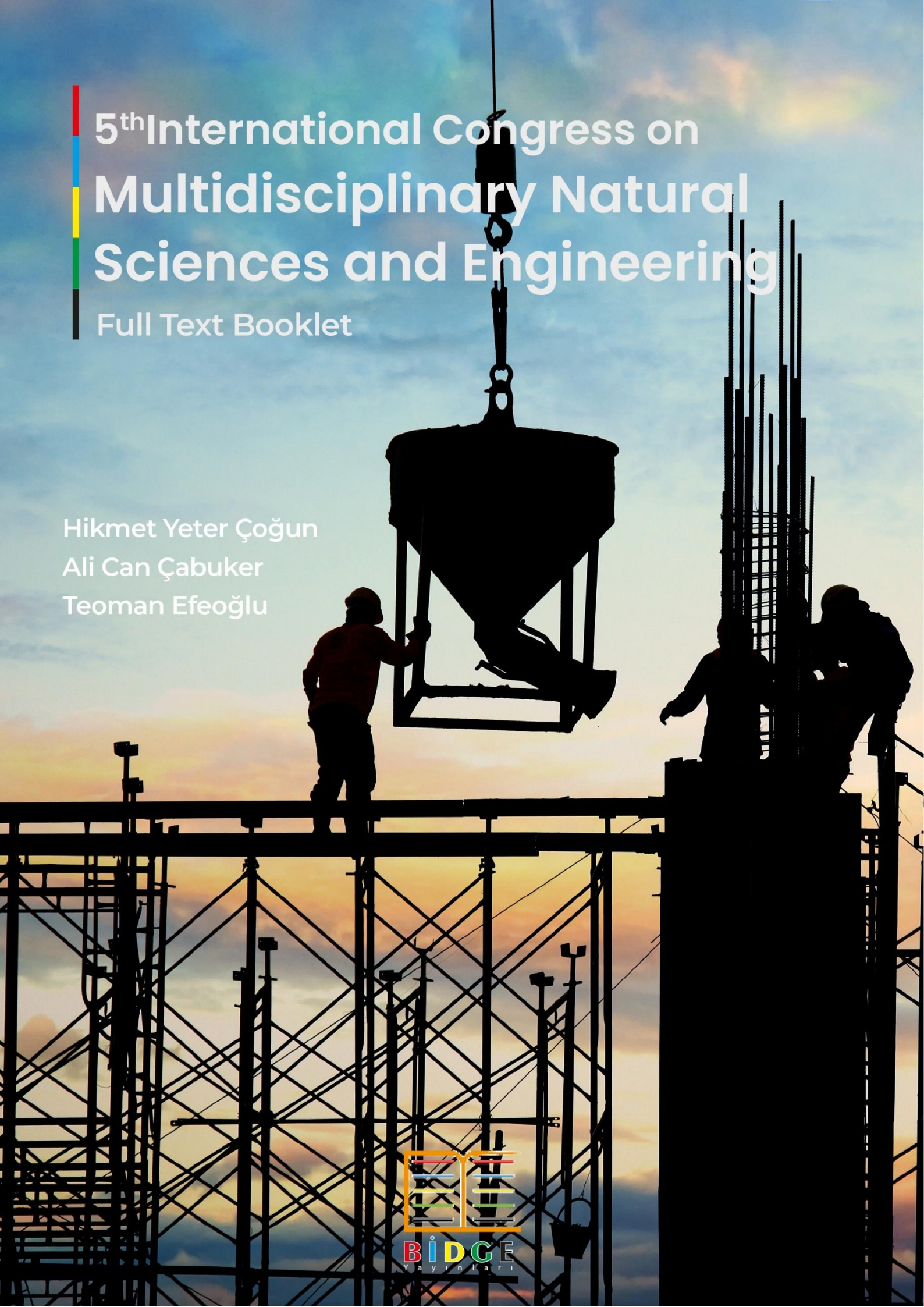




5th International Congress on Multidisciplinary Natural Sciences and Engineering

Full Text Booklet

Hikmet Yeter oğun
Ali Can abuker
Teoman Efeoğlu





**5thInternational Congress on
Multidisciplinary Natural Sciences and Engineering
Full Text Booklet**

07-08 Dec 2025

Ankara/Turkey

BIDGE Publications

5thInternational Congress on Multidisciplinary Natural Sciences and Engineering Full Text Booklet

ISBN: 978-625-8673-46-3

Editors: Hikmet Yeter oğun, Ali Can abuker, Teoman Efeoğlu

Page Layout: Gzde YCEL

1st Edition: BIDGE Publications, 2025

Publication Date: 25.12.2024

All rights of this work are reserved. It cannot be reproduced in any way without the written permission of the publisher and editor, except for short excerpts to be made for promotion by citing the source.

Certificate No: 71374

Copyright  BIDGE Publications

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. řti.

Gzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 ankaya / Ankara



SCIENTIFIC COMMITTEE

Dr. Ahmet Şahiner – Süleyman Demirel University
Dr. Ali Allahverdi – Kuwait University
Dr. Ali Hakan Işık – Burdur Mehmet Akif Ersoy University
Dr. Ali Kahrman – İstanbul Okan Üniversitesi
Dr. Aşkın Kırız – Yakın Doğu University
Dr. Bahattin Aydın – Kastamonu University
Dr. Bülent Ergönül – Manisa Celâl Bayar University
Dr. Çiğdem Sayıl – İstanbul University-Cerrahpaşa
Dr. Didar Ucuncuoğlu – The University Of Manitoba
Dr. Dilek Arsoy – Near East University
Dr. Dilek Arsoy – Near East University
Dr. Elahe Reyhani – Zanjan Medical Science University
Dr. Engin Özkan – Erzincan Binalı Yıldırım University
Dr. Erkan Can – İzmir Katip Çelebi University
Dr. Erkut Akkartal – Yeditepe University
Dr. Füsun Erduran Nemutlu – Çanakkale Onsekiz Mart University
Dr. Gülşen Tozsın – Atatürk University
Dr. Günseli Turgut Cin – Akdeniz University
Dr. Hacer Çelik Ateş – Isparta Uygulamalı Bilimler University
Dr. Halis Bilgil – Aksaray University
Dr. Işıl Var – Çukurova University
Dr. İsmet Kahraman Arslan – İstanbul Ticaret University
Dr. Kenan Köprücü – Fırat University
Dr. Levent Yılmaz – Nişantaşı University
Dr. Luqman Alatrushi – Northern Technical University-Iraq
Dr. M. Yeşim Çelik – Sinop University
Dr. Mahmut Aydınol – Dicle University
Dr. Mehmet Alp Ilgaz – Ljubljana Üniversitesi
Dr. Mehmet Bayırlı – Balıkesir University
Dr. Mehmet Mısırlı – Karadeniz Teknik University
Dr. Mehmet Sait Toprak – Mardin Artuklu University
Dr. Mehmet Şükrü Gülay – Burdur Mehmet Akif Ersoy University
Dr. Mehmet Tekin – Tokat Gaziosmanpaşa University
Dr. Murat Hatipoğlu – Dokuz Eylül University
Dr. Mustafa Aytekin – University Of Bahrain
Dr. Mustafa Bayram – Biruni University
Dr. Mustafa Boğa – Niğde Ömer Halisdemir Üniv
Dr. Mustafa Güneş – Dokuz Eylül University
Dr. Nazife Aslan – Ankara Hacı Bayram Veli University
Dr. Nermin Sökmen – National University Of Science And Technology Misis
Dr. Nurhan Gümrükçüoğlu – Karadeniz Teknik University

Dr. Oexan Bağirov – Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Naxçıvan Bölümü
Dr. Özlem Turgay – Kahramanmaraş Sütçü İmam University
Dr. Paşa Yalçın – Erzincan Binalı Yıldırım University
Dr. Prakasha Kn – Vidyavardhaka College Of Engineering
Dr. Remzi Varol – Süleyman Demirel University

REVIEWER COMMITTEE

Dr. Abdülkerim Diler – Atatürk University
Dr. Abdullah Başçı – Atatürk University
Dr. Ahmet Akköse – Atatürk University
Dr. Ahmet Çilek – Çukurova University
Dr. Ahmet Gümüş – Niğde Ömer Halisdemir University
Dr. Ahmet İyigör – Kırşehir Ahi Evran University
Dr. Akın Kırbaş – Yozgat Bozok University
Dr. Ali Dinc – American University Of The Middle East
Dr. Ali Kurt – Pamukkale University
Dr. Ali Müjdat Özkan – Konya Teknik University
Dr. Alihan Çokkızgın – Gaziantep University
Dr. Alpay Tamer Ertürk – Kocaeli University
Dr. Alper Bodur – Ondokuz Mayıs University
Dr. Aslıhan Demirdöven – Tokat Gaziosmanpaşa University
Dr. Ayça Karasakal – Tekirdağ Namık Kemal University
Dr. Aylin Salıcı – Hatay Mustafa Kemal University
Dr. Aynur Demir – Aksaray University
Dr. Aynur Demir – Aksaray University
Dr. Ayşe Ebru Borum – Balıkesir University
Dr. Ayşe Handan Dökmeçi – Tekirdağ Namık Kemal University
Dr. Bekir Gürbulak – Atatürk University
Dr. Berna Dalkıran – Ankara University
Dr. Berna Yavuz Pehlivanlı – Yozgat Bozok University
Dr. Betül Apaydın Yıldırım – Atatürk University
Dr. Burçak İşçi – Ege University
Dr. Coşkun Deniz – Aydın Adnan Menderes University
Dr. Deniz Şahin – Gazi University
Dr. Derya Arslan – Bitlis Eren University
Dr. Devabil Kara – Marmara University
Dr. Devrim Alkaya – Pamukkale Üniversitesi
Dr. Ebru Yılmaz – Aydın Adnan Menderes University
Dr. Elif Akpınar Külekçi – Atatürk University
Dr. Elif Kılıç Delice – Atatürk University
Dr. Elif Şenkuytu – Atatürk University
Dr. Elsevar Asadov – Nahcivan Devlet Üniversitesi
Dr. Emine Gül Cansu Ergün – Başkent University
Dr. Engin Çelebi – Çukurova University

Dr.Erdal Yabalak – Mersin University
Dr.Erkan Çimen – Van Yüzüncü Yıl University
Dr.Erman Şentürk – Kocaeli University
Dr.Erol Kapluhan – Burdur Mehmet Akif Ersoy University
Dr.Evrin Güneş Altuntaş – Ankara University
Dr.Fatih Çemrek – Eskişehir Osmangazi University
Dr.Fatih Yıldırım – Atatürk University
Dr.Gizem Erdoğan Aydın – İzmir Demokrasi University
Dr.Gonca Durmaz Güngör – Çankırı Karatekin University
Dr.Gülşen Akman – Kocaeli Üniversitesi
Dr.Güvenç Görgülü – Burdur Mehmet Akif Ersoy University
Dr.Hacer Azak – Karamanoğlu Mehmetbey University
Dr.Hakan Ayyıldız – Çanakkale Onsekiz Mart University
Dr.Halil Erol – Osmaniye Korkut Ata University
Dr.Halil Tanıl – Ege University
Dr.Hasan Koten – İstanbul Medeniyet University
Dr.Hatun Barut – Doğu Akdeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü
Dr.Hülya Demir – Yeditepe University
Dr.Hülya Kaftelen Odabaşı – Fırat University
Dr.Hüseyin Esen – Kocaeli University
Dr.Hüseyin Metin – Kafkas University
Dr.Hüseyin Şanlı – Tekirdağ Namık Kemal University
Dr.İbrahim Aışkan – Zonguldak Bülent Ecevit University
Dr.İrem Karakoç – Dokuz Eylül University
Dr.İsmail Güneş – Çukurova University
Dr.Koray Kacan – Muğla Sıtkı Koçman University
Dr.Koray Karabulut – Sivas Cumhuriyet University
Dr.Mahmut Kayar – Marmara University
Dr.Medeni Aykut – Dicle University
Dr.Mehmet Cengiz Karaismailoğlu – Bartın University
Dr.Mehmet Dal – Kocaeli University
Dr.Melih Kuncan – Siirt University
Dr.Mert Gürkan – Çanakkale Onsekiz Mart University
Dr.Metin Leblebici – İstanbul Medeniyet University
Dr.Murat Bilgüven – Mersin University
Dr.Murat Eyvaz – Gebze Teknik University
Dr.Murat Özdal – Atatürk University
Dr.Mustafa Yılmaz – Gaziantep University
Dr.Nalan Demircioğlu Yıldız – Atatürk University
Dr.Nalan Kandırmaz – Mersin University
Dr.Nargiz İsmayilova – Azərbaycan Ulusal Bilimler Akademisi
Dr.Nazan Kavas – Ege University

Dr.Necmi Dege – Ondokuz Mayıs University
Dr.Neslihan Tamsü Selli – Gebze Teknik University
Dr.Neşe Üzen – Dicle University Ziraat Fakültesi
Dr.Neşet Deniz Turgay – Doğu Akdeniz University
Dr.Nurcan Özyurt Koçakoğlu – Gazi University
Dr.Nurgül Karadaş – Sağlık Bilimleri University
Dr.Nurhayat Atasoy – Van Yü Fen Fakültesi
Dr.Nuri Öztürk – Giresun University
Dr.Nurşen Çördük – Çanakkale Onsekiz Mart University
Dr.Nürettin Akçakale – Bolu Abant İzzet Baysal University
Dr.Oğuz Akın Düzgün – Atatürk University
Dr.Omer Celik – Dicle University
Dr.Orxan Bağrov – Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Naxçıvan Bölümü
Dr.Osman Vedüd Eşidir – Fırat University
Dr.Önder Kabaş – Akdeniz University
Dr.Övgü Ceyda Yelgel – Recep Tayyip Erdoğan University
Dr.Özgün Korukcu – Bursa Uludağ University
Dr.Özgür Cengiz – Van Yüzüncü Yıl University
Dr.Özgür Sağlam – Tekirdağ Namık Kemal University
Dr.Özlem Güngör – Gazi University Fen Fakültesi
Dr.Pınar Sanlıbaba – Ankara University
Dr.Reyhan Akat – Çevre İlliklilikliml
Dr.Samet Akar – Çankaya University
Dr.Süleyman Dirik – Amasya University
Dr.Şafak Seyhaneyıldız Can – Dokuz Eylül University
Dr.Yeşim Erdamar – Dicle University

ORGANIZERS COMMITTEE

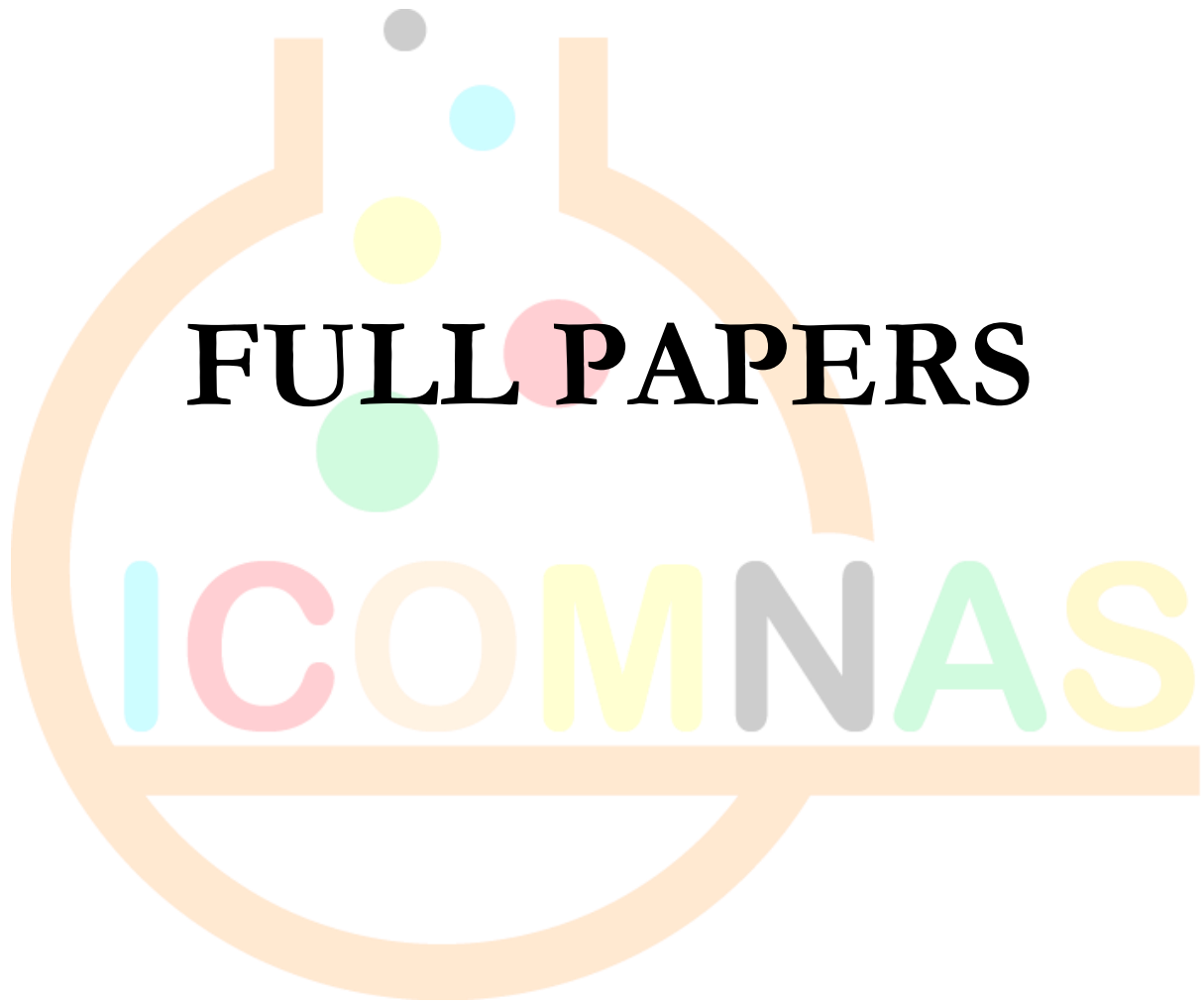
Dr. Hikmet Y. Coğun – Çukurova Üniversitesi
Dr. Ali Can Çabuker- Artvin Çoruh Üniversitesi
Dr. Teoman Efeoglu- Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi
Müh. Armağan Umut Alkan – Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi

