöntemi tercih edilmiş olup, hesaplamalar Eşitlik 1'e göre gerçekleştirilmiştir [21].

$$R_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^{p}(x_{ij} - \bar{x}_j) \times (x_{ij} - \bar{x}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{p}(x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \times \sum_{i=1}^{p}(x_{ik} - \bar{x}_k)^2}} \quad (1)$$

Burada, Xij ve Xik ilgili örnekleme noktalarında ölçülen PCB konjenerlerinin hava ortamındaki konsantrasyonlarını, $\bar{x}$ ise ortalama PCB düzeylerini, p ise incelenen PCB türlerinin sayısını göstermektedir. Pearson korelasyon analizi, farklı örnekleme noktalarında ölçülen PCB konsantrasyonlarının birlikte değişim eğilimlerini ve noktalar arasındaki doğrusal ilişkileri değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır.

PCB gibi uçucu organik kirleticilerin atmosferik konsantrasyonları, ortam sıcaklığıyla yakından ilişkilidir. Bu bağıntı, termodinamik açıdan Clausius–Clapeyron denklemi (Eşitlik 2) ile açıklanmaktadır [22].

$$\ln P = m\left(\frac{1}{T}\right) + b \quad (2)$$

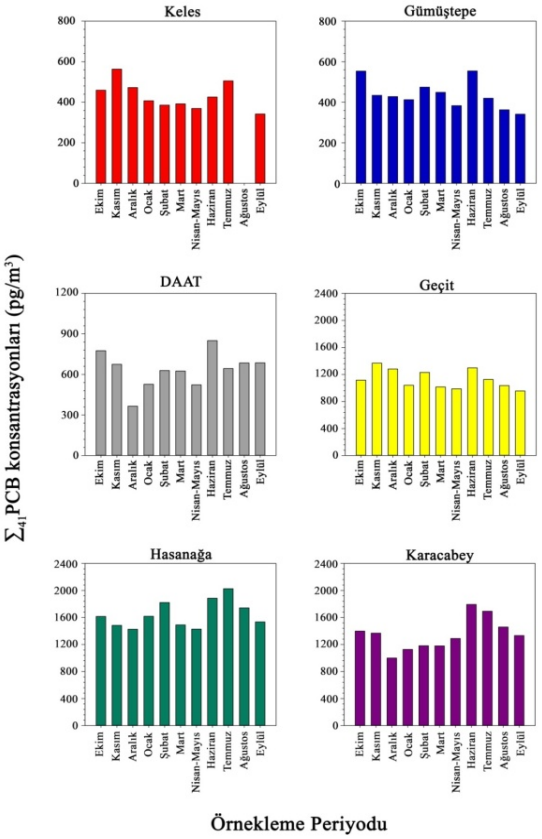
Bu çalışmada Clausius–Clapeyron yaklaşımı, atmosferik PCB konsantrasyonlarının sıcaklığa bağlı değişimini değerlendirmek ve yüzey-atmosfer arasındaki olası yeniden buharlaşma süreçlerine ilişkin çıkarım sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Bu nedenle Clausius–Clapeyron analizinden elde edilen sonuçlar tek başına kesin bir kaynak belirleme yöntemi olarak değil, sıcaklığa bağlı süreçlere ilişkin destekleyici bir gösterge olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca mevsimsel değişimler, örnekleme döneminde gözlenen PCB konsantrasyon eğilimleri üzerinden betimleyici olarak değerlendirilmiş ve mevsimler arasındaki farklılıkların istatistiksel anlamlılığını belirlemeye yönelik ayrı bir hipotez testi uygulanmamıştır. Bu nedenle mevsimsel sonuçlar kesin farklılıklardan ziyade gözlenen eğilimler çerçevesinde yorumlanmıştır.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Dış Ortam Havasındaki PCB Konsantrasyonları

Çalışma kapsamında, Bursa'daki Nilüfer Çayı boyunca belirlenen 6 noktadan, Ekim 2020'den Eylül 2021'e kadar her ay atmosferik hava örnekleri alınmıştır (Şekil 1). Alınan ortam havası örneklerindeki PCB'lerin dış ortam konsantrasyonları, örnekleme bölgeleri arasındaki ilişkiler ile PCB'lerin kaynakları belirlenmeyi amaçlamıştır.