Contents

ALG–BAKTERİ ve MANTARLARIN PLASTİK BİYOBOZUNUMUNDA KULLANIMI: BİYOLOJİK MEKANİZMALAR VE İSTATİSTİKSEL MODELLEME PERSPEKTİFİYLE BİR DERLEME	9
Aysu BESLER.....	9
Özlem GÜRÜNLÜ ALMA	9
Kişisel ve İşyeri Ortamı Solunabilir ve Toplam Toz Maruziyetlerinin Çok Ölçütlü Karar Verme Yaklaşımıyla Değerlendirilmesi	25
Ayşe ERİM	25
Ergün ERASLAN	25
<i>Elaeagnus angustifolia</i> L. as a Bioprotective Agent Against Methacrylate Toxicity	30
Aytül UZUN AKGEYİK.....	30
Svc, K-Nn Ve Mlp Algoritmaları İle Hepatit Hastalarının Yaşam Durumunun Öngörülmesi	45
Büşra KANDEĞERİ.....	45
İlkay Sibel KERVANCI	45
Performance Evaluation of Hargreaves and Allen Models for Solar Radiation Estimation in Dublin Using a 5-Year Dataset (2020–2024).....	55
Can EKİCİ	55
Makine İmalat Şirketinin Boyahane Bölümünde Metot Çalışmaları Kullanılarak Yapılan Bir Verimlilik Çalışması	62
Feyza Nur KESKİN.....	62
Muhammet Sefa GÖKTAŞ	62
Multi-Domain Feature Extraction and Band-Specific Analysis for EEG-Based Epilepsy Classification: A Comparative Machine Learning Approach	68
Hamed KAGHAZCHI	68
Müşteri Etkileşimlerinin Özetlenmesi ve Otomatik Kalite Değerlendirmesi: Pronet Çağrı Merkezi Durum Çalışması	76
İbrahim ŞAHAN.....	76
Suhap ŞAHİN.....	76
Osman Melih TOLUNAY	76
Salih ŞEKER	76
AHP (Analitik Hiyerarşi Süreci), Bulanık MOORA (Oran Analizine Dayalı Çok Amaçlı Optimizasyon) ve Bulanık TOPSIS (İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Sıra Tercihi Tekniği) Yöntemleriyle Akıllı Telefon Seçimi	84
Selin İNCEKUL	84
Tekstil Boyalarının Gideriminde Gram-pozitif ve Gram-negatif Bakterilerin Karşılaştırmalı Biyoremediasyon Potansiyeli	99
Şule Aybüke DİKİCİAŞIK.....	99
Gizem TALAŞ.....	99

Berkan SOLMAZ	99
İsa DÜZEL	99
Gökhan CORAL	99
Kalıp Çeliklerinde Talaşlı İmalat Analizi	116
Yalçın Şafak ŞEN	116
Hasan DEMİRTAŞ	116





ALG-BAKTERİ ve MANTARLARIN PLASTİK BİYOBOZUNUMUNDA KULLANIMI: BİYOLOJİK MEKANİZMALAR VE İSTATİSTİKSEL MODELLEME PERSPEKTİFİYLE BİR DERLEME

Aysu BESLER¹

Özlem GÜRÜNLÜ ALMA²

Özet

Plastik atıkların oluşturduğu küresel çevre tehdidinin her geçen yıl daha da artması, özellikle polietilen tereftalat (PET) gibi dayanıklı ve yaygın olarak kullanılan sentetik polimerler için alternatif bozunma yöntemlerinin araştırılmasını gerekli kılmaktadır. PET'in kimyasal ve fiziksel dayanıklılığı nedeniyle, doğal ortamlarda bozunma süresi yüzlerce yıla kadar uzayabilir ve bu da uzun vadeli kirlilik, toksik bileşik birikimi ve hem karasal hem de denizel ekosistemlerde ekosistem işlevlerinin bozulması gibi ciddi sonuçlara yol açabilir. Bu nedenle, biyolojik bozunma süreçleri PET atıklarının çevresel etkisini azaltmak için sürdürülebilir bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Mevcut literatürdeki çok sayıda çalışma, bakteri ve mantar türlerinin PET'i depolimerize eden enzimler üreterek PET bozunmasını hızlandırdığını gösterse de mikroalglerin PET bozunmasına yönelik potansiyel mekanizmaları ve katkıları nispeten az incelenmiştir. Mikroalglerin yüksek fotosentetik kapasitesi, biyofilm oluşturma kabiliyetleri ve esterazlar gibi hidrolitik enzimler üretme potansiyelleri, PET bozunmasında tamamlayıcı biyolojik ajanlar olabileceklerini düşündürmektedir. Bu çalışma, PET biyobozunmasında mikroalg, bakteri ve mantarlar tarafından oluşturulan mikrobiyal konsorsiyumların biyokimyasal, ekolojik ve istatistiksel yönlerini inceleyerek, özellikle mikroalg temelli yaklaşımların literatürdeki mevcut boşluğu nasıl doldurabileceğini tartışmaktadır. Ayrıca, çalışma, biyobozunma verilerinin değerlendirilmesinde kullanılan istatistiksel modelleme tekniklerini ele alarak kapsamlı bir disiplinlerarası bakış açısı sunmayı amaçlamaktadır. Bu bağlamda, çalışma, PET plastiklerinin biyobozunması üzerine gelecekteki araştırmalar için hem teorik hem de metodolojik bir temel sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: plastik biyobozunumu, mikroalg, mantar, bakteri, istatistiksel modelleme.

¹ Corresponding author: Dr.Öğr.Gör., Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Muğla, Türkiye, abesler@mu.edu.tr

² Prof. Dr., Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Fakültesi, İstatistik Bölümü, Muğla, Türkiye, ozlem.gurunlu@mu.edu.tr

1. Giriş

Küresel plastik üretimi 1950'lerden bu yana dramatik bir artış göstermiş ve 2015 yılı itibarıyla toplam üretim 8,3 milyar ton olarak hesaplanmıştır (Geyer vd.,2017). Plastiklerin kimyasal kararlılığı ve çevresel bozunmaya olan dirençleri, bu materyallerin doğal ortamlarda yüzyıllarca kalmasına neden olmaktadır. Modern yaşamın ayrılmaz bir parçası haline gelen plastik atıklar doğaya ciddi zararlar vermektedir. PET plastikler, dayanıklılıkları ve düşük maliyetleri nedeniyle yaygın kullanılan materyallerdir; ancak bozunmaları 450-500 yıla kadar uzayabilmektedir (Webb vd., 2013). Plastik bozunmasının bu denli yavaş olması, özellikle deniz ekosistemleri ve toprak yapısı üzerinde kalıcı çevresel etkiler yaratmaktadır.

Son yıllarda biyolojik yöntemlerle plastik bozunmasının hızlandırılmasına yönelik çalışmaların sayısı artmaktadır. Plastik atıkların biyolojik yöntemlerle parçalanması, sürdürülebilirlik açısından kritik bir öneme sahiptir ve ayrı bir araştırma alanı hâline gelmiştir. Mikroalgler, bakteriler ve mantarlar gibi mikroorganizmalar plastik polimerlerini hidrolitik ve oksidatif mekanizmalarla modifiye edebilmekte ve parçalayabilmektedir (Shah vd.,2008; Urbanek vd.,2018). Yapılan araştırmalarda çeşitli bakteri ve mantar türlerinin PET bozunmasını hızlandırabildiği gösterilmiştir, (Awasthi vd., 2020). Ancak mikroalglerin PET bozunmasındaki rolü sınırlı sayıda çalışma ile incelenmiştir. Algler, yüksek fotosentetik aktivite, dayanıklılık ve metabolik çeşitlilikleri nedeniyle biyoteknolojik çalışmalarda sıkça kullanılmaktadır (Park vd., 2019). Alg türlerinin PET polimer yüzeyine tutunabilen ve polimeri zayıflatan enzimler üretebileceği yönünde teorik temeller bulunmaktadır (Bhattacharya & Gupta, 2021).

Bu çalışmada ele alınan konular şu bölümlerde incelenmiştir: 2. Plastik Polimerlerin Yapısal Özellikleri ve Biyobozunabilirlik Kavramı, 3. Mikroalglerin Plastik Biyobozunumundaki Rolü, 4. Bakterilerin Plastik Biyobozunumundaki Rolü, 5. Mantarların Plastik Biyobozunumundaki Rolü, 6. Literatürdeki Verilerin İstatistiksel Değerlendirilmesi, 7. Plastik Biyobozunumu İçin İstatistiksel Modelleme Yaklaşımları, 8. Deneysel Tasarım ve Minimum Raporlama Gereklilikleri ile 9. Tartışma ve Sonuç.

2. Plastik Polimerlerin Yapısal Özellikleri ve Biyobozunabilirlik Kavramı

Ahşap, cam ve metal gibi geleneksel malzemelerin sınırlamalarını aşmak için geliştirilen plastikler, hafiflik, düşük maliyet, kolay şekillendirilebilirlik, korozyon ve kimyasal direnç, iyi ısı ve elektrik yalıtımı, hijyenik ambalajlama ve uzun ömür gibi avantajları sayesinde petrol türevi hammaddelerden üretilen çok yönlü malzemelerdir. Bu özellikler, onları endüstriyel seri üretime uygun, çeşitli uygulamalara uyarlanabilir ve büyük ölçekte ekonomik çözümler sunan alternatif bir malzeme grubu haline getirmiştir.

Ticari amaçlarla kullanılan plastikler polimerik malzeme türüne göre farklı gruplara ayrılır. Bunların en yaygın kullanılanları Polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS), polivinil klorür (PVC) ve polietilen tereftalat (PET) plastikleridir. Plastiği günlük kullanım için cazip kılan belirgin özellikler aynı zamanda gezegenin sürdürülebilirliğini tehdit etmektedir. Plastiklerin doğada stabil olmaları ve degradasyona yani parçalanmaya, ayrışmaya dayanıklı olmaları en önemli dezavantajlarıdır (Wei ve Zimmermann,2017).

Plastik atıkları ortadan kaldırmak için kullanılan mevcut yöntemler (yakma, depolama ve geri dönüşüm) büyük maliyetlere sahiptir ve çevreye daha fazla kirlilik yükü bindirmektedir. Plastik atıkların yalnızca %10'unun geri dönüştürüldüğü, %14'ünün yakıldığı ve geri kalanının çöplüklere dökülerek nihayetinde doğal çevreye karıştığı tahmin edilmektedir. Bu nedenle, son

zamanlarda sentetik plastikleri parçalamak için biyolojik sistemlerin potansiyeline daha fazla odaklanılmıştır (Cai vd., 2023). Sentetik plastikler birçok fiziksel, kimyasal ve biyolojik faktöre karşı yüksek direnç gösterirler. Ancak bu dayanıklılık, plastiklerin biyobozunabilirlik sürecinin yavaş olmasına neden olmaktadır. Sentetik polimerlerin yapısal özellikleri (kimyasal bağ tipleri, hidrofobiklik, kristallik derecesi, yüzey topografyası ve moleküler boyutu vb.) biyolojik olarak parçalanabilirliklerini kısıtlayan önemli faktörlerdir (Wei ve Zimmermann, 2017).

Plastik atıkların biyolojik olarak parçalanması, birçok çevre sorununu çözmek için önemli bir araştırma alanıdır. Mikrobiyal parçalanmada; mikrobiyal biyofilm oluşumu, biyolojik bozulma, biyofragmentasyon ve mineralizasyon adımları yer almaktadır. Mineralizasyon aşamasında polimerler tamamen bozularak CO₂, H₂O ve CH₄ gibi nihai ürünlerin açığa çıkmasına neden olur ve mineralizasyon seviyelerine bağlı olarak biyolojik bozunma hızlarının tam ilerlemesi ölçülebilir, (Ganesh Kumar vd., 2020). Plastiklerin bozunma kanıtı olarak, yapısındaki değişiklikler, kütesinin fiziksel kaybı, metabolitlerinin oluşumu değerlendirilmektedir. Bu birleşik sonuçlar, plastiklerin biyolojik bozunumuna dair muhtemelen en güçlü kanıtlardır (Cai vd., 2023).

Plastiklerin biyolojik bozunumunda, çeşitli mikrobiyal türler içeren çok popülasyonlu sistemler birlikte kullanılmaktadır. Mikrobiyal konsorsiyum kullanmanın gerekçesi, farklı mikroorganizmaların farklı metabolik yollar kullanması ve farklı plastik malzemelerle kültürlendiklerinde farklı oksidatif enzimler ifade etmesi ve bu kombinasyonun daha etkili mikrobiyal bozunmaya olanak sağlaması gerektiğidir. PET, PCL ve PLA gibi ester bağları içeren polimerler hidrolitik enzimlere daha duyarlıyken; ve PE ve PP gibi doymuş hidrokarbon yapılı polimerlerde bozunum daha sınırlıdır. Plastiklerin biyobozunabilirliği, kimyasal bağ tipleri, hidrofobiklik, kristalizasyon derecesi ve moleküler ağırlık gibi yapısal özelliklerle yakından ilişkilidir (Wei ve Zimmermann, 2017). PET, PCL ve PLA gibi ester bağları içeren polimerler hidrolitik enzimlere daha duyarlıyken; PE ve PP gibi doymuş hidrokarbon yapılı polimerlerde bozunum daha sınırlıdır.

Bu farklılıklar, istatistiksel analizlerde polimer türünün bağımsız bir değişken olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir (Montazer vd., 2020). Bağımsız değişken polimer türü ise, biyobozunabilirlik ölçümlerine dayalı bağımlı değişkenler ise şu şekilde olabilir:

- Kütle kaybı (%): Polimerin belirli bir süre sonunda kaybettiği ağırlık.
- CO₂ veya CH₄ oluşumu (mg / g polimer): Aerobik/anaerobik bozunma testlerinde ölçülen mineralizasyon miktarı.
- Moleküler ağırlıkta azalma (Mn veya Mw değişimi): GPC analizleriyle takip edilir ve polimer zincirlerinin kırılma düzeyini gösterir.
- Mekanik özelliklerde düşüş: Biyobozunma sonucu polimerin zayıflamasının (çekme mukavemeti, elastikiyet modülü) ölçümü.
- Termal özelliklerde değişim: DSC/TGA ile bozunma kaynaklı yapısal değişimlerin (T_g, T_m, kristalizasyon derecesi) takibi.
- Yüzey morfolojisindeki değişim: Degradasyonun yüzey etkilerinin ölçülmesi (SEM skorlaması, pürüzlülük).
- Enzimatik bozunma hızı (mg gün⁻¹): Özellikle ester bağları içeren polimerler için kullanılır.

Ayrıca çalışmada çevresel faktörlerin etkisi inceleniyorsa çevresel koşullara dayalı olarak aşağıda belirtilen bağımlı değişkenler de incelenebilir.

- pH değişimleri,
- Organik karbon salınımı,

- Oksijen tüketimi (BOD),
- Mikrobiyal büyüme/enzim aktivitesi.

3. Mikroalglerin Plastik Biyobozunumundaki Rolü

Mikroalgler, ökaryotik protistler ve prokaryotik siyanobakterileri içeren, tek hücreli veya çok hücreli mikroorganizmalardır. Ökaryotik mikroalgler diatomları ve yeşil algleri içerirken , prokaryotik mikroalgler olarak adlandırılan grup siyanobakterileri içermektedir (Junior vd., 2020). Fotoototrof ve minimum besin gereksinimleri olduğu için mikroalglerin diğer mikrobiyal hücrelere kıyasla avantajları vardır. Bu hücrelerin çeşitli endüstriyel uygulamalar için enzim sentezleme konusunda potansiyelleri çalışmalarda gösterilmiştir. Fotosentetik mikroorganizmalardan türetilen enzimler arasında selülaazlar, galaktozidazlar, proteazlar, lipazlar, fitazlar, lakkazlar, amilazlar, antioksidan enzimler ve karbonhidrat birikimi ve karbon konsantrasyonu ile ilişkili enzimler bulunmaktadır (Brasil vd., 2017).

Mikroalgler, yüzeylere tutunarak biyofilm oluşturma yetenekleri sayesinde plastik yüzey modifikasyonunda önemli rol oynarlar. Özellikle; Chlorella, Scenedesmus ve Chlamydomonas türleri plastik yüzeylere bağlanarak yüzey oksidasyonunu başlatabilmektedir (Hadiyanto vd., 2022). Mikroalgler, plastik polimerlerini karbon kaynağı olarak kullanabilir ve sentezledikleri enzimler plastik malzemeleri parçalayabilir. Özellikle ürettikleri esteraz ve lipaz gibi enzimler, polimer yüzeyinde mikro çatlaklar oluşturarak bakteriyel kolonizasyonu kolaylaştırır. Enerji üretimi (oksijenasyon) ve salgıladıkları organik karbon bileşikleri nedeniyle algler, bakteriyel ve fungal bozunmayı destekleyen ekolojik bir mikro ortam yaratır.

4. Bakterilerin Plastik Biyobozunumundaki Rolü

Bakteriler, zarla çevrili organelleri olmayan prokaryotik hücrelerdir. Bu hücreler, fiziksel ve kimyasal çevreleriyle yakın temas halindedir. Prokaryotlar, ökaryotların daha karmaşık hücrelerine kıyasla çevresel koşullardaki değişikliklere çok daha hızlı yanıt verir ve bu değişikliklerden çok daha fazla etkilenirler (Killham ve Prosser, 2015).

Bakteriler, plastik polimerlerin depolimerizasyonunda temel aktörlerdir. Ideonella sakaiensis tarafından üretilen PETaz ve MHETaz enzimleri PET bozunumunda çığır açan örneklerdir (Mohan N., vd., 2020). Pseudomonas sp., Bacillus sp. ve Rhodococcus sp. türleri çok çeşitli depolimeraz ve oksidaz enzimleri salgılayarak polimerleri monomerlerine kadar parçalayabilir.

Bakterilerin bozunma performansını etkileyen faktörler arasında pH, sıcaklık, karbon kaynağı ve plastik yüzey morfolojisi yer alır.

5. Mantarların Plastik Biyobozunumundaki Rolü

Mantarlar, ökaryotik hücre özelliği gösteren, klorofili bulunmayan hücrelerdir. Bu hücreler, ölü veya canlı kaynaklardan organik maddeleri ayrıştırıp emerek yaşarlar. Doğadaki birçok mantarın kritik rolü, ölü bitkilerin besinlerini parçalamak ve geri dönüştürmektir. Mantarların ayırt edici bir özelliği, böcek dış iskeletine benzeyen kitin içeren hücre duvarlarının yapısıdır. Mantarlar, tomurcuklanarak çoğalan tek hücreli mayalardan, çok hücreli filamentler (hifler) üreten küflere kadar uzanan geniş bir ökaryotik hücre grubunu oluştururlar (Walker, 2014).

Mantarlar, oksidatif enzim repertuarının genişliği sayesinde plastik bozunumunda en güçlü mikrobiyal aktörlerden biridir. Laktaz, peroksidaz, kutinaz ve esteraz gibi enzimler polimer zincirlerini okside ederek hidrofobik yapıların su alımını artırır (Khan vd., 2017).

Aspergillus sp., *Fusarium* sp., *Penicillium* sp. gibi türler yaygın olarak incelenmiş ve özellikle poliüretan, polietilen ve poliester bozunumunda etkinlik göstermiştir (Temporiti, M.E., vd., 2022).

Konsorsiyum tabanlı yaklaşımlar, tek türlü sistemlere kıyasla daha yüksek bozunma oranları sağlamaktadır. Algler oksijen ve karbon kaynağı sağlarken, bakteriler hidrolitik enzimlerle depolimerizasyonu başlatır; mantarlar ise güçlü oksidatif enzimlerle polimer yüzeyini zayıflatır. Bu sinerjik ilişkiler çok faktörlü istatistiksel modellerle daha iyi açıklanmaktadır.

6. Literatürdeki Verilerin İstatistiksel Değerlendirilmesi

6.1 Veri Standartlaştırma Sorunları

Plastik bozunumu çalışmalarında farklı zaman ölçekleri, sıcaklıklar ve metrikler kullanıldığından ham veriler doğrudan karşılaştırılmaz. Bu nedenle bozunma verilerinin normalize edilmesi önerilmektedir (Montazer vd.,2020). Plastiklerin biyolojik olarak parçalanması üzerine yapılan araştırmalardaki temel engellerden biri, izole edilmiş mikropların ve ilgili enzimlerinin plastik parçalanma yeteneklerini doğru bir şekilde değerlendirmek ve karşılaştırmak için standartlaştırılmış bir metodolojinin olmamasıdır. Biyolojik parçalanmayı ölçmek için ağırlık kaybı, biyofilm oluşumu ve çekme mukavemetinin azaltılması gibi çeşitli yaklaşımlar benimsenmiştir. Ancak, bu çeşitlilik, plastik biyolojik parçalanması üzerine yapılan çeşitli çalışmalarda bulguları karşılaştırmak için evrensel olarak kabul görmüş bir çerçevenin eksikliğine yol açmıştır. Biyofilm oluşumu ve mineralizasyon hızı gibi niceliksel yaklaşımlar yalnızca tüm hücre biyokatalizörlerini içeren çalışmalar için geçerlidir. İzole edilmiş enzimlerin doğrudan kullanımı, polimerlerin yüzeyinde biyofilm oluşumuna veya karbonizasyona neden olmaz. Ek olarak, plastik numunelerin çeşitli formlara (filmler, peletler ve toz) işlenmesi, biyolojik bozunma süresi ve ön işlem yöntemleri gibi prosedürel yönlerdeki farklılıklar, izole mikrobiyal türler arasında plastik bozunma kabiliyetlerinin karşılaştırılmasını zorlaştırmaktadır, (Roy, A., Chakraborty, S., 2024).

6.2 Etki Büyüklüğü Yaklaşımları

Biyobozunma araştırmalarında, özellikle mikroalg-bakteri-mantar konsorsiyumlarının PET bozunması üzerindeki etkilerini değerlendiren çalışmalarda, yalnızca istatistiksel anlamlılık düzeyine (p-değeri) odaklanmak genellikle yetersizdir. Çeşitli deneysel tasarımlar, değişken örneklem büyüklükleri ve heterojen biyolojik tepkiler nedeniyle, karşılaştırılabilir ve yorumlanabilir sonuçlar sağlayan etki büyüklüğü metriklerinin raporlanması kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, Cohen'in d ve Hedges'in g gibi standartlaştırılmış ortalama fark ölçütleri, hem bireysel çalışmaların bulgularının gücünü değerlendirmek hem de meta-analizler için kaliteli veri sağlamak için önemli araçlar sunar. Böylece, etki büyüklüğü ölçümleri farklı deney tasarımlarına sahip çalışmaların kıyaslanmasını mümkün kılar (Borenstein vd.,2021, Lakens, D., 2013).

Cohen'in d, iki grubun ortalamaları arasındaki farkın standart sapmaya bölünmesiyle hesaplanan bir ölçüdür ve özellikle kontrol deneyi karşılaştırmalarına dayanan biyobozunma deneylerinde yaygın olarak kullanılır. Mikroalg bazlı biyolojik bozunma stratejilerinin PET polimer bütünlüğü, yüzey oksidasyonu, plastik ağırlık kaybı veya karbon kaybı üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalarda, farklı organizma yoğunlukları veya farklı ışık/karbon kaynakları gibi çevresel koşulların etkisi, Cohen'in d katsayısı uygulandığında daha objektif ve karşılaştırılabilir bir şekilde değerlendirilebilir. Ancak, Cohen'in d katsayısı küçük örneklerle

yürütülen çalışmalarda (örneğin, sınırlı kültür hacimlerine veya nadir mikroalg türlerine dayalı çalışmalarda) yukarı doğru eğilimli olabileceğinden, örneklem büyüklüğü için bir düzeltme içeren Hedges'in g kriteri daha güvenilir sonuçlar sağlar (Hedges ve Olkin, 1985). Tekrarlanan deney sayısı düşük olabileceğinden, Hedges'in g katsayısı, PET biyolojik bozunmasında rekombinant enzimler ifade eden yeni geliştirilen mikroalg izolatlarını veya suşlarını değerlendiren çalışmalarda özellikle tercih edilmelidir.

Etki büyüklüğü metrikleri yalnızca ortalama farkların karşılaştırılmasını sağlamakla kalmaz; Ayrıca, farklı biyolojik bozunma göstergelerinin (kütle kaybı, FTIR pik değişimleri, yüzey pürüzlülüğü, enzimatik aktivite vb.) ortak bir metrik aracılığıyla ilişkilendirilmesine olanak tanır. Bu, mikroalg temelli yaklaşımların diğer mikrobiyal konsorsiyum bileşenleriyle karşılaştırılmasında disiplinler arası değerlendirmeler için daha güçlü bir istatistiksel temel oluşturulmasına katkıda bulunur. Dahası, etki büyüklüklerinin meta-analiz modellerine entegre edilmesi, farklı ekosistem koşullarında PET biyolojik bozunmasıyla ilgili bulguların sentezlenmesine olanak tanır ve gelecekteki çalışmalar için hem teorik hem de metodolojik yönler sağlar (Cumming, 2012).

Plastik biyobozunması deneylerinde genellikle şu tasarım kullanılır: her bir plastik örneği deney başlangıcında tartılır, plastik örneği mikroalglerle (deney) veya yalnızca ortama (kontrol) maruz bırakılır ve belirli bir sürenin sonunda tekrar tartılır. Bu deneylerde ağırlık kaybı biyolojik bozunmanın temel göstergesi olarak yorumlanır. Bu durumda etki büyüklüğü, alg, bakteri veya mantar uygulamalarının kontrol gruplarına göre ne kadar daha fazla plastik bozunmasına yol açtığını nicel olarak gösterir. Bu araştırmalarda etki büyüklüklerinin önemi aşağıdaki maddeler de belirtilmiştir, (Cumming, G., 2012).

- *Salt istatistiksel anlamlılıktan daha fazlasını gösterir.* Bir fark anlamlılık düzeyi $p < 0.05$ için anlamlı olabilir ancak biyolojik olarak çok küçük olabilir. Etki büyüklüğü, farkın “ne kadar büyük” olduğunu ortaya koyar.
- *Standartlaştırılmış karşılaştırma sağlar.* Ağırlık kaybı %0.3 mü arttı, %1.2 mi? Farklı deneylerde birimler değişebilir. Etki büyüklüğü birimsizdir, doğrudan karşılaştırılabilir.
- *Kontrol ve deney grubunun başlangıç ölçümlerini hesaba katabilir.* “Önce–sonra” ölçümler kullanıldığında, plastiklerin başlangıç ağırlığı farklı olsa bile etki büyüklüğü standartlaştırılmış farkı verir.
- *Biyobozunma süreçlerinin biyolojik gücünü gösterir.* Mikroalg-bakteri-mantar kullanmanın gerçekten fark yaratıp yaratmadığını sadece p-değeri değil, d ve g gibi etki büyüklüğü göstergeleri belirler.

Örneğin, mikroalg, bakteri veya mantarların kullanıldığı bir plastik biyobozunum deneyinde ilgilenilen değişken deney öncesi ve sonrası plastik ağırlıklarında ki değişim ise böyle bir deneyde her plastik için ağırlık kaybı aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanır.

$$\text{Kütle Kaybı}(\%) = \frac{W_0 - W_1}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

Burada, W_0 : Plastik başlangıç ağırlığı, W_1 : Deney sonu plastik ağırlığı olup her örnek için ağırlık kaybı hesaplanır. Kontrol grubunun ağırlık kaybı ortalaması M_2 , deney grubunun ağırlık kaybı ortalaması M_1 ile gösterilsin. Önce-sonra deney tasarımları için gruplar arası ağırlık kayıpları üzerinden Cohen's d ve Hedges g etki ölçüleri aşağıda verildiği gibi hesaplanır.

- Cohen's d, iki grubun ortalamaları arasındaki farkı, ölçümlerin standart sapması ile normalize ederek birimsiz hale getirir. Yani farkın ne kadar büyük olduğunu standart sapma cinsinden ifade eder, (Cohen, J., 1988).

$$d = \frac{M_1 - M_2}{s_{pooled}}$$

$$s_{pooled} = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (2)$$

Eşitlik 2'de kullanılan sembollerin anlamları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Cohen's d hesaplanmasında kullanılan semboller ve anlamları.

Sembol	Anlamı	Detay
M_1	Deney grubunun ortalaması	Mikroalg uygulanan plastik örneklerdeki ağırlık kaybı ortalaması
M_2	Kontrol grubunun ortalaması	Mikroalg uygulanmamış kontrol örneklerinin ağırlık kaybı ortalaması
s_{pooled}	Birleştirilmiş standart sapma	Deney ve kontrol grubunun ölçümlerindeki değişkenliği birlikte temsil eden standart sapma
n_1	Deney grubu örnek sayısı	Kaç plastik örneği mikroalg ile çalışıldı
n_2	Kontrol grubu örnek sayısı	Kaç plastik örneği kontrol olarak tutuldu
s_1	Deney grubunun standart sapması	Mikroalg grubundaki ölçümlerin yayılımı
s_2	Kontrol grubunun standart sapması	Kontrol grubundaki ölçümlerin yayılımı

- Hedges g özellikle küçük örneklem sayılarında Cohen's d'nin fazla büyük çıkmasını önler ve etki büyüklüğünü daha güvenilir hale getirir, (Hedges, L. V., 1981).

$$g = J \cdot d$$

$$J = 1 - \frac{3}{4(df) - 1}, \quad df = n_1 + n_2 - 2 \quad (3)$$

Eşitlik 3'de kullanılan sembollerin anlamları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Hedges g'nin hesaplanmasında kullanılan semboller ve anlamları.

Sembol	Anlamı
g	Hedges g
d	Cohen's d
J	Küçük örneklem düzeltme katsayısı
df	Serbestlik derecesi

Örneğin, deney grubu ağırlık kaybı ortalaması: 2.1%, standart sapması 0.4 ve kontrol grubu ağırlık kaybı ortalaması: 0.8%, standart sapması 0.2 olsun. Her grupta 8 örnek olduğunu varsayalım. Bu durumda, Cohen's d, gruplar arasındaki farkın standart sapma cinsinden büyüklüğünü gösterir ve 4.11 gibi çok büyük bir etkiyi ifade eder. Hedges g etki büyüklüğü ise, küçük örneklem düzeltmesi ile bu değeri biraz düşürür (3.88), ama hâlâ olağanüstü büyük etkiyi ifade eder. Cohen's d = 4.11 iki grup ortalaması arasındaki farkın standart sapma birimleri cinsinden büyüklüğünü gösterir. Yani, deney grubundaki ağırlık kaybı, kontrol grubundaki ağırlık kaybının yaklaşık 4 standart sapma üzerinde. Bu değer çok yüksek; Cohen'in önerdiği standartlara göre:

- 0.2 → küçük,
- 0.5 → orta,
- 0.8 → büyük,
- 2.0+ → çok büyük etki olarak ifade edilir.