Bursa'da pasif hava örnekleyiciler ile altı farklı noktadan örnekleme yapılmış ve toplam 41 PCB ($\sum_{41}$PCB) türü tespit edilmiştir. COVID-19 önlemleri kapsamında uygulanan sokağa çıkma yasakları nedeniyle Mayıs ayında örnekleme yapılamamıştır. Bu sebepten dolayı Nisan ve Mayıs aylarında PÜK diskler sahada iki ay tutulmuş ve örnekleme hacimleri iki ay olacak şekilde (60 gün) hesaplanmıştır. Ayrıca, Ağustos ayındaki arka plan (Keles) örneklerinde geri kazanım verimlerinin %60'ın altında olması sebebiyle bu ayın verileri hesaplamalara dahil edilmemiştir. Örnekleme oranlarının hesaplanmasında, Herkert ve arkadaşları [24]. tarafından sunulan model kullanılmıştır. Altı farklı örnekleme noktasında ortam havasında ölçülen $\sum_{41}$ PCB konsantrasyonları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Ortam havasındaki toplam PCB konsantrasyonları

$\sum_{41}$PCB konsantrasyonları tüm örnekleme noktalarında 341,2–2025,9 pg/m^3 arasında ölçülmüş, ortalama değer ise 945,9±491,6 pg/m^3 olarak bulunmuştur. Konsantrasyonların en düşük olduğu yer arka plan noktası (Nokta 1) iken, en yüksek değerler sanayi ve tarım etkisindeki bölge (Hasanağa) için belirlenmiştir. Ortam havasında pasif hava örnekleyicileri ile arka plan bölgelerinde PCB ölçümü yapan birçok çalışma bulunmaktadır [25,26]. Li ve arkadaşları [25] arka plan örnekleme noktalarında Avrupa için ortalama 70 pg/m^3, Kuzey Amerika için 79 pg/m^3, Güney Amerika için 66 pg/m^3, Orta Amerika için 270 pg/m^3, Asya için 59 pg/m^3 ve Avustralya için 15 pg/m^3 olarak raporlamıştır. Mao ve arkadaşları [26], Çin'in doğusunda (Zhejiang Eyaleti) arka plan bölgelerinde ortam havasında ortalama $\sum_{40}$PCB konsantrasyonlarını 145±80 pg/m^3 olarak bildirmiştir. Bu çalışmada ise arka plan (Keles) noktasında $\sum_{41}$PCB konsantrasyonları 342,3 ile 536,4 pg/m^3 arasında değişmiş ve ortalama 432,5±67,8 pg/m^3 olarak hesaplanmıştır. Arka plan noktasında elde edilen konsantrasyon değerleri literatürde bildirilen değerlere göre biraz daha yüksektir. Keles örnekleme noktası sanayi alanlarından görece uzak olmakla birlikte, antropojenik etkilerden tamamen izole bir bölge değildir. Bölgenin yerleşim alanlarına ve kent merkezine göre konumu, olası yerel emisyonlar ile atmosferik taşınım süreçleri burada gözlenen PCB düzeylerine katkıda bulunmuş olabilir. Ayrıca PCB'lerin kalıcılığı ve kirlenmiş yüzeylerden yeniden atmosfere salınabilmesi, arka plan olarak tanımlanan alanlarda dahi ölçülebilir konsantrasyonların gözlenmesine neden olabilecek süreçler arasında değerlendirilebilir. Bununla birlikte, rüzgâr hızı ve yönü gibi meteorolojik parametreler çalışmada nicel olarak analizlere dâhil edilmediğinden, Keles örnekleme bölgesinde gözlenen görece yüksek PCB konsantrasyonlarının belirli bir kaynağa doğrudan atfedilmesi mümkün değildir. Bu durum, bazı arka plan bölgelerinde bir veya birden fazla yerel emisyon kaynağı olabileceği anlamına da gelmektedir [27]. Bu çalışmada arka plan olarak tanımlanan bölgenin şehir merkezine çok uzak olmaması ve meteorolojik parametrelerin PCB'lerin taşınımında rol oynadığı düşünülmektedir [19]. Keles noktasından sonra en düşük PCB seviyeleri sırasıyla yarı-kentsel (Gümüştepe; 437,6±68,9 pg/m^3) ve kentsel/sanayi (DAAT) alanlarında (635,2±130,4 pg/m^3) tespit edilmiştir. Benzer şekilde, Sari ve Esen [11]. Bursa'da 2017–2018 yıllarında yarı-kentsel bir noktada ortalama $\sum_{50}$PCB konsantrasyonunu 439,5±166,6 pg/m^3 olarak raporlamıştır. Ayrıca Birgül ve arkadaşları [10], Bursa'daki yarı-kentsel bölgelerde 2014 yılı için ortalama $\sum_{43}$PCB konsantrasyonlarını 43,8±24,4 pg/m^3 ve 140,0±190,0 pg/m^3 olarak bildirmiştir. Bu çalışmada, yarı-kentsel alanda ölçülen PCB konsantrasyonlarının 2017-2018 yıllarında ölçülen değerlerle aynı seviyede olduğu görülmüştür [11]. Bununla birlikte, söz konusu çalışmaların farklı sayıda ve özellikte PCB