4.11 değeri olağanüstü büyük bir etkiyi göstermektedir. Yani deney uygulaması gerçekten PET plastiklerinin ağırlık kaybını dramatik şekilde artırmaktadır. Hedges g = 3.88 değeri küçük örneklem için Cohen's d'nin biraz abartılı olmasını düzelttiği için, bu durumda 4.11 → 3.88 etki değeri elde edilir. Etki değeri biraz küçülmüş olsa bile hâlâ çok büyük bir etkiyi belirtir. Küçük örneklem düzeltmesi yapılmazsa etki büyüklüğü hafifçe şişirilmiş olur o nedenle Hedges g bunu düzeltir ve etkinin daha anlamlı olmasını sağlar. Sonuç olarak, deney grubunda uygulanan yöntemin etkisinin çok güçlü olduğunu belirtir. Deney grubu, kontrol grubuna göre PET plastiklerde daha fazla biyobozunma (ağırlık kaybı) yaratıyor anlamına gelmektedir. Etki büyüklüğü çok büyük olduğu için farkın rastlantı veya örneklem hatasından kaynaklanması olası değildir. Alg-bakteri veya mantar uygulamasının plastiklerin bozunmasını gerçekten artırmaktadır ve bu fark, hem istatistiksel olarak hem de biyolojik olarak anlamlı olduğunu belirtir. Cohen's d ve Hedges g, sadece "istatistiksel olarak farklı mı?" sorusuna değil, farkın büyüklüğü ve biyolojik önemi hakkında da bilgi verir. Buradaki değerler, mikroalglerin PET biyobozunması üzerinde çok güçlü ve belirgin bir etkisi olduğunu gösterir.

6.3 Heterojenlik ve Yayın Yanlılığı

Biyobozunum çalışmalarında plastik türü, organizma tipi ve koşullar arasındaki çeşitlilik önemli heterojenlik yaratır. Ayrıca, çalışmalar arasında yayın yanlılığının varlığı da rapor edilmiştir (Danso vd.,2019). Mikroalglerin plastik biyobozunması üzerindeki etkisi, özellikle PET polimerleri gibi dayanıklı plastikler üzerinde yapılan kontrollü deneylerle incelenmektedir. Deney tasarımları genellikle plastik örneklerin başlangıç ağırlıklarının ölçülmesi, mikroalg uygulanması veya kontrol koşullarında tutulması ve belirli bir süre sonunda tekrar tartılması üzerine kuruludur. Plastiklerin ağırlık kaybı, biyolojik bozunmanın

temel göstergesi olarak kullanılmaktadır (Tokiwa, Calabia, Ugwu, & Aiba, 2009). Ağırlık kaybı, literatürde yaygın olarak Eşitlik 1 ile hesaplanır, (Gewert, Plassmann, MacLeod, 2015; Kale et al., 2007).

Mikroalg uygulamasının kontrol grubuna göre etkisini nicel olarak değerlendirmek için Cohen's d ve Hedges g yaygın olarak kullanılmaktadır. Etki büyüklükleri sadece istatistiksel anlamlılığı değil, biyolojik önem düzeyini de gösterir. Ölçümlerin birimlerinden bağımsız olarak standartlaştırılmış bir karşılaştırma sağlar. Kontrollü deneylerde başlangıç ölçümlerindeki farklılıkları dikkate alır ve uygulanan müdahalenin gerçek etkisini yansıtır (Lakens, 2013).

Literatürde plastik biyobozunma çalışmalarında heterojenlik ve yayın yanlılığı önemli istatistiksel konular olarak öne çıkar. Heterojenlik, farklı çalışmalarda elde edilen sonuçların birbirinden ne kadar farklı olduğunu gösterir. Plastik türü, organizma tipi ve deney koşullarındaki farklılıklar heterojenliğe yol açabilir. Meta-analizlerde heterojenlik genellikle I^2 veya Q testi ile ölçülür; yüksek heterojenlik, sonuçların yalnızca rastlantısal farklardan kaynaklanmadığını gösterir. Yayın yanlılığı ise pozitif veya anlamlı sonuçların literatürde daha sık yer alması durumunu ifade eder. Danso ve arkadaşları (2019), mikroalg bazlı biyobozunma çalışmalarında bazı çalışmaların yalnızca olumlu sonuçları rapor ettiğini belirlemişlerdir. Bu durum, literatürde etki büyüklüğünün olduğundan yüksek görünmesine yol açabilir. Funnel plot ve Egger testi gibi yöntemlerle yayın yanlılığı değerlendirilir ve meta-analiz yorumlanırken dikkatle ele alınır. Mikroalglerin PET plastikleri üzerindeki biyobozunma etkisi, ağırlık kaybı ölçümleri ve standartlaştırılmış etki büyüklükleri kullanılarak objektif bir şekilde değerlendirilebilir. Cohen's d ve Hedges g, sadece farkın istatistiksel anlamlılığını değil, biyolojik önemini de ortaya koyar. Bununla birlikte, çalışmalar arasındaki heterojenlik ve olası yayın yanlılığı, literatürden çıkarılan genel sonuçların yorumlanmasında dikkatli olunmasını gerektirir.

7. Plastik Biyobozunumu İçin İstatistiksel Modelleme Yaklaşımları

Malik, Maurya, Khare ve Srivastava (2023), çeşitli plastik türlerine ilişkin literatürde raporlanan mikrobiyal biyobozunma verilerini istatistiksel yöntemler kullanarak analiz etmiş ve plastiklerin kimyasal sınıflandırmaları ile biyobozunma paternleri arasındaki ilişkileri sistematik olarak incelemiştir. Araştırmada ilk olarak plastiklerin biyobozunma özelliklerine göre nasıl gruplanabileceğini belirlemek amacıyla kümeleme analizi (cluster analysis) uygulanmıştır. Bu analiz sonucunda plastik türleri, moleküler omurgaları temel alınarak iki ana kümeye ayrılmıştır: C-C (hidrolize olmayan, karbon-karbon omurgalı plastikler) ve C-X (hidrolize olabilen, karbon-heteroatom içeren plastikler). Bu sınıflandırma, kimyasal yapı ile mikrobiyal bozunabilirlik arasındaki yapısal ilişkinin istatistiksel olarak ortaya konmasını sağlamıştır (Malik vd., 2023). Ayrıca bu iki plastik grubunun mikrobiyal düzeyde farklı biyobozunma paternleri gösterip göstermediğini değerlendirmek üzere grup karşılaştırma testlerinden yararlanmıştır. Makalede test türü açıkça belirtilmemekle birlikte, bu tür kategorik veri analizlerinde sıklıkla Ki-kare testi, Fisher'in kesin testi veya dağılımın koşullarına bağlı olarak non-parametrik ikili karşılaştırma testleri (ör., Mann-Whitney U testi) kullanılmaktadır. Malik ve arkadaşları (2023), C-C ve C-X plastik gruplarının mikrobiyal bozunma raporları arasında istatistiksel açıdan anlamlı farklılıklar bulunduğunu göstermiştir.

Buna ek olarak araştırmada, belirli mikroorganizma cinslerinin plastik bozunmasında beklenenden daha fazla raporlanıp raporlanmadığını belirlemek amacıyla cins zenginlik analizi (genus enrichment analysis) gerçekleştirilmiştir. Bu tür analizlerde genellikle hipergeometrik

test veya Fisher’ın kesin testi kullanılarak belirli cinslerin (örneğin *Pseudomonas* ve *Bacillus* bakterileri ile *Aspergillus* ve *Penicillium* fungusları) belirli plastik gruplarında istatistiksel olarak anlamlı düzeyde temsil edildiği saptanır. Malik vd., (2023) de benzer şekilde bu mikroorganizmaların karışık plastik türlerinin biyobozunması için potansiyel biyolojik ajanlar olabileceğini ortaya koymuştur.

Malik ve arkadaşlarının (2023) yapmış olduğu çalışma istatistiksel yöntemler açısından bütüncül olarak değerlendirildiğinde, araştırmacıların plastik türleri ile mikrobiyal biyobozunma süreçleri arasındaki ilişkileri bilimsel olarak tanımlamak üzere çok boyutlu bir analiz çerçevesi kullandıkları görülmektedir.

7.1. Regresyon Modelleri

Çoklu regresyon modelleri, çeşitli çevresel ve biyolojik faktörlerin mikroplastik veya polimer bozunma süreçleri üzerindeki etkisini nicel olarak değerlendirmek için kullanılır. Bu modeller, mikroorganizma türü, sıcaklık, zaman, pH ve başlangıç polimer özellikleri gibi bağımsız değişkenlerin bozunma yüzdesi üzerindeki göreceli etkilerini belirlemede özellikle etkilidir. Ogunola ve Palanisami (2016), plastik bozunmasının çevresel koşullardan güçlü bir şekilde etkilendiğini göstermek için regresyon analizini kullanırken, Montazer ve ark. (2020), optimizasyon amacıyla sıcaklık ve zaman gibi faktörlerin bozunma kinetiği üzerindeki istatistiksel önemini ortaya koymuştur. Regresyon modelleri, farklı faktörlerin etkileşim terimlerini test etme fırsatı sağlayarak bozunma mekanizmalarının anlaşılmasına katkıda bulunur.

7.2. Çok Değişkenli Analiz (PCA ve Kümeleme)

Deneyisel bozunma verilerinin çok boyutluluğu, araştırmacıları boyut azaltma tekniklerine yönlendirmektedir. Bozunma verilerindeki baskın varyasyon bileşenlerini ortaya çıkarmak için Temel Bileşen Analizi (PCA) sıklıkla kullanılır. Elsayad vd., (2020), polimer bozunma parametreleri arasında yüksek korelasyona sahip değişkenleri daha basit bileşenlere dönüştürerek sistemin temel yapısını tanımlamıştır. Buna paralel olarak, farklı mikroorganizma türleri veya enzimatik aktiviteler arasındaki benzerlikleri sınıflandırmak için kümeleme analizleri kullanılmış ve böylece bozunma kapasitesine göre gruplandırılmış tür profilleri oluşturulmuştur (Fernandez vd., 2025). Bu tür çok değişkenli analizler, biyolojik bozunma çalışmalarında tür-özellik ilişkilerinin sistematik olarak değerlendirilmesine olanak tanır.

7.3. Makine Öğrenmesi Modelleri

Son yıllarda, plastik bozunma tahmini ve optimizasyonu için makine öğrenmesi algoritmalarının kullanımı artmıştır. Elsayad vd., (2020), bozunma verilerinin doğrusal olmayan yapısını yakalamak için yapay sinir ağlarını (YSA) kullanmış ve klasik istatistiksel modellere kıyasla daha yüksek tahmin doğruluğu elde etmişlerdir. Ayrıca, rastgele ormanlar ve karar ağaçları gibi açıklanabilir modeller, bozunmayı etkileyen faktörlerin önemini belirlemede avantajlar sağlamaktadır. Lin ve Zhang (2025) tarafından yapılan çalışmalar, bu modellerin farklı çevre koşulları ve mikroorganizma türleri altında bozunma oranlarını yüksek doğrulukla tahmin edebileceğini göstermektedir. Makine öğrenimi yöntemleri, biyolojik bozunma süreçlerinin modellenmesinde güçlü bir karar destek aracı haline gelmiştir.

7.4. Doz-Tepki Modelleri ve Enzim Kinetiği

Polietlen tereftalat (PET) bozunmasında rol oynayan PETASE ve çeşitli fungal poliesteraazlar, enzimatik süreçleri nicel olarak değerlendirmek için kinetik modellere tabi tutulmuştur. Danso ve arkadaşları (2018), bu enzimlerin substrat konsantrasyonuna bağlı aktivitesini açıklamak için Michaelis-Menten kinetiği ve doğrusal olmayan regresyon modellerini kullanmıştır. Bu modeller, V_{max} ve K_m gibi kinetik parametrelerin hesaplanmasına olanak tanıyarak enzimlerin aktivitesini ve özgüllüğünü karşılaştırmayı mümkün kılar. Doz-tepki analizleri, enzim bolluğunun bozunma hızları üzerindeki etkisini değerlendirerek optimum enzim konsantrasyonlarının belirlenmesini sağlar. Bu yaklaşım, biyokatalitik bozunmanın mekanik yönlerini anlamak için kritik öneme sahiptir.

Baldera-Moreno ve arkadaşlarının (2022) çalışmasında, plastiklerin biyodegradasyon süreçlerini anlamak amacıyla farklı matematiksel modeller sistematik olarak derlenmiştir. Çalışmada, Michaelis-Menten kinetiği, enzimatik biyodegradasyon süreçlerinde substrat yoğunluğunun reaksiyon hızına etkisini nicel olarak modellemek için incelenmiştir; bu model, plastiklerin enzimler aracılığıyla parçalanma kinetiğini tahmin etmede temel bir araç olarak kullanılır. Buna ek olarak, M-M varyantları (inhibitörlü veya aktivasyonlu), substrat inhibitörü veya aktivatörü etkisi bulunan sistemlerde klasik M-M kinetiğinin yetersiz kaldığı durumlarda kinetik profili daha doğru şekilde tanımlamak için ele alınmıştır. Çalışmada ayrıca, bazı karmaşık veya çok aşamalı biyodegradasyon sistemlerinde zaman-bağımlı kütle kaybı veya mineralizasyon oranlarını tahmin etmek amacıyla basit seviye kinetik modelleri (sıfırıncı, birinci ve ikinci derece) değerlendirilmiştir. Plastik biyodegradasyonunun adaptasyon (lag), aktif degradasyon ve stabil faz gibi aşamaları içerebilmesi nedeniyle, çok aşamalı kinetik modeller (lag-faz dahil) de incelenmiş ve fazlar arasındaki geçişlerin aşama-aşama kinetiği yakalamasına odaklanılmıştır. Son olarak, biyodegradasyon hızının çevresel faktörlerden, özellikle sıcaklıktan etkilenmesi nedeniyle, sıcaklık bağımlı modeller (Arrhenius denklemli) ele alınmış ve kontrollü ortam koşullarındaki degradasyon oranlarının tahmini amaçlanmıştır. Bu modellerin sistematik değerlendirilmesi, plastik biyodegradasyonunu nicel olarak tanımlamaya, deneysel tasarım ve biyoremediasyon uygulamalarında model seçimini yönlendirmeye olanak sağlamaktadır (Baldera-Moreno et al., 2022). Tablo 3'de biyodegradasyonda kullanılan matematiksel modeller ve kullanım amaçları verilmiştir.

Tablo 3. Biyodegradasyonda kullanılan matematiksel modeller ve kullanım amaçları.