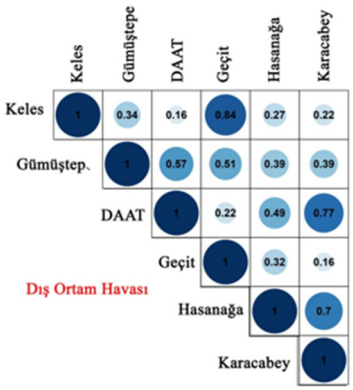
konjenerlerini içermesi, örnekleme süreleri ve örnekleme teknikleri ile analitik prosedürlerin farklılık göstermesi nedeniyle bildirilen konsantrasyonların doğrudan nicel olarak karşılaştırılması sınırlıdır. Bu nedenle literatür karşılaştırmaları, çalışmalar arasındaki mutlak konsantrasyon farklılıklarını ortaya koymaktan ziyade atmosferik PCB düzeylerinin genel büyüklüklerinin ve bölgesel eğilimlerin değerlendirilmesi amacıyla ele alınmıştır.

Bu çalışmada Hasanağa $\sum_{41}$PCB konsantrasyonları 1426,4 ile 2025,9 pg/m^3 arasında değişmiş ve ortalama 1643,1±200,5 pg/m^3 olarak hesaplanmıştır. Aynı şehirde daha önce Birgül ve arkadaşları [10] tarafından yapılan bir çalışmada, 2014 yılında sanayi bölgelerinde ortalama $\sum_{43}$PCB konsantrasyonları sırasıyla 170±150 pg/m^3 ve 280±540 pg/m^3 olarak bildirilmiştir. Bu çalışmada Hasanağa örnekleme noktasında ölçülen PCB konsantrasyonlarının söz konusu çalışmadan daha yüksek çıkmasının, geçen 8 yıllık sürede sanayi kuruluşlarının ve nüfusun artmasına bağlı olduğu düşünülmektedir. PCB'lerin temel kaynakları arasında çöplüklerde uygun olmayan veya yasa dışı yakma işlemleri, toprağa ve su yollarına doğrudan ya da dolaylı deşarjlar ile eski PCB içeren ekipmanların bakım ve onarımı yer almaktadır [9]. Bununla birlikte, bu çalışmada sanayi bölgesinde ölçülen PCB değerleri, literatürde raporlanan diğer sanayi bölgelerine kıyasla görece olarak daha düşüktür. Cetin ve arkadaşları [28] İzmir'deki sanayi bölgesinde kış mevsimi için ortalama $\sum_{36}$PCB konsantrasyonunu 3136±824 pg/m^3, yaz mevsimi için ise 1371±642 pg/m^3 olarak raporlamıştır. Aydin ve arkadaşları [9] tarafından yine İzmir'de yapılan başka bir çalışmada ise, sanayi bölgesinde $\sum_{35}$PCB konsantrasyonları 346 ile 94.363 pg/m^3 arasında değişmiştir. Li ve arkadaşları [29] Çin'in güneydoğusunda sanayi bölgesinde ortalama $\sum_{18}$PCB konsantrasyonunu 7220 pg/m^3 olarak raporlamıştır. Bu değerlerin farklı konjener toplamlarını ($\sum_{18}$PCB, $\sum_{35}$PCB, $\sum_{36}$PCB, $\sum_{43}$PCB ve $\sum_{41}$PCB) ve farklı örnekleme koşullarını temsil ettiği dikkate alındığında, çalışmalar arasındaki karşılaştırmaların doğrudan eşdeğer konsantrasyon karşılaştırmaları olarak değil, farklı çevresel koşullarda gözlenen PCB düzeylerinin genel bir göstergesi olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Hasanağa örnekleme noktasını takip eden en yüksek PCB seviyeleri, sırasıyla Karacabey (1347,8±237,1 pg/m^3) ve Geçit örnekleme noktalarında (1132,2±140,9 pg/m^3) belirlenmiştir. Geçmişte tarım arazilerinin PCB'ler için doğrudan deşarj noktası olarak kullanılmış olması, günümüzde bu alanlarda yüksek PCB konsantrasyonlarının gözlenmesine yol açmaktadır [30]. Benzer şekilde, Pozo ve arkadaşları [31] tarım alanlarında ölçülen PCB düzeylerinin kentsel alanlara kıyasla daha yüksek olduğunu raporlamıştır. Ayrıca PCB'lerin fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle, toprak bir kaynak görevi görebilmekte ve artan sıcaklıkla birlikte topraktan ortama buharlaşma gerçekleşebilmektedir [9]. Dolayısıyla sanayi ve tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu örnekleme noktalarında gözlenen yüksek PCB konsantrasyonlarının, doğrudan emisyonların yanı sıra geçmiş kirliliğin neden olduğu ikincil yüzey emisyonlarının birlikte etkisiyle ortaya çıkmış olabileceği değerlendirilmektedir.