Matematiksel Model	Uygun Plastik Türleri	Uygun Sistem / Koşullar	Kullanım Amacı
Michaelis–Menten (M–M) Kinetiği	PET, PLA, PHA	Enzimatik hidroliz sistemleri, laboratuvar ölçeği biyoreaktörler	Enzim-substrat kinetiğini yakalayarak parçalanma hızını nicel olarak modellemek
M–M Varyantları (inhibitörlü / Aktivasyonlu)	PE, PS, bazı biyoplastikler	Substrat inhibitörü/aktivatörü etkisi olabilen sistemler	Klasik M–M kinetiğinin yetersiz kaldığı durumlarda kinetik profili doğru tanımlamak
Basit Seviye Kinetik Modelleri (0., 1., 2. derece)	PE, PP, PET	Karmaşık veya çok aşamalı biyodegradasyon sistemleri	Zaman-bağımlı kütle kaybı ve mineralizasyon oranlarını tahmin etmek
Çok Aşamalı Kinetik Modeller (Lag-Faz Dahil)	PLA, PHA, PET	Kompost sistemleri, adaptasyon ve aktif degradasyon fazları olan ortamlar	Lag, aktif ve stabil fazları içeren biyodegradasyonu aşama-aşama modellemek
Sıcaklık Bağımlı Modeller (Arrhenius Denklemli)	PLA, PET, PE	Kontrollü sıcaklık ve nem koşullarında biyoreaktör veya kompost sistemleri	Sıcaklık değişimlerinin degradasyon hızına etkisini nicel olarak değerlendirmek

8. Deneyisel Tasarım ve Minimum Raporlama Gereklilikleri

Mikroalg, bakteri ve mantarlardan oluşan mikrobiyal konsorsiyumların PET biyolojik bozunmasındaki rollerinin araştırılması, hem biyolojik sistemlerin doğasında bulunan yüksek değişkenlik hem de türler arası etkileşimlerin karmaşıklığı nedeniyle, dikkatlice oluşturulmuş bir deneyisel tasarım gerektirir. Bu nedenle, çalışmalar, istatistiksel geçerliliğini güçlendirmek için biyomedikal ve ekolojik araştırmalar için önerilen temel metodolojik ilkeleri dikkate almalıdırlar (Quinn ve Keough, 2002; Ruxton ve Colegrave, 2011). Bu tür çalışmalar için aşağıda belirtilen noktalar önemlidir:

1. Deneyisel modellerde en az üç biyolojik tekrar kullanılması, deneyisel sonuçların hem güvenilir hem de genelleştirilebilir olmasını sağlar. Farklı mikroorganizma gruplarından oluşan konsorsiyumlardaki bozunma performansının doğal biyoçeşitlilikten etkilenebileceği göz önüne alındığında, biyolojik tekrarlar doğru varyans hesaplaması için kritik bir gerekliliktir (Motulsky, 2017).
2. PET biyolojik bozunması sıcaklık, pH, ışık yoğunluğu, kültür hacmi ve konsorsiyum bileşimi gibi çok sayıda çevresel ve biyolojik değişkene duyarlı olduğundan, deneyisel koşulların doğru bir şekilde raporlanması çok önemlidir. Ayrıntılı raporlama, sonuçların tekrarlanabilirliğini artırmanın yanı sıra farklı laboratuvarlarda yürütülen benzer çalışmalarla karşılaştırmaya da olanak tanır (Kilkenny vd., 2010).
3. Bozunma oranları, enzimatik aktivite veya mikrobiyal büyüme ölçümleri için varyans metrikleri (SD, SE) açıkça belirtilmelidir. Bu metrikler, verilerdeki dağılım hakkında bilgi sağlar ve regresyon, ANOVA veya makine öğrenmesi tabanlı modellerin doğruluk ve hata tahminlerinin bilimsel olarak yorumlanmasını sağlar (Bland ve Altman, 1996).
4. Mikrobiyal konsorsiyumların PET biyolojik bozunması üzerindeki etkisini göstermek için uygun kontrol gruplarının kullanılması esastır. PET'in abiyotik

bozunma oranını belirlemek için negatif kontroller (mikroorganizma içermeyen sistemler) gereklidir; pozitif kontroller ise bilinen yüksek bozunma kapasitesine sahip bakteri veya enzimlerin sistem performansını değerlendirmek için bir referans noktası sağlar (Ruxton ve Colegrave, 2011). Konsorsiyum çalışmalarında, yalnızca bakteri, yalnızca mantar, yalnızca mikroalg veya yalnızca besi yeri içeren tek kültür kontrolleri, sinerjik etkileşimlerin analizine olanak tanır.

5. Farklı mikroalg-bakteri-mantar kombinasyonlarını veya değişen çevresel değişken seviyelerini karşılaştıran deneysel kurulumlarda, artan hipotez sayısının yanlış pozitif riskini artırmasını önlemek için çoklu karşılaştırma düzeltmeleri uygulanmalıdır. Bonferroni düzeltmesi gibi konservatif yöntemler, özellikle birden fazla konsorsiyum varyantını aynı anda karşılaştıran çalışmalarda istatistiksel güvenilirliği güçlendirir (Armstrong, 2014).

Bu ilkelerin birlikte uygulanması, hem PET biyolojik bozunma araştırmalarının metodolojik tutarlılığını hem de sonuçların bilimsel literatürde kullanılabilirliğini artırır. Mikrobiyal konsorsiyum temelli yaklaşımların disiplinlerarası yapısını destekleyen sağlam bir deneysel temel sağlarlar.

9. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma, PET biyobozunmasında mikroalg-bakteri-mantar konsorsiyumlarının potansiyelini biyokimyasal ve istatistiksel açılardan bütünsel olarak değerlendirmiştir. Mevcut araştırmalar, özellikle bakteriyel ve fungal sistemlerin PET bozunmasındaki etkinliği konusunda önemli ilerlemeler sağlamış olsa da, mikroalg temelli yaklaşımlar sınırlı sayıda incelenmiştir. Mikroalglerin oksijen üretimi, organik asit salınımı ve simbiyotik etkileşimler yoluyla bozunma sürecini destekleme potansiyeli, bu boşluğu gidermek için önemli bir araştırma alanı sunmaktadır. Konsorsiyum temelli biyolojik stratejiler, bireysel türlere kıyasla daha karmaşık ancak daha etkili bozunma dinamikleri sunar ve bu nedenle ekosistem temelli biyoteknolojik çözümler için değerlidir.

Ancak, literatürdeki çalışmaların önemli bir kısmı, standartlaştırılmamış veri yapıları, yetersiz raporlama, düşük tekrar sayıları ve kontrol kümelerinin eksikliği nedeniyle karşılaştırılabilirlik ve istatistiksel yorumlama açısından sınırlıdır. Bu bağlamda, deneysel tasarım ve asgari raporlama gerekliliklerinin titizlikle uygulanması, PET biyolojik bozunumu alanında tutarlı ve tekrarlanabilir sonuçlar elde etmek için kritik öneme sahiptir. En az üç biyolojik tekrarın kullanılması, deneysel koşulların ayrıntılı olarak raporlanması, SD/SE gibi varyans metriklerinin sunulması, uygun kontrol gruplarının oluşturulması ve çoklu karşılaştırmalar için Bonferroni düzeltme yöntemlerinin uygulanması, hem metodolojik doğruluğu hem de istatistiksel güvenilirliği artıran temel ilkelerdir. Bu ilkelerin uygulanması, konsorsiyum çalışmalarında gözlemlenen biyolojik değişkenliğin daha doğru modellenmesine katkıda bulunacaktır.

Ayrıca, regresyon modelleri, PCA, küme analizleri, makine öğrenmesi algoritmaları ve enzim kinetik modelleri gibi istatistiksel araçlar, biyolojik bozunma süreçlerinin mekaniksel olarak anlaşılmasına, bozunma oranlarını etkileyen faktörlerin nicelleştirilmesine ve konsorsiyum performanslarının karşılaştırılmasına olanak tanır. Bu bağlamda, istatistiksel modelleme yalnızca alana analitik derinlik katmakla kalmaz, aynı zamanda standardizasyon ihtiyacına sistematik bir çözüm de sunar.



5th INTERNATIONAL CONGRESS ON MULTIDISCIPLINARY NATURAL SCIENCES

Sonuç olarak, plastiklerin biyolojik bozunumuna ilişkin araştırmalardaki ilerleme, biyokimyasal süreçlerin modern istatistiksel analiz yöntemleriyle bir arada ele alınmasına bağlıdır. Alg, bakteri ve mantarlar da dahil olmak üzere mikrobiyal konsorsiyumların kolaylaştırdığı çok bileşenli etkileşimler, uygun enzimatik mekanizmalarla bir araya gelerek bozunma süreçlerini anlamak ve optimize etmek için daha kapsamlı bir çerçeve sunar. Bu yaklaşımın güçlendirilmesi, özellikle PET gibi yüksek dayanıklılığa sahip polimerlerin çevresel kalıcılığını azaltmak için daha tutarlı, mekanik olarak sağlam ve uygulanabilir biyoteknolojik stratejilerin geliştirilmesine katkıda bulunacaktır.



Kaynakça

- Armstrong, R. A. (2014). When to use the Bonferroni correction. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 34(5), 502–508.
- Bland, J. M., Altman, D. G. (1996). Statistics notes: Measurement error proportional to the mean. *BMJ*, 313(7049), 106.
- Borenstein, M., Hedges, L. V., Higgins, J. P. T., Rothstein, H. R. (2021). *Introduction to meta-analysis* (2nd ed.). Wiley.
- Brasil, B. dos S., A. F., Gonçalves de Siqueira, F., Salum, T. F. C., Zanette, C. M., Spier, M. R., 2017, Microalgae and cyanobacteria as enzyme biofactories, Review article, *Algal research*, 25, 76-89.
- Cai, Z., Li, M., Zhu, Z., Wang, X., Huang, Y., Li, T., Gong, H., Yan, M. (2023). Biological degradation of plastics and microplastics: A recent perspective on associated mechanisms and influencing factors. *Microorganisms*, 11(7), 1661.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum.
- Cumming, G. (2012). *Understanding the new statistics: Effect sizes, confidence intervals, and meta-analysis* (1st ed.).
- Danso, D., Chow, J., Streit, W. R. (2019). Plastics: Environmental and biotechnological perspectives on microbial degradation. *Applied and Environmental Microbiology*, 84(20), e01095-18.
- Elsayad, A. M., Nassef, A. M., Dhaifullah, M., & Elsayad, K. (2020). Classification of Biodegradable Substances Using Balanced Random Trees and Boosted C5.0 Decision Trees.
- Fernandes, M., Salvador, A. F., Madalena, D. A., Vicente, A. A. (2025). Estimating the biodegradation of PHB/PBAT films – An experimental design approach. *Polymer Degradation and Stability*, 233, 111182.
- Ganesh Kumar A., Anjana, K., Hinduja, M., Sujitha, K., Dharani, G. (2020). Review on plastic wastes in marine environment – Biodegradation and biotechnological solutions. *Marine Pollution Bulletin*, 149, 110733.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782.
- Gewert, B., Plassmann, M. M., MacLeod, M. (2015). Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 17(9), 1513–1521.
- Hadiyanto, H., Khoironi, A., Dianratri, I., Huda, K., Suherman, S., Muhammad, F. (2022). Biodegradation of oxidized high-density polyethylene and oxo-degradable plastic using microalgae *Dunaliella salina*. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 34(1), 469–481.
- Hedges, L. V. (1981). Distribution theory for Glass's estimator of effect size and related estimators. *Journal of Educational Statistics*, 6(2), 107–128.
- Hedges, L. V., Olkin, I. (1985). *Statistical methods for meta-analysis*. Academic Press.
- Junior, W. G. M., Gorgich, M., Correa, P. S., Martins, A. A., Mata, T. M., Caetano, N. S., 2020, Microalgae for biotechnological applications: Cultivation, harvesting and biomass processing, Review, *Aquaculture*, 528, 735562.
- Kale, G., Kijchavengkul, T., Auras, R., Rubino, M., Selke, S. E., Singh, S. P. (2007). Compostability of bioplastic packaging materials: An overview. *Macromolecular Bioscience*, 7(3), 255–277.



5th INTERNATIONAL CONGRESS ON MULTIDISCIPLINARY NATURAL SCIENCES

Khan, S., Nadir, S., Shah, Z. U., Shah, A. A., Karunarathna, S. C., Xu, J., Khan, A., Munir, S., Hasan, F. (2017). Biodegradation of polyester polyurethane by *Aspergillus tubingensis*. *Environmental Pollution*, 225, 469–480.

Kilkenny, C., Browne, W., Cuthill, I. C., Emerson, M., Altman, D. G. (2010). Improving bioscience research reporting: The ARRIVE guidelines for reporting animal research. *PLoS Biology*, 8(6), e1000412.

Killham, K., Prosser, J. I., 2015, The bacteria and archaea, *Soil microbiology, Ecology and Biochemistry*, 41–76.

Lakens, D. (2013). Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science: A practical primer for t-tests and ANOVAs. *Frontiers in Psychology*, 4, 863.

Lin, C., Zhang, H. (2025). Polymer biodegradation in aquatic environments: A machine learning model informed by meta-analysis of structure–biodegradation relationships. *Environmental Science & Technology*, 59(2), 1253–1263.

Malik, S., Maurya, A., Khare, S. K., Srivastava, K. R. (2023). Computational Exploration of Bio-Degradation Patterns of Various Plastic Types. *Polymers*, 15(6), 1540.

Mohanan, N., Montazer, Z., Sharma, P. K., Levin, D. B. (2020). Microbial and enzymatic degradation of synthetic plastics. *Frontiers in Microbiology*, 11, Article 580709.

Montazer, Z., Habibi Najafi, M. B., Levin, D. B. (2020). Challenges with verifying microbial plastic biodegradation. *Microbial Biotechnology*, 13(2), 306–315.

Motulsky, H. (2017). *Intuitive biostatistics: A nonmathematical guide to statistical thinking* (4th ed.). Oxford University Press.

Ogunola, O. S., & Palanisami, T. (2016). Microplastics in the marine environment: Current status, assessment methodologies, impacts and solutions. *Journal of Pollution Effects & Control*, 4(2), 1–13.

Quinn, G. P., Keough, M. J. (2002). *Experimental design and data analysis for biologists*. Cambridge University Press.

Roy, A., Chakraborty, S. (2024). A comprehensive review on sustainable approach for microbial degradation of plastic and its challenges. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 7, 100153.

Ruxton, G. D., Colegrave, N. (2011). *Experimental design for the life sciences* (3rd ed.). Oxford University Press.

Shah, A. A., Hasan, F., Hameed, A., Ahmed, S. (2008). Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances*, 26(3), 246–265.

Temporiti, M. E. E., Nicola, L., Nielsen, E., Tosi, S. (2022). Fungal enzymes involved in plastics biodegradation. *Microorganisms*, 10(6), 1180.

Tokiwa, Y., Calabia, B. P., Ugwu, C. U., Aiba, S. (2009). Biodegradability of plastics. *International Journal of Molecular Sciences*, 10(9), 3722–3742.

Urbanek, A. K., Rymowicz, W., Mirończuk, A. M. (2018). Degradation of plastics and plastic-degrading bacteria in cold marine habitats. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102(18), 7669–7678.

Walker, D. H., 2014, *Pathobiology of human disease, Diseases caused by fungi*, 217–221.

Wei, R., Zimmermann, W. (2017). Microbial enzymes for the recycling of recalcitrant petroleum-based plastics: How far are we? *Microbial Biotechnology*, 10(6), 1308–1322.

Kişisel ve İşyeri Ortamı Solunabilir ve Toplam Toz Maruziyetlerinin Çok Ölçütlü Karar Verme Yaklaşımıyla Değerlendirilmesi

Ayşe ERİM¹
Ergün ERASLAN²

Özet

Toz maruziyeti, iş yerlerinde çalışanların sağlığını tehdit eden önemli bir mesleki risktir. Araştırma sırasında; toz maruziyetlerini etkileyen etmenler için kriterlerin belirlenmesinde Institut Universitaire ile işbirliği içinde geliştirilen hakemli bir maruziyet değerlendirme aracı olan TREXMO (TRanslation of EXposure MODEls) maruziyet modeli kullanılmıştır. Mesleki maruziyet modelindeki kriterler kullanılarak karar vericilerin (DM) puanlaması sonucu hakim olan uzman görüşü ile AHP Metodu (Analitik Hiyerarşi Yöntemi) kullanılarak toz maruziyetlerini artıran kriterlerin ağırlıklandırılması karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, toz maruziyetini etkileyen dört temel kriter (Tehlike Sınıfı, Çalışan Sayısı, Havalandırma, Çalışma Süresi) AHP (Analytic hierarchy process/Analitik Hiyerarşi Yöntemi) yöntemiyle analiz edilmiştir. Kriterlerin ağırlıkları hesaplanmış ve toz maruziyetine etkileri önceliklendirilmiştir. Sonuçlar, Tehlike Sınıfı'nın en önemli kriter olduğunu (ağırlık: 0.533), ardından Havalandırma (0.255), Çalışma Süresi (0.144) ve Çalışan Sayısı'nın (0.068) geldiğini göstermiştir.

Keywords: Toz ölçümü, Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP), Çok kriterli karar verme, Maruziyet modelleme.

¹ Öğrenci, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Doktora Programı, Orcid: <http://orcid.org/0009-0007-0935-9975>

² Prof. Dr., Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği, Orcid: eraslan@aybu.edu.tr, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-5667-0391>

GİRİŞ

Bu çalışmanın amacı, toz maruziyetini artıran kriterlerin ağırlıklarını belirlemek ve etkilerini analiz ederek iş yerlerinde toz kontrolü için öncelikli alanları tespit etmektir. Toz maruziyetini artıran dört temel kriter (Tehlike Sınıfı, Çalışan Sayısı, Havalandırma, Çalışma Süresi) belirlenmiş ve bu kriterlerin göreceli önemleri Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemiyle değerlendirilmiştir.

YÖNTEM

AHP, karmaşık karar problemlerini hiyerarşik bir yapıya indirgeyerek kriterlerin ağırlıklarını belirleyen, matematiksel ve psikolojik temellere dayalı bir yöntemdir (Saaty, 1980). İş sağlığı ve güvenliği alanında risk değerlendirme ve önceliklendirme amacıyla sıkça kullanılmaktadır (Badri et al., 2012; Aminbakhsh et al., 2013). Sağlıklı ve güvenli çalışma ortamları oluşturulması açısından; iş sağlığı ve güvenliğini etkileyecek risklere yönelik faktörlerin tespiti, analizi ve değerlendirilmesi; mümkünse bertarafı ve kontrol altına alınması gerekliliği mevzuat ile belirlenmiştir. İşveren, mevzuat açısından işyeri atmosferinde bulunan, kullanılan veya herhangi bir şekilde işlem gören kimyasal maddelerin etkilerinden kaynaklanan mevcut veya ortaya çıkması muhtemel risklerden çalışanların sağlığını korumak ve güvenli bir çalışma ortamı sağlamak amacıyla maruziyet ölçümlerini yaptırır ve ölçüm sonuçlarının mesleki maruziyet sınır değerleri (OELV/Occupational Exposure Limit Values) ile karşılaştırılması sonucu alınacak önlemler yapılan risk değerlendirmesi ile belirlenir.

Mesleki Maruziyet Modelleri

Mesleki maruziyet modelleri, insanların kimyasallara maruziyetine ilişkin bilimsel olarak sağlam değerlendirmelerin vazgeçilmez bir parçasıdır. Kimyasalların Kaydı, Değerlendirilmesi, İzni ve Kısıtlanması (REACH-Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemical: Avrupa Birliği'nin kimyasallara ilişkin mevcut birçok mevzuatı tek bir çatı altında toplayan bir AB tüzüğüdür) mevzuatının 2007 yılında yürürlüğe girmesinden bu yana, kimyasal güvenlik değerlendirmeleri gerçekleştirmek ve tehlikeli maddelere yönelik maruz kalma senaryoları oluşturmak için maruziyet modelleri yaygın olarak kullanılmaktadır (ECHA, 2012a). İşyerinde kimyasallara mesleki maruziyete erişim sağlamak için her biri karmaşıklık ve ihtiyatlılık açısından farklı olan çeşitli modeller mevcuttur (Money, 2003), (Tielemans vd., 2007; BAuA, 2015b). Mesleki maruziyet modelleri karmaşıklıkları, amaçları ve kullanıcının ihtiyaç duyduğu uzmanlık düzeyi bakımından önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Aynı modeldeki farklı parametreler, aynı maruziyet durumu için farklı maruziyet tahminlerine yol açabilir.

TREXMO Maruziyet Değerlendirme Aracı

TREXMO (TRAnslation of EXposure MOdels), Institut Universitaire ile işbirliği içinde geliştirilen hakemli bir maruziyet değerlendirme aracıdır. Araç geçici olarak CHUV (Le Centre hospitalier universitaire vaudois) sunucusunda bulunmaktadır. Avrupa Kimyasallar Ajansı (European Chemicals Agency, ECHA), işyerinde kimyasallara mesleki maruziyeti değerlendirmek için, her biri karmaşıklık ve ihtiyatlılık açısından farklılık gösteren çeşitli modeller önermektedir. TREXMO aracı, ART v.1.5, STOFFENMANAGER® v.5.1, ECETOC TRA v.3, MEASE v.1.02.01, EMKG-EXPO-TOOL ve EASE v.2.0 olmak üzere yaygın olarak kullanılan altı mesleki maruziyet modelini entegre etmektedir. TREXMO aracı, bu altı modelin

parametreleri arasında yarı otomatik bir çeviri sağlayarak eşzamanlı kullanımlarını kolaylaştırır (Ann. Occup. Hyg., 2016).

Uygulama ve Bulgular

Ülkemizde toza maruz kalımı incelerken uzman görüşüne dayalı uygulama esas alınmıştır. Uygulama yapılırken karar vericiler (DM: decision maker) için toza maruziyeti artıran kriterler belirlenmiş ve bu kriterlerin belirlenmesinde güncel olarak kullanılan uluslararası kabul görmüş mesleki maruziyet modellerinden yararlanılmıştır.

Kriter ve Karar Vericiler (DM: decision maker)

Kriter belirlenirken TREXMO - TRAnslation of EXposure MOdels deki maruz kalımla ilgili sorulardan esinlenilmiştir. Karar vericiler seçilirken A sınıfı İş Güvenliği Uzmanı sertifikası olan ve dört farklı sektörde görevli olan uzman görüşlerinden yararlanılmıştır.

Toza maruz kalımı etkileme durumuna göre en yüksek puan 9 olmak suretiyle en düşük 1 verilerek puanlama yapılmış ve 4 karar vericinin (DM) verdiği puanların ortalaması alınmıştır.

Tablo 1. Kriterlere Karar Vericilerin (DM) Verdiği Ortalama Puanlar

	KRİTER	DM-ORT
K1:	Maddenin/ müstahzarın ürün tipi	5
K2	Tozluluk (Dustiness)	7
K3	Ağırlık fraksiyonu (yüzde içerik) Not: çalışılan malzemedeki toz içeriği	6
K4	Nem içeriği	4
K5	Çalışanın solunum bölgesinden (ağız ve burun) kaynağa olan mesafe	8
K6	Yüzey kirliliği / Kaçak emisyon kaynakları	5
K7	Çalışma/aktivite süresi	6
K8	İşyeri Tehlike Sınıfı	8
K9	Havalandırma türünün etkisi	6
K10	İşyeri büyüklüğü/hacmi	4
K11	Çalışan sayısı	3

AHP Metodu (Analytic Hierarchy Process/Analitik Hiyerarşi Yöntemi)

AHP, çok kriterli karar verme problemlerinde kriterlerin önem derecelerini belirlemek için kullanılan bir yöntemdir (Saaty, 1994). Temel adımları şunlardır:

1. **Hiyerarşinin Tanımlanması:** Probleme ilişkin amaç ve kriterler belirlenir.
2. **İkili Karşılaştırmalar:** Kriterler, Saaty'nin 1-9 ölçeğiyle (1: eşit önem, 9: aşırı önem) karşılaştırılır.
3. **Ağırlıkların Hesaplanması:** Normalize edilmiş ağırlıklar matris üzerinden türetilir.
4. **Tutarlılık Kontrolü:** Tutarlılık Oranı (CR) ile karşılaştırmaların tutarlılığı değerlendirilir (CR<0.1 olmalıdır).

Bu çalışmada, toz maruziyetini artıran kriterlerin ağırlıkları AHP ile hesaplanmıştır.

Uygulamada AHP ile toz maruziyetlerini artıran kriterlerin ağırlıklandırılması yapmak için yetkili laboratuvarlar tarafından yukarıda İSG KATİP (İş Sağlığı ve Güvenliği Kayıt, Takip ve İzleme Programı) sistemine girilen ölçüme ait bilgilerden 4 kriter (işyeri tehlike sınıfı-K8, işyeri çalışan sayısı-K11, ölçümün yapıldığı yerdeki havalandırma-K9 ve çalışanların çalışma süresi-K7) seçilmiştir. Aynı zamanda bu kriterler karar vericilere sorulan toza maruz kalımı etkileyen kriterlerle de eşleşmektedir.

Karşılaştırma Ölçeği:

Uygulamada AHP için uzmanlar tarafından kabul gören Saaty tarafından kullanılmış 1-9 temel ölçeğinden yararlanılmıştır. Bu ölçek iki seçenek veya kriterin karşılaştırılmasında uygun bir değer bulunması için kullanılır. Tercih tablosu tek sayılardan oluşmaktadır. Tercih tablosunda yer alan çift sayılar ise uzlaşma değerleridir (Saaty 1990).

Sonuç: $CR = 0.094 < 0.1$ olduğundan, ikili karşılaştırmalar tutarlıdır. Bu, karar vericinin kriterler arasındaki önem sıralamasını mantıklı ve güvenilir bir şekilde yaptığını gösterir. Tutarlılık kontrolü, analiz sonuçlarının iş yerlerinde toz kontrolü için güvenilir bir temel sunduğunu doğrular. Eğer $CR > 0.1$ olsaydı, karşılaştırmalar gözden geçirilerek tutarsızlık kaynakları (örneğin, yanlış önem derecelendirmeleri) tespit edilmeliydi.

Tablo 2. Kriter Ağırlıkları

	W/Kriter Ağırlıkları	%
K1	C1 (Tehlike Sınıfı)	0,533 53
K2	C2 (Çalışan Sayısı)	0,068 7
K3	C3 (Havalandırma):	0,255 26
K4	C4 (Çalışma Süresi)	0,144 14

Karar seçeneklerinin önem seviyeleri sırasıyla ilk olarak **0,533** ile tehlike sınıfı, ikinci olarak **0,255** ile havalandırma ve devamında **0,144** ile çalışma süresi ve son olarak **0,068** ile çalışan sayısıdır.

Sonuç ve Bulgular

Uygulamada ikili karşılaştırmalar yapılırken varsayımlarla/yargılarla hareket edilmiş ve daha sonra beklentilerle sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tutarlılık oranları bütün kriterler için 0,1 değerinin altında bulunmuştur. Bu nedenle sonuçlar karar vericilerin öngörülerıyla örtüşmüştür. Yargılar tutarlı bulunmuş ve sonuçları kabul etmişlerdir.

AHP analizi, Tehlike Sınıfı'nın (0.533) en önemli kriter olduğunu göstermiştir. Bu, Smith et al. (2020) ve Chen et al. (2019) ile uyumludur. Havalandırma (0.255), toz kontrolünde ikinci öncelikli faktördür ve literatürdeki bulguları destekler. Çalışma Süresi (0.144) ve Çalışan Sayısı (0.068) ise daha az etkilidir.

Toz maruziyetlerini etkileyen kriterlerin en önemlisinin tehlike sınıfı olduğu ortaya çıkmıştır.



5th INTERNATIONAL CONGRESS ON MULTIDISCIPLINARY NATURAL SCIENCES

KAYNAKÇA

Ann. Occup. Hyg., 2016, Cilt 60, No. 8, 991-1008 doi:10.1093/annhyg/mew042, 29 Haziran 2016, TREXMO: Düzenleyici Mesleki Maruziyet Modellerinin Kullanımını Desteklemek için Bir Çeviri Aracı, Nenad Savic, Dimitri Racordon, Didier Buchs, Bojan Gasic ve David Vernez

Badri, A., et al. (2012). "Risk-factor-based approach for health and safety risks." Journal of Loss Prevention, 25(6), 946-957.

ECHA. (2012a) Bilgi gereklilikleri ve kimyasalların güvenlik değerlendirmesine ilişkin kılavuz. Bölüm R.14: mesleki maruziyet değerlendirmesi. Helsinki, Finlandiya: Avrupa Kimya Ajansı.

Money CD. (2003) İşyeri sağlık risklerinin başarılı bir şekilde kontrol edilmesine yönelik yaklaşımların geliştirilmesinde Avrupa deneyimleri. Ann Occup Hyg; 47: 533-40

Saaty T L (1990) Physics as a decision theory. European Journal of Operational Research, 48(1): 98-104

Saaty, T.L., The Analytic Hierarchy Process, McGraw Hill, New York, 1980. Reprinted by RWS Publications, 4922 Ellsworth Avenue, Pittsburgh, PA, 15213, 2000a.

Saaty, T.L.1994, How To Make A Decision: The Analytic Hierarchy Process Thomas L. DOI:10.13128/Aestimum-7138

Tielemans E, Warren N, Schneider T ve diğerleri (2007) Mesleki maruziyetin yasal değerlendirilmesi için araçlar: gelişim ve zorluklar. J Exp Sci Environ Epidemiol; 17(Suppl. 1): S72-80

ICOMNAS

Elaeagnus angustifolia L. as a Bioprotective Agent Against Methacrylate Toxicity

Aytül UZUN AKGEYİK¹

Abstract

Elaeagnus angustifolia L. is a plant known for its rich phenolic and flavonoid profile and its notable biological potential. In this study, the protective effect of the plant extract against methacrylate-induced toxicity was evaluated using the *Allium cepa* L. bioassay system. For methacrylate, applied as the positive control, the EC₅₀ value was first determined and identified as 250 mg/L. In onions subjected to the *Allium cepa* test, methacrylate exhibited inhibitory effects on germination rate, root length, and bulb weight, and caused pronounced anatomical damage such as compression and irregular arrangement in the epidermal tissue of root tips, collapse and disorganization in vascular bundle tissues, flattened nuclei in cortex cells, and excessive cell wall thickening. Applications using 100 and 200 mg/mL *E. angustifolia* extract alone showed no toxic effects on physiological and cytogenetic parameters. When applied together with methacrylate, the extract increased the germination rate by 54% and 64%, respectively, supported root length and weight gain, elevated the mitotic index, and significantly reduced micronucleus formation and chromosomal abnormalities in a dose-dependent manner. Anatomically, especially in treatments with 200 mg/mL plant extract + methacrylate, methacrylate-induced damage in the epidermis, cortex, and vascular bundle tissues was markedly reduced. These findings demonstrate that the antioxidant and bioactive compounds of *E. angustifolia* leaf extract alleviate methacrylate-induced physiological, genotoxic, and anatomical toxicity. Furthermore, the results indicate that the plant possesses substantial potential as a sustainable and potent bioprotective candidate against environmental and chemical stress-induced damage in toxicological studies.

Keywords: *Elaeagnus angustifolia* L, Methacrylate, Genotoxic, Micronucleus.

¹ Öğr. Gör. Dr., Yozgat Bozok Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, aytul.uzun@yobu.edu.tr, Orcid: 0000-0002-5602-0524

INTRODUCTION

Elaeagnus angustifolia L., commonly known as Russian olive, is a shrub or small tree that can grow up to 7 meters and is cultivated for its fruits in Central and Eastern Anatolia. This species is particularly native to Western and Central Asia, Southern Russia, Kazakhstan, and Turkey (Akbolat et al., 2008). The fruits are elliptically shaped, measuring 10–20 × 6–12 mm, reddish-brown in color, and consumed as food (Dirr, 1990; McKean, 1982). Preferring sunny locations, *E. angustifolia* can also grow in shallow and dry soils, nutrient-poor or slightly saline soils (Kalyoncu et al., 2008). The leaves are 4 to 8 cm long, narrow, lance-shaped, and pointed (Figure 1). While the leaves can be used for tea production, animal fodder, and paper pulp, the fruits are utilized in jam and liqueur production (Gülcü & Çelik-Uysal, 2010).

Several studies have reported that the plant contains various phytochemical compounds with diverse pharmacological and biological activities (Farzaei et al., 2015). According to these studies, the needle-shaped leaves exhibit antimicrobial, anti-inflammatory, and antioxidant properties. They have also been shown to possess anti-mutagenic and anti-cancer effects, as well as properties that reduce gastrointestinal spasms and support wound healing (Hamidpour et al., 2017). The leaves and flowers have traditionally been used in folk medicine as diuretics and antipyretics. Historically, they have also been employed for analgesic and antipyretic purposes, and in the preparation of medications for the treatment of stomach ailments and ulcers (Fu et al., 2025). Various parts of *E. angustifolia* L., including the roots, bark, flowers, leaves, and fruits, are utilized in the food, pharmaceutical, and perfumery industries (Hassanzadeh & Hassanpour, 2018; Khadivi, 2018).



Figure.1. *Elaeagnus angustifolia* plant

Zor et al. (2025) conducted a comprehensive study evaluating the chemical composition, multi-enzyme inhibition, antimicrobial effects, and molecular docking results of *Elaeagnus angustifolia* L. The study emphasized the biological potential of plant parts other than the less-studied fruits, providing new insights into the therapeutic potential of these underexplored plant components. Similarly, Okmen and Turcan (2014) reported that methanol-prepared *E. angustifolia* leaf extracts exhibited antimicrobial, antioxidant, and antimutagenic activities, demonstrating strong inhibition against *Yersinia enterocolitica* strains and notable DPPH radical scavenging activity. Saboonchian et al. (2014) showed that leaf extracts from Fariman and Mashhad varieties contained higher phenolic and flavonoid content compared to flower extracts. Huojiaaihemaiti et al. (2022) concluded that the obtained acidic

polysaccharides possess potential as natural antioxidant and immunomodulatory agents, representing a valuable resource for future studies in the food and pharmaceutical industries.