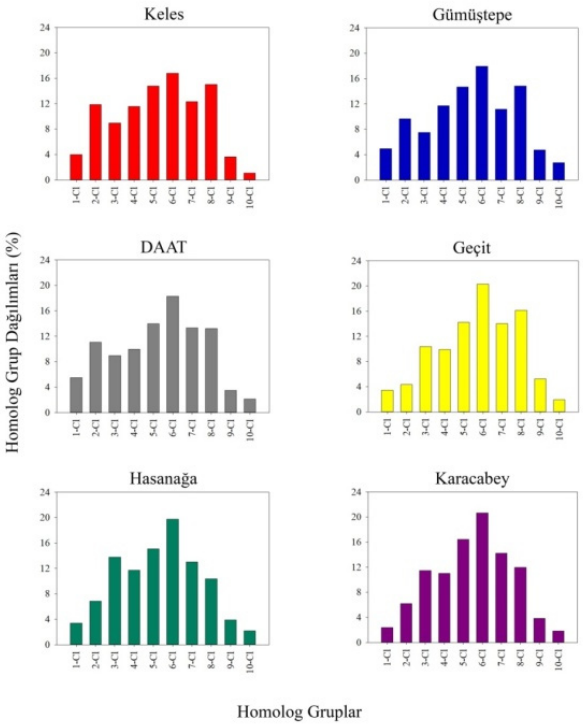
3.2. Örnekleme Bölgeleri Arasındaki İlişkiler ile Kaynakların Belirlenmesi

Örnekleme bölgeleri arasındaki PCB konsantrasyonları arasındaki ilişkilerin belirlenmesinde Pearson korelasyon katsayısı (R) kullanılmıştır. Örnekleme noktalarındaki hava örneklerine ait PCB düzeyleri arasındaki korelasyon değerleri Şekil 3'te sunulmuştur. Elde edilen R değerleri incelendiğinde, örnekleme noktaları arasında pozitif korelasyon gözlenmiştir. Bu bulgu, farklı örnekleme noktalarındaki atmosferik PCB konsantrasyonlarının zamansal dağılımlarının büyük ölçüde benzer olduğunu göstermektedir.



Şekil 3. Dış ortam hava örneklerindeki PCB konsantrasyonlarına ait R değerleri

Dış ortam havasındaki PCB'lerin olası kaynaklarının belirlenmesinde homolog grup dağılımları kullanılmıştır. Bu çalışmada elde edilen homolog grup dağılımları Şekil 4'te sunulmuştur.