Similarly, Fouzat et al. (2022) highlighted the biological activity potential of the plant's flowers, particularly supporting apoptosis induction and anticancer effects. Collectively, these findings scientifically justify the selection of *Elaeagnus angustifolia* in our study due to its broad biological activity profile and inherent protective potential. Methacrylates are organic esters known as derivatives of methacrylic acid and can exist in both monofunctional and multifunctional forms. They serve as fundamental monomers used in the production of various plastics, coatings, adhesives, and biomedical materials through polymerization. Acrylate and methacrylate compounds have numerous applications, including in coatings, printing inks, adhesives, textiles, plastics, and as intermediates in chemical synthesis. Acrylates are acrylic acid esters obtained by esterification of acrylic acid with an alcohol, catalyzed depending on whether the acid has one or multiple functional groups. Similarly, methacrylates are compounds formed through the esterification of methacrylic acid via a comparable process (Moss et al., 1997; Johannsen et al., 2008).

Methacrylate is known to be a mild skin and eye irritant and may cause skin sensitization (Clayton & Clayton, 1981). Toxic effects of methacrylate have been observed in the central nervous system, liver, and urogenital system. Experimental toxicity data for methacrylate are quite limited. Oral exposure of male ddY rats to methacrylate at a dose of 1.8 mmol/kg (153 mg/kg) twice weekly for 8–10 weeks was reported to induce mild behavioral changes, including hind limb weakness, ataxia, and increased aggressiveness (Hashimoto et al., 1981). In another study, the ecotoxicity of isosorbide acrylate and methacrylate monomers, the polymethacrylates produced from them, and industrially manufactured latexes from these monomers was evaluated on bacteria (*Escherichia coli*, *Aliivibrio fischeri*), vascular plants (*Spirodela polyrhiza*), and invertebrates (*Thamnocephalus platyurus*) using widely accepted test methods. The measured half-maximal effective concentration (EC₅₀) values indicated that chemically reactive isosorbide acrylate monomers were more toxic to multicellular organisms (*S. polyrhiza* and *T. platyurus*, EC₅₀ ~ 9 mg L⁻¹) and moderately toxic to bacteria (*E. coli*). In contrast, the corresponding methacrylate monomers were practically harmless or non-toxic in the same tests (Ismagilova, 2023).

Polymethyl methacrylate (PMMA) is a derivative polymer obtained through the polymerization of basic methacrylate monomers. In a study on PMMA exposure, the relative growth rate, relative water content, and osmotic potential of *Lactuca sativa* leaves were reduced. When evaluated in terms of leaf gas exchange parameters, PMMA-treated *Lactuca sativa* plants exhibited low carboxylation efficiency and impaired photosynthesis. Regarding the antioxidant defense system, leaves and roots showed similar responses, with SOD activity reported to increase across all PMMA treatments (Yildiztugay, 2022). In the literature, plant-based toxicity studies on methacrylate monomers are extremely limited; in particular, there is a lack of systematic data using *Allium cepa* and other classical plant bioassays. Existing studies have primarily focused on animal models and in vitro cell systems, leaving the potential effects on plants largely unexplored. This gap indicates that the phytotoxicity profile of methacrylates is still not fully understood and underscores the need for comprehensive investigations in this area. It also highlights that the toxic effects of methacrylates on plants remain insufficiently studied and warrant further research.

Methacrylate is a widely used chemical in industrial applications and has the potential to exert toxic effects on the environment and living organisms. These toxic effects can

particularly lead to genetic and physiological disturbances in plant cells. The *Allium cepa* L. model is considered a reliable test system for genotoxicity and cytotoxicity studies (Topatan, 2024; Yalçın et al., 2021; Sarsar et al., 2025). The responses of plant cells to toxic agents can be assessed at both cellular and physiological levels. Plant extracts, due to their phenolic and flavonoid contents, can exhibit protective effects against damage induced by oxidative stress. *Elaeagnus angustifolia* L., known for its high phenolic content and strong antioxidant capacity, is a prominent plant species in the literature. Its leaf extract is thought to enhance the defense mechanisms of cells against free radicals and oxidative stress. First, the toxicity profile of methacrylate on *Allium cepa* was investigated to determine the potential damage of the chemical. Subsequently, the application of *E. angustifolia* leaf extract revealed its potential protective effects. This study provides valuable information from environmental and pharmaceutical perspectives by investigating the relationship between methacrylate toxicity and plant-based protective effects.

MATERIALS AND METHODS

Determination of the EC₅₀ Dose of Methacrylate and Preparation of *Elaeagnus angustifolia* Plant Extract

First, the EC₅₀ dose of methacrylate (MERCK, chemical formula: $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{CONH}_2$, CAS number: 79-39-0, Molecular weight: 85.10), which was to be used as the positive control in the study, was determined. For this purpose, *Allium cepa* bulbs were obtained from a local market in Yozgat. Healthy bulbs were selected, and their outer scales were carefully removed without damaging the root zones. The bulbs were then thoroughly washed with sterile distilled water. Distilled water was used as the control group. For the experimental groups, ten different concentrations (1 mg/L–1000 mg/L) were prepared, and the EC₅₀ dose, which reduces germination by 50%, was used to determine the concentrations applied in the study.

Elaeagnus angustifolia extract was used as a protective bioindicator against methacrylate toxicity. The *E. angustifolia* plants were selected from healthy and morphologically typical individuals located at Yozgat Bozok University, Erdogan Akdag Campus. Sampling was performed using mature, disease-free leaves collected from these trees (Figure 1). The collected leaves were first washed, dried, and then cross-sectioned into small pieces. The plant material was mixed with an equal volume of deionized water (Dh_2O) and homogenized for 3–4 minutes using an electric homogenizer (Puga et al., 2022). The resulting plant suspension was left at +4 °C overnight and then filtered to prepare the *Elaeagnus angustifolia* leaf extract. The experimental procedure is schematically summarized in Figure 2.

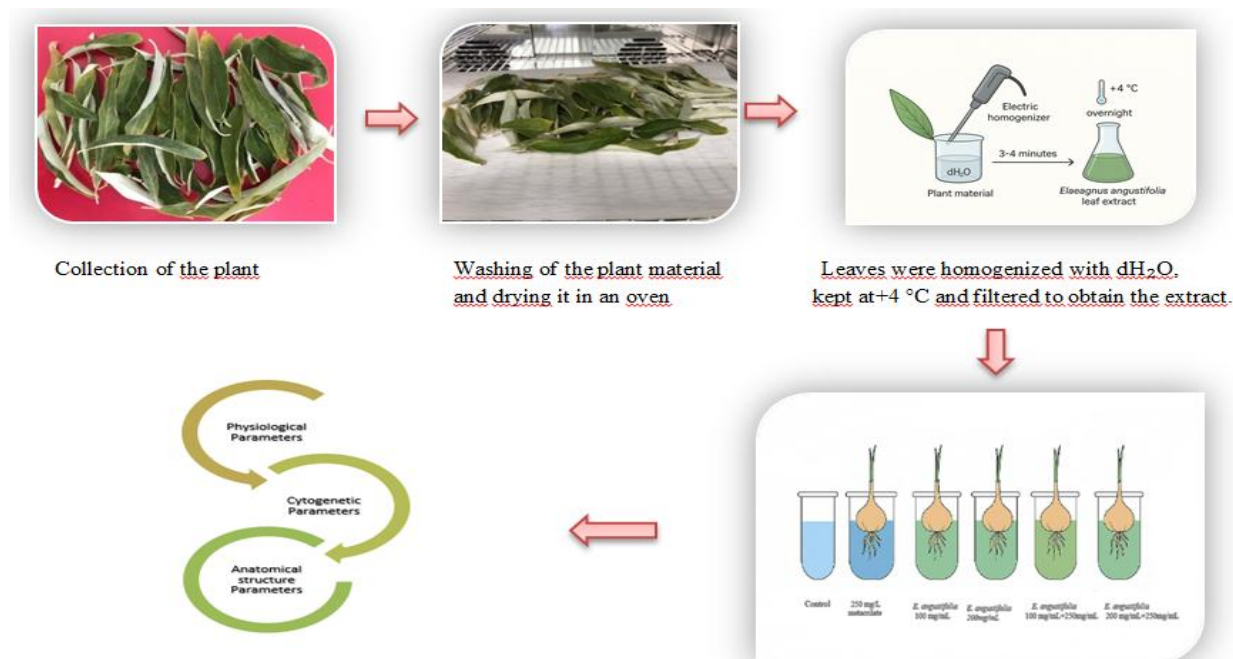


Figure 2. Schematic representation of the experimental procedure.

The protective effect of plants against toxic substances is generally associated with their antioxidant properties. For *Elaeagnus angustifolia*, application doses were selected based on IC₅₀ values determined from its antioxidant capacity. In this context, Okmen & Turkcan (2014) reported a specific DPPH-IC₅₀ (half-maximal scavenging concentration) for the methanol leaf extract of *E. angustifolia*. Their results demonstrated that the extract effectively scavenges free radicals due to its phenolic and flavonoid compounds. Using Trolox as a reference, the extract exhibited 57% inhibition at a concentration of 100 mg/mL. Accordingly, the plant extracts used in this study were set at 100 mg/mL and a double dose of 200 mg/mL. After preparing the stock solutions, the extracts were mixed with the EC₅₀ dose of the positive control, methacrylate. Additionally, to evaluate whether the plant extracts alone affect germination, onion bulbs were germinated in solutions of 100 mg/mL and 200 mg/mL extracts. For germination, the prepared solutions were transferred into 50 mL Falcon tubes and incubated in the dark at 20°C ± 2 for 3 days.

Table 1. Doses and Experimental Groups Containing Methacrylate and Plant Extract

Experimental Group Name	Experimental Group Doses
Control	Distilled water
250mg/L Methacrylate	Positive Control 250 mg/L
<i>E. angustifolia</i> 100 mg/mL	Plant extract 100 mg/mL
<i>E. angustifolia</i> 200 mg/mL	Plant extract 200 mg/mL
<i>E. angustifolia</i> 100 mg/mL + 250 mg/L Methacrylate	Plant extract 100 mg/mL + Methacrylate 250 mg/L
<i>E. angustifolia</i> 200 mg/mL + 250mg/L Methacrylate	Plant extract 200 mg/mL + Methacrylate 250 mg/L

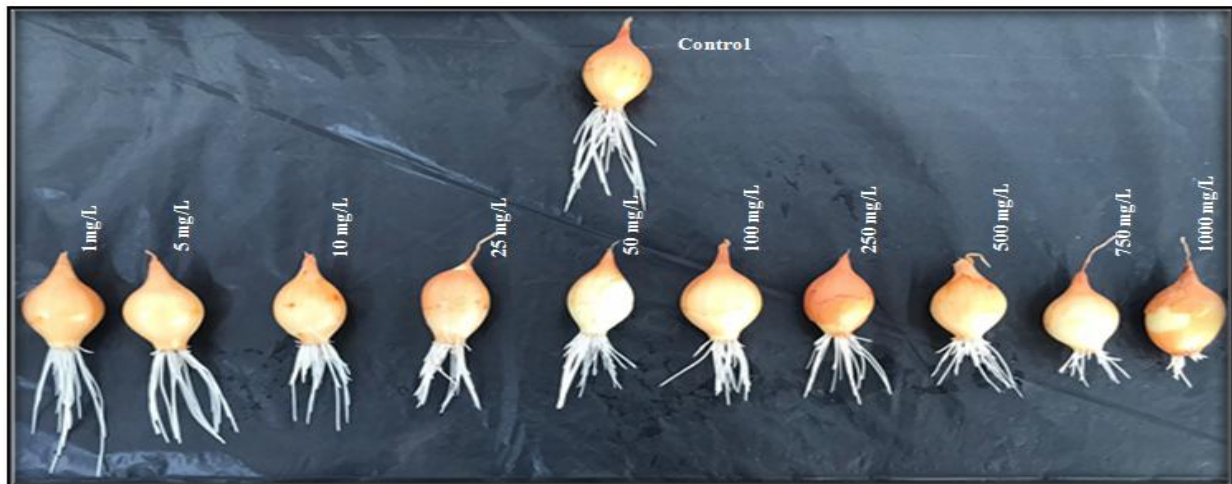


Figure 3. Experiment for determining the EC_{50} dose of Methacrylate (positive control)

Physiological Growth, Cytogenetic, and Anatomical Tissue Assessment

The mass changes of *Allium cepa* bulbs were measured in grams (g) using a sensitive balance before and after dose applications. Germination rates were calculated using the formula presented in Equation 1. Root lengths were recorded in millimeters (mm) with a precise ruler after germination. Each dose application and measurement was performed in triplicate ($n=3$) to enhance the statistical reliability of the data. This approach allows for accurate and reproducible analysis of growth parameter changes in the plant material.

Germination Percentage (%) = (Number of Germinated Bulbs) / (Total Number of Bulbs) $\times 100$ (1)

For cytogenetic assessments, approximately 1 cm samples were excised from the germinated root tips using a sterile scalpel. The root tips were fixed in Clarke's solution (3:1; 3 parts glacial acetic acid, 1 part distilled water) for 2 hours. Subsequently, the samples were washed with 96% ethanol for 15 minutes and stored in 70% ethanol at +4 °C until analysis. For staining, the root tips were hydrolyzed in 1 N HCl at 60 °C for 12 minutes. Then, the samples were incubated in 45% acetic acid for 30 minutes. Staining was completed by leaving the root tips in acetocarmine solution for 1 day. To prepare slides, the root tips were macerated in 45% acetic acid and placed on a glass slide for observation (Kol, G et al., 2025). Chromosomal damages were observed and recorded at 400 $\times$ magnification using an Olympus BX43 research microscope equipped with an Olympus SC50 digital camera system. Micronucleus (MN) frequency was evaluated according to criteria defined by Fenech et al. (2003). The mitotic index was calculated using Equation 2.

Mitotic Index (%) = (Number of Dividing Cells) / (Total Number of Cells Analyzed) $\times 100$ (2)

For the evaluation of anatomical tissue structure, root sections were excised from germinated samples using sterile scalpels. Suitable root tip samples were sectioned transversely and stained with 1% methylene blue. The stained sections were examined under a binocular microscope (Olympus BX43) and imaged with a digital camera (Olympus SC50) at 400 $\times$ magnification.

Statistical Analysis

Analyses were performed using the IBM SPSS Statistics 22 software, and the results were reported as mean $\pm$ standard deviation (SD). Statistical differences between groups were

assessed by one-way ANOVA followed by Duncan's multiple comparison test, with $p < 0.05$ considered statistically significant.

RESULTS AND DISCUSSION

The effects of methacrylate and *Elaeagnus angustifolia* + methacrylate treatments on physiological parameters are presented in Tables 2 and 3. The EC₅₀ dose of methacrylate, which reduces germination by 50%, was determined for the positive control and found to be 250 mg/L (Figure 3). Following the experiments, no statistically significant differences ($p < 0.05$) were observed between the control group and the groups treated only with *E. angustifolia* extracts at 100 mg/mL and 200 mg/mL in terms of germination percentage, average initial-to-final weight increase, and mean root length. In the methacrylate-treated group, germination percentage decreased by 55%, which was statistically significant compared to the control group ($p < 0.05$).

The treatments combining *E. angustifolia* with methacrylate showed an increase in germination compared to the methacrylate-only group, with a 54.6% increase observed at 100 mg/mL *E. angustifolia* + methacrylate and a 63.6% increase at 200 mg/mL *E. angustifolia* + methacrylate. *E. angustifolia* treatments alone did not exhibit any statistically significant physiological toxicity on germination. When applied together with methacrylate, *E. angustifolia* was found to mitigate the physiological toxic effects induced by methacrylate.

In the root growth analysis, treatments with methacrylate were found to negatively affect root development. While the root length in the control group was 9.73 cm, methacrylate exposure reduced this to 4.05 cm. In groups treated with 200 mg/mL *E. angustifolia* extract alongside methacrylate, a notable increase in root growth was observed, supporting a 32.3% enhancement in root elongation ($p > 0.05$). Additionally, the plant extract alone did not exhibit any toxic effects on root development. These findings indicate that *E. angustifolia* plays a protective role against methacrylate-induced stress in root growth (Table 3).

Methacrylate treatment also exhibited inhibitory effects on both germination rate and bulb weight gain. Measurements from the control group and groups treated with 100 mg/mL and 200 mg/mL *E. angustifolia* were found to be very similar, indicating that the plant extract alone did not exert any harmful effects on the examined parameters. In the 100 mg/mL *E. angustifolia* + methacrylate treatment, bulb weight gain increased by 20.25% compared to methacrylate alone (Table 2). In the 200 mg/mL *E. angustifolia* + methacrylate group, this increase rose to 39.01%, corresponding with the higher extract concentration. These results demonstrate that *E. angustifolia* extract mitigates methacrylate-induced toxic effects in a dose-dependent manner and partially restores root growth and weight gain, supporting overall plant development.

Table 2. Effects of Methacrylate (positive control) and *E. angustifolia* + Methacrylate treatments on the weight gain of *Allium cepa* bulbs ($n = 20$).

Groups	Initial - Final	Weight Gain (g)
Control	11.52 ± 0.72d* - 16.84 ± 1.26a*	+5.32
250 mg/L Methacrylate	11.02 ± 1.29c* - 11.31 ± 2.08b*	+0.29
<i>E. angustifolia</i> 100 mg/mL	10.28 ± 1.69a* - 15.37 ± 1.13c*	+5.09
<i>E. angustifolia</i> 200 mg/mL	11.22 ± 1.07c* - 16.43 ± 1.17d*	+5.21
<i>E. angustifolia</i> 100 mg/mL + 250mg/L Methacrylate	10.47 ± 1.83b* - 13.01 ± 1.85e*	+2.54
<i>E. angustifolia</i> 200 mg/mL + 250mg/L mg/L Methacrylate	11.86 ± 2.03b* - 15.55 ± 1.48f*	+3.69

Table 3. Effects of Methacrylate and *E. angustifolia* + Methacrylate combinations on root growth length and germination rate in *Allium cepa* (n = 20).

Groups	Minimum – Maximum (cm)	Average	Germination percentage
Control	9.17 - 10.28	9.73±0.46a*	%100
250 mg/L Methacrylate	3.63 - 4.42	4.05±1.32b*	%55
<i>E. angustifolia</i> 100 mg/mL	8.92 - 9.53	9.21±0.54c*	%95
<i>E. angustifolia</i> 200 mg/mL	9.05 - 9.72	9.39±1.21d*	%95
<i>E. angustifolia</i> 100 mg/mL + 250mg/L Methacrylate	4.41 - 5.15	4.87±0.83e*	%85
<i>E. angustifolia</i> 200 mg/mL+ 250mg/L Methacrylate	5.23 - 5.79	5.63±1.47f*	%90

Table 4. Changes in micronucleus (MN) frequency and mitotic index (MI) values in cells treated with Methacrylate (positive control) and *E. angustifolia* + Methacrylate combinations.

Groups	Micronucleus Frequency Mean ± SD	Mitotic Index (MI) Average	Percent MI %
Control	0.30 ± 0.34f*	889 ± 17.21a*	8.89
250 mg/L Methacrylate	62.47 ± 1.17e*	571 ± 18.37b*	5.71
<i>E. angustifolia</i> 100 mg/mL	3.23 ± 1.51d*	880 ± 20.24c*	8.80
<i>E. angustifolia</i> 200 mg/mL	1.36 ± 2.48c*	885 ± 25.32d*	8.85
<i>E. angustifolia</i> 100 mg/mL + 250mg/L Methacrylate	39.15 ± 2.62b*	725 ± 19.16e*	7.25
<i>E. angustifolia</i> 200 mg/mL+ 250mg/L Methacrylate	27.81 ± 3.01a*	753 ± 22.45f*	7.53

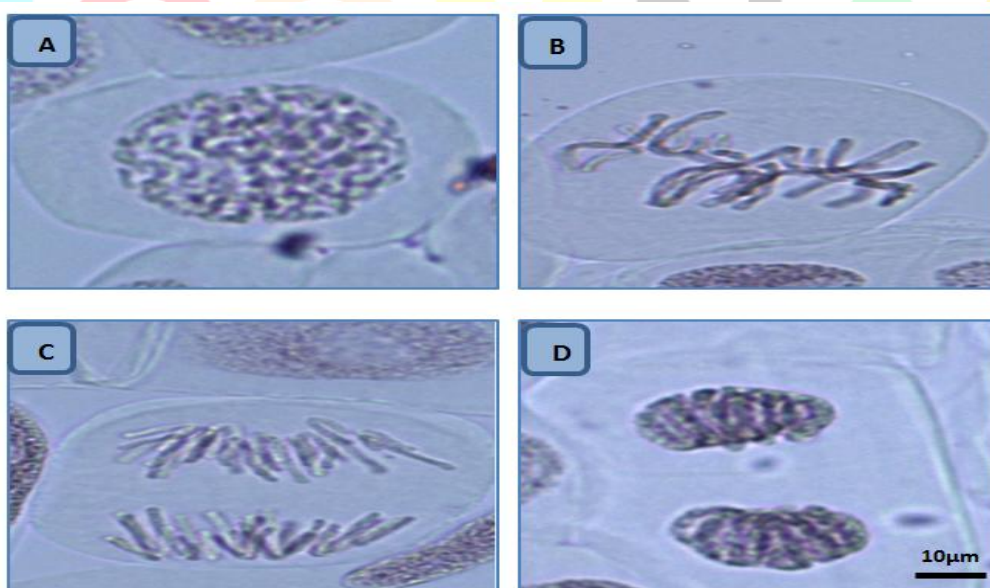


Figure 4. Mitotic stages observed in the control group. A: Prophase, characterized by chromatin condensation, B: Metaphase, where chromosomes align at the equatorial plane, C: Anaphase, showing separation of sister chromatids toward the poles, D: Telophase, with reformation of the nuclear envelope. (Scale bar = 10 μm).

In the study, the cytotoxic effects of methacrylate, used as a positive control, were evaluated in terms of micronucleus (MN) frequency, mitotic index (MI), and chromosomal abnormalities. The mitigating effects of *E. angustifolia* against methacrylate-induced cytotoxicity are presented in Table 5. The mitotic index is a critical indicator for assessing overall cell division and the effects of cytotoxic stress. In the MI evaluation, the control group was 8.89%, while *E. angustifolia* at 100 mg/mL and 200 mg/mL were 8.80% and 8.85%, respectively (Table 4). This similarity indicates that the plant extracts alone did not exhibit cytotoxic effects on the mitotic index. In contrast, the positive control methacrylate reduced the MI to 5.71%, which was statistically significant ($p < 0.05$). Applications combining *E. angustifolia* with methacrylate showed increased MI compared to methacrylate alone. Specifically, *E. angustifolia* 100 mg/mL + 250 mg/L methacrylate had an MI of 7.25%, and *E. angustifolia* 200 mg/mL + 250 mg/L methacrylate had an MI of 7.53%. These results indicate that the plant extracts suppressed the division-inhibiting toxic effects of methacrylate.

Regarding chromosomal abnormalities, the presence of micronuclei (MN) is considered a direct indicator of DNA damage and serves as a biomarker to evaluate both the effects of cytotoxic agents and the efficiency of cellular repair mechanisms. In terms of MN frequency, the control group exhibited a value of 0.30 ± 0.34 , which increased to 62.47 ± 1.17 following methacrylate treatment. For the combined treatments, *E. angustifolia* 100 mg/mL + 250 mg/L methacrylate and *E. angustifolia* 200 mg/mL + 250 mg/L methacrylate, the MN frequencies were 39.15 ± 2.62 and 27.81 ± 3.01 , respectively.

Table 5. Chromosomal damages induced by 250 mg/L methacrylate; VC: Vagrant chromosome, PF: Pole flattening, SC: Stick Chromosome, UDC: Unequally distributed chromatin, B: Bridge, PS: Pole shift, F: Fragment.

	Control	<i>E. angustifolia</i> 200 mg/mL	<i>E. angustifolia</i> 100 mg/mL	<i>E. angustifolia</i> 200 mg/mL + 250mg/L Methacrylate	<i>E. angustifolia</i> 100 mg/mL+ 250mg/L Methacrylate	Methacrylate 250mg/L
Total number of <i>Allium cepa</i> root tips	10	10	10	10	10	10
Total number of mitotic cells	100	100	100	100	100	100
VC	$0.80 \pm 0.37^*$	$1.43 \pm 0.71^*e$	$1.62 \pm 1.54^*d$	$42.11 \pm 2.48^*c$	$51.21 \pm 1.76^*b$	$70.32 \pm 2.52^*a$
PF	$0.70 \pm 0.24^*f$	$1.16 \pm 1.28^*e$	$1.34 \pm 2.03^*d$	$35.27 \pm 1.84^*c$	$49.16 \pm 1.32^*b$	$64.17 \pm 2.07^*a$
SC	$0.60 \pm 0.25^*f$	$0.93 \pm 1.72^*e$	$1.09 \pm 1.46^*d$	$32.96 \pm 1.23^*c$	$42.17 \pm 1.42^*b$	$62.83 \pm 2.34^*a$
UDC	$0.00 \pm 0.00^*f$	$0.70 \pm 1.14^*e$	$1.07 \pm 1.15^*d$	$27.71 \pm 1.34^*c$	$39.49 \pm 2.64^*b$	$50.65 \pm 3.46^*a$
B	$0.30 \pm 0.20^*f$	$0.62 \pm 2.05^*e$	$0.87 \pm 2.37^*d$	$21.33 \pm 1.76^*c$	$33.57 \pm 1.19^*b$	$47.39 \pm 1.88^*a$
PS	$0.10 \pm 0.30^*f$	$0.54 \pm 2.17^*e$	$0.62 \pm 1.63^*d$	$18.78 \pm 2.31^*c$	$28.64 \pm 1.22^*b$	$41.46 \pm 2.53^*a$
F	$0.00 \pm 0.00^*f$	$0.48 \pm 1.36^*e$	$0.51 \pm 2.17^*d$	$13.17 \pm 2.26^*c$	$22.36 \pm 1.03^*b$	$25.23 \pm 2.67^*a$

The highest frequency of chromosomal abnormalities was observed in the form of vagrant chromosomes. In the control group (Figure 4, Table 5), this frequency was 0.80 ± 0.37 , while in the 250 mg/L methacrylate-treated group, it increased to 70.32 ± 2.52 (Figure 5). The application of *E. angustifolia* 200 mg/mL + 250 mg/L methacrylate and *E. angustifolia* 100

mg/mL + 250 mg/L methacrylate reduced vagrant chromosome damage by 40.1% and 27.18%, respectively, compared to the positive control. Additionally, chromosomal damages such as anaphase pole flattening, chromosome stickiness, unequal chromatin distribution, bridge formation, pole shift, and fragment formation were detected (Table 5). Evaluation of these chromosomal abnormalities revealed that the protective effect of *E. angustifolia* extract against the pronounced genotoxic effects induced by the positive control increased in a dose-dependent manner. Both *E. angustifolia* 200 mg/mL + 250 mg/L methacrylate and *E. angustifolia* 100 mg/mL + 250 mg/L methacrylate treatments significantly reduced methacrylate-induced genotoxicity and exhibited a recovery profile. These findings indicate that the plant extract has potential as an effective bio-protective agent in mitigating DNA and chromosomal damage caused by methacrylate.

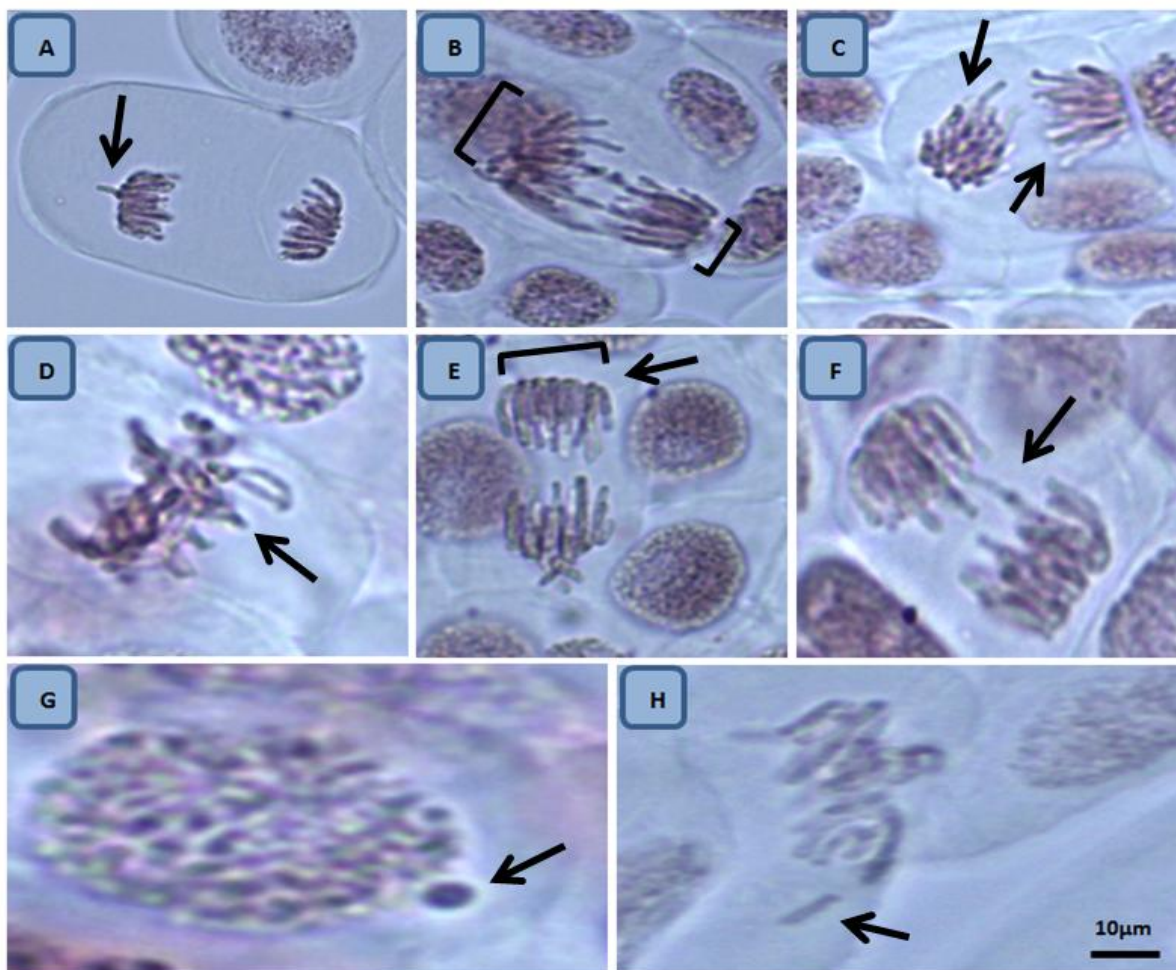


Figure 5. Chromosomal abnormalities induced by 250 mg/L methacrylate application: A: Vagrant chromosome, B: Unequal chromatin distribution, C: Pole shift in anaphase, D: Chromosome stickiness, E: Pole flattening, F: Bridge formation, G: MN, H: Fragment formation. (Scale bar = 10 μ m).

The anatomical damages induced by methacrylate were evaluated using the *Allium cepa* L. bioassay system (Figure 6). In the transverse sections of the root tips from the positive control group treated with methacrylate, abnormalities were observed in the epidermal tissue, including cell compaction and irregular arrangement; in the vascular bundle tissues, irregular distribution

and collapse; and in the cortex tissue, thickening of the cell walls and flattened nuclei deviating from the normal nuclear morphology, indicating significant anatomical tissue damage.

In the groups treated with *E. angustifolia* extract, which demonstrated bioactivity both physiologically and cytogenetically, a dose-dependent reduction in the severity of tissue damages induced by the positive control methacrylate was observed. In the 100 mg/mL *E. angustifolia* + 250 mg/L methacrylate treatment, epidermal cells showed less compaction with no irregular arrangement, cortical cell walls exhibited only occasional thickening, and vascular tissues remained largely undamaged. Notably, the 200 mg/mL *E. angustifolia* + 250 mg/L methacrylate treatment preserved the anatomical structure almost entirely. These findings indicate