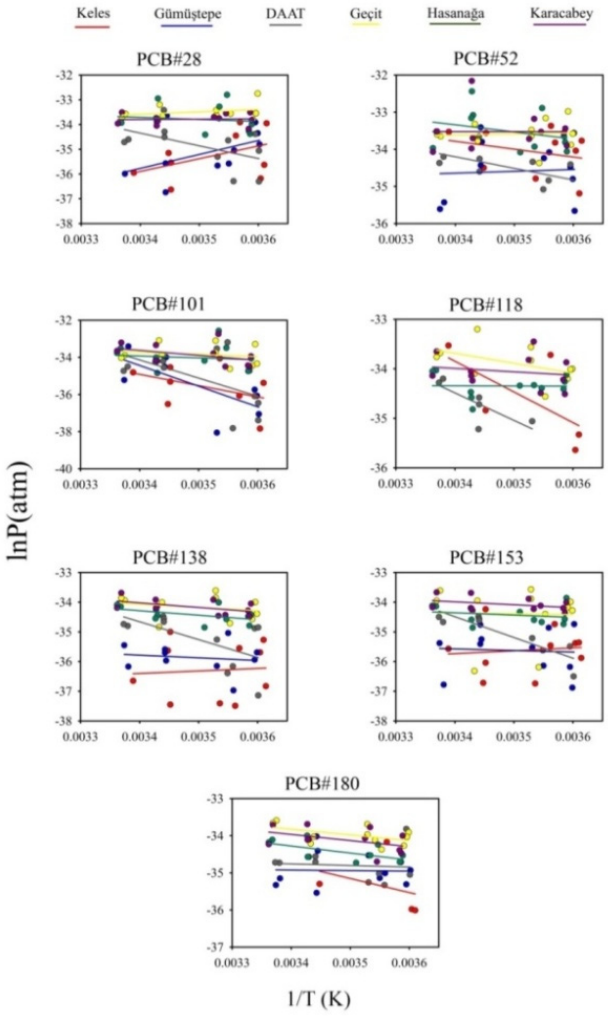
Şekil 4. Dış ortam havası için hesaplanan homolog grup dağılımları

Keles, Gümüştepe ve Geçit örnekleme noktalarında, 6-Cl PCB'lerden sonra en baskın homolog grup 8-Cl PCB'ler iken; DAAT, Hasanağa ve Karacabey noktalarında 5-Cl PCB'ler öne çıkmaktadır. Keles, Gümüştepe ve Geçit bölgelerinde 8-Cl PCB'lerin görece baskın olması, bu bölgelerdeki PCB bileşiminin yakın çevredeki veya bölgesel kaynak süreçlerinden etkilenmiş olabileceğine işaret etmektedir [32]. Benzer şekilde, Kaya ve arkadaşları [33] tarafından yapılan çalışmada, endüstriyel bölgelere yakın örnekleme noktalarında 5-Cl PCB'lerin baskın homolog tür olduğu raporlanmıştır. Bu çalışmada Hasanağa ve Karacabey örnekleme noktalarında 5-Cl PCB'lerin öne çıkması, söz konusu bölgelerdeki endüstriyel ve tarımsal faaliyetlerin atmosferik PCB profilleri üzerinde etkili olabileceğini düşündürmektedir. Bununla birlikte, homolog grup dağılımları tek başına belirli bir PCB kaynağının kesin olarak tanımlanmasına olanak vermediğinden, bu sonuçlar olası kaynak süreçlerini değerlendirmede destekleyici göstergeler olarak ele alınmıştır.

Homolog grup dağılımlarına ek olarak, atmosferik PCB'lerin olası kaynak ve yüzey-atmosfer değişim süreçlerinin değerlendirilmesinde Clausius–Clapeyron denklemi de kullanılmıştır (Şekil 5). Bu yaklaşım, atmosferik PCB konsantrasyonlarının sıcaklıkla ilişkisini ortaya koyarak yakın ve/veya bölgesel kaynakların, sıcaklığa bağlı ikincil emisyonların ve atmosferik taşınım süreçlerinin olası katkılarının değerlendirilmesine destek sağlamaktadır. Bununla birlikte, yöntem tek başına yerel ve uzun menzilli kaynakları kesin olarak birbirinden ayıran bir kaynak belirleme yaklaşımı değildir.Bu analiz kapsamında indikatör PCB türleri (PCB#28, 52, 101, 118, 138, 153 ve 180) dikkate alınmıştır.

Atmosferik PCB'lerin Clausius–Clapeyron denklemi kullanılarak yapılan analizlerinde, eğim değerleri genellikle tüm bileşikler ve örnekleme noktaları için negatif olarak bulunmuştur. Negatif eğimler, atmosferik PCB konsantrasyonlarının sıcaklıkla ilişkili bir değişim gösterdiğine ve özellikle sıcaklığın arttığı dönemlerde toprak, sediment ve diğer kirlenmiş yüzeylerden yeniden buharlaşma yoluyla gerçekleşebilecek ikincil emisyonların atmosferik PCB düzeylerine katkıda bulunabileceğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, bu sonuçların doğrudan "yerel kaynak" göstergesi olarak değerlendirilmesi uygun değildir. Clausius–Clapeyron ilişkisi yerel birincil emisyonlar, bölgesel kaynaklar ve uzun menzilli atmosferik taşınımın katkılarını tek başına kesin olarak birbirinden ayıramamaktadır.

Homolog grup dağılımları ve Clausius–Clapeyron analizlerinin birlikte değerlendirilmesi, özellikle DAAT, Geçit, Hasanağa ve Karacabey gibi kentsel, endüstriyel ve/veya tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu bölgelerde yakın çevredeki antropojenik kaynaklar ile kirlenmiş yüzeylerden gerçekleşebilecek ikincil emisyonların atmosferik PCB düzeylerine katkıda bulunabileceğini göstermektedir. Ancak mevcut analizler uzun menzilli atmosferik taşınımın katkısını tamamen ortadan kaldırmaya olanak vermemektedir. Özellikle DAAT, Geçit, Hasanağa ve Karacabey örnekleme noktalarının sanayi bölgelerine yakın konumda olması, bu bölgelerde gözlenen PCB düzeylerinde endüstriyel faaliyetlerin olası katkısının bulunabileceğine işaret etmektedir. Öte yandan, Keles ve Gümüştepe noktaları sırasıyla arka plan ve yarı-kentsel alanları temsil etmesine rağmen, şehir merkezine olan göreceli yakınlıkları nedeniyle, meteorolojik faktörler (rüzgâr hızı ve yönü gibi) aracılığıyla PCB'lerin bu noktalara taşınabileceği düşünülmektedir. Dolayısıyla bu bölgelerde ölçülen PCB'lerin yalnızca yerel kaynaklarla açıklanması yerine, yakın/bölgesel kaynaklar, yeniden buharlaşma süreçleri ve atmosferik taşınımın birlikte etkisinin dikkate alınması daha uygun olacaktır.



Şekil 5. Dış ortam havasındaki PCB'ler için Clausius–Clapeyron grafiği

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Bursa Nilüfer Çayı havzasındaki farklı arazi kullanımlarını temsil eden noktalarda, pasif hava örnekleyicileri kullanılarak atmosferik PCB düzeylerinin bir yıllık mekânsal ve zamansal değişimi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, $\sum_{41}$PCB konsantrasyonlarının 341,2–2025,9 pg/m^3 arasında değiştiğini ve ortalama konsantrasyonun 945,9 ± 491,6 pg/m^3 olduğunu göstermiştir. En düşük PCB konsantrasyonları Keles ve Gümüştepe örnekleme noktalarında gözlenirken, en yüksek konsantrasyonlar sanayi ve tarımsal faaliyetlerin

etkisindeki örnekleme noktalarında (Geçit, Hasanağa ve Karacabey) belirlenmiştir. Bu mekânsal dağılım, söz konusu faaliyetlerin atmosferik PCB yükü üzerindeki doğrudan etkisini ortaya koymaktadır. Örnekleme noktaları arasındaki pozitif korelasyonlar zamansal değişimlerin benzer bir eğilim izlediğine işaret ederken; homolog grup dağılımları ve Clausius–Clapeyron analizleri ise yerel/bölgesel kaynakların yanı sıra kirlenmiş yüzeylerden sıcaklığa bağlı yeniden buharlaşma süreçlerinin de kirliliğe katkı sağladığını doğrulamaktadır. Bununla birlikte, bu yaklaşımlar PCB kaynaklarının kesin olarak ayrıştırılmasına tek başına olanak vermediğinden, uzun menzilli atmosferik taşınım ve diğer olası süreçlerin katkısı tamamen göz ardı edilememektedir. Sonuç olarak; yüksek PCB seviyelerinin gözlendiği sanayi ve tarım bölgelerinde izleme çalışmalarının sürdürülmesi, potansiyel emisyon kaynaklarının detaylandırılması, sıcak dönemlerde artan yeniden buharlaşma süreçlerinin göz önünde bulundurulması ve meteorolojik parametrelerin gelecekteki analizlere dâhil edilmesi önerilmektedir. Bu tür hedefli izleme ve kaynak belirleme çalışmaları, Nilüfer Çayı havzasındaki atmosferik PCB kirliliğinin daha iyi anlaşılmasına ve bölgeye özgü kirlilik kontrol stratejilerinin geliştirilmesine önemli katkılar sunacaktır.

5. KAYNAKLAR

1. Song, H., Yan, X., Zhao, H., Zhang, X., Shi, X. & Ma, J. (2022). Adsorption of polychlorinated biphenyls on gold colloid by surface-enhanced Raman spectroscopy and density functional theory. *Vibrational Spectroscopy, 120*, 103369.
2. Zhu, M., Yuan, Y., Yin, H., Guo, Z., Wei, X., Qi, X., Li, H. & Dang, Z. (2022). Environmental contamination and human exposure of polychlorinated biphenyls (PCBs) in China: A review. *Science of the Total Environment, 805*, 150270.
3. Zhang, P., Ge, L., Gao, H., Yao, T., Fang, X., Zhou, C. & Na, G. (2014). Distribution and transfer pattern of polychlorinated biphenyls (PCBs) among the selected environmental media of Ny-Ålesund, the Arctic: As a case study. *Marine Pollution Bulletin, 89*(1-2), 267-275.
4. Safder, U., Nam, K. J., Kim, D., Shahlaei, M. & Yoo, C. K. (2018). Quantitative structure–property relationship (QSPR) models for predicting the physicochemical properties of polychlorinated biphenyls (PCBs) using deep belief network. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 162*, 17-28.
5. Borja, J., Taleon, D.M., Auresenia, J. & Gallardo, S. (2005). Polychlorinated biphenyls and their biodegradation. *Process Biochemistry, 40*(6), 1999-2013.
6. Bhaskar Reddy, V., Moniruzzaman, M., Madhavi, G. & Aminabhavi, T.M. (2020). Modern approaches in separation, identification and quantification of polychlorinated biphenyls. *Current Opinion in Environmental Science and Health, 18*, 26-39.
7. Weitekamp, C.A., Phillips, L.J., Carlson, L.M., DeLuca, N.M., Cohen Hubal, E.A. & Lehmann, G.M. (2021). A state-of-the-science review of polychlorinated biphenyl exposures at background levels: Relative contributions of exposure routes. *Science of the Total Environment, 776*, 145912.
8. Ozcan, S. & Aydin, M.E. (2009). Polycyclic aromatic hydrocarbons, polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in urban air of Konya, Turkey. *Atmospheric Research, 93*(4), 715-722.
9. Aydin, Y.M., Kara, M., Dumanoglu, Y., Odabasi, M. & Elbir, T. (2014). Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in ambient air of an industrial region in Turkey. *Atmospheric Environment, 97*, 271-285.
10. Birgül, A., Kurt-Karakus, P. B., Alegria, H., Gungormus, E., Celik, H., Cicek, T. & Güven, E.C. (2017). Polyurethane foam (PUF) disk passive samplers derived polychlorinated biphenyls (PCBs) concentrations in the ambient air of Bursa-Turkey: Spatial and temporal variations and health risk assessment. *Chemosphere, 168*, 1345-1355.
11. Sari, M.F. & Esen, F. (2022). Atmospheric concentration, spatial variations, and source identification of persistent organic pollutants in urban and semi-urban areas using passive air samplers in Bursa, Turkey. *Environmental Science and Pollution Research, 29*, 32082-32092.
12. Liu, Y., Wang, S., McDonough, C.A., Khairy, M., Muir, D.C.G., Helm, P.A. & Lohmann, R. (2016). Gaseous and freely-dissolved PCBs in the Lower Great Lakes based on passive sampling: Spatial trends and air–water exchange. *Environmental Science and Technology, 50*(10), 4932-4939.
13. Hao, Y., Li, Y., Wania, F., Yang, R., Wang, P., Zhang, Q. & Jiang, G. (2021). Atmospheric concentrations and temporal trends of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in the Arctic during 2011–2018. *Chemosphere, 267*, 128859.
14. Dreyer, A. & Minkos, A. (2023). Polychlorinated biphenyls (PCB) and polychlorinated dibenzo-para-dioxins and dibenzofurans (PCDD/F) in ambient air and deposition in the German background. *Environmental Pollution, 316*(P1), 120511.

15. Fiedler, H., de Boer, J. & Abad, E. (2024). Persistent organic pollutants in air across the globe using a comparative passive air sampling method. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry, 171*, 117494.
16. Şenkal Sezer, F. (2016). Sağlık ocaklarında konfor koşullarının değerlendirilmesi: Bursa/Nilüfer örneği. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30*(1), 197-208.
17. Abdulvahitoğlu, A., Abdulvahitoğlu, A. ve Arslan, Z. (2025). Sürdürülebilir elektrikli ulaşım için stratejik planlama: Bursa ilinde elektrikli araç şarj istasyonu yer seçimi analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40*(4), 959-976.
18. Gurkan Ayyildiz, E. & Esen, F. (2020). Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) at two sites in Bursa, Turkey: Determination of concentrations, gas–particle partitioning, sources, and health risk. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 78*(3), 350-366.
19. Sari, M.F., Esen, F., Cordova Del Aguila, D.A. & Kurt Karakus, P.B. (2020). Passive sampler derived polychlorinated biphenyls (PCBs) in indoor and outdoor air in Bursa, Turkey: Levels and an assessment of human exposure via inhalation. *Atmospheric Pollution Research, 11*(6), 71-80.
20. Odabasi, M., Cetin, B., Demircioglu, E. & Sofuoglu, A. (2008). Air–water exchange of polychlorinated biphenyls (PCBs) and organochlorine pesticides (OCPs) at a coastal site in Izmir Bay, Turkey. *Marine Chemistry, 109*(1-2), 115-129.
21. Shojaeefard, M.H., Khalkhali, A. & Yarmohammadisatri, S. (2017). An efficient sensitivity analysis method for modified geometry of Macpherson suspension based on Pearson correlation coefficient. *Vehicle System Dynamics, 55*(6), 827-852.
22. Akyüz, M. & Çabuk, H. (2009). Meteorological variations of PM2.5/PM10 concentrations and particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment of Zonguldak, Turkey. *Journal of Hazardous Materials, 170*(1), 13-21.
23. St-Amand, A.D., Mayer, P.M. & Blais, J.M. (2008). Seasonal trends in vegetation and atmospheric concentrations of PAHs and PBDEs near a sanitary landfill. *Atmospheric Environment, 42*(13), 2948-2958.
24. Herkert, N.J., Martinez, A. & Hornbuckle, K.C. (2016). A model using local weather data to determine the effective sampling volume for PCB congeners collected on passive air samplers. *Environmental Science and Technology, 50*, 6690-6697.
25. Li, Y.F., Harner, T., Liu, L., Zhang, Z., Ren, N.Q., Jia, H., Ma, J. & Sverko, E. (2010). Polychlorinated biphenyls in global air and surface soil: Distributions, air–soil exchange, and fractionation effect. *Environmental Science and Technology, 44*(8), 2784-2790.
26. Mao, S., Zhang, G., Li, J., Geng, X., Wang, J., Zhao, S., Cheng, Z., Xu, Y., Li, Q. & Wang, Y. (2020). Occurrence and sources of PCBs, PCNs, and HCB in the atmosphere at a regional background site in east China: Implications for combustion sources. *Environmental Pollution, 262*, 114267.
27. Halse, A.K., Schlabach, M., Eckhardt, S., Sweetman, A., Jones, K. & Breivik, K. (2011). Spatial variability of POPs in European background air. *Atmospheric Chemistry and Physics, 11*(4), 1549-1564.
28. Cetin, B., Yatkin, S., Bayram, A. & Odabasi, M. (2007). Ambient concentrations and source apportionment of PCBs and trace elements around an industrial area in Izmir, Turkey. *Chemosphere, 69*(8), 1267-1277.
29. Li, Y.M., Jiang, G.B., Wang, Y.W., Wang, P. & Zhang, Q.H. (2008). Concentrations, profiles and gas–particle partitioning of PCDD/Fs, PCBs and PBDEs in the ambient air of an e-waste dismantling area, southeast China. *Chinese Science Bulletin, 53*(4), 521-528.
30. Di Guardo, A., Raspa, G., Terzaghi, E., Vergani, L., Mapelli, F., Borin, S., Zanardini, E., Morosini, C., Anelli, S., Nastosio, P., Sale, V.M. & Armiraglio, S. (2020). PCB vertical and horizontal movement in agricultural soils of a highly contaminated site: Role of soil properties, cultivation history and PCB physico-chemical parameters. *Science of the Total Environment, 747*, 141477.
31. Pozo, K., Harner, T., Lee, S.C., Sinha, R.K., Sengupta, B., Loewen, M., Geethalakshmi, V., Kannan, K. & Volpi, V. (2011). Assessing seasonal and spatial trends of persistent organic pollutants (POPs) in Indian agricultural regions using PUF disk passive air samplers. *Environmental Pollution, 159*(2), 646-653.
32. Devi, N.L., Yadav, I.C., Shihua, Q., Chakraborty, P. & Dan, Y. (2014). Distribution and risk assessment of polychlorinated biphenyls (PCBs) in the remote air and soil of Manipur, India. *Environmental Earth Sciences, 72*(10), 3955-3967.
33. Kaya, E., Dumanoglu, Y., Kara, M., Altiok, H., Bayram, A., Elbir, T. & Odabasi, M. (2012). Spatial and temporal variation and air–soil exchange of atmospheric PAHs and PCBs in an industrial region. *Atmospheric Pollution Research, 3*(4), 435-449.

Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 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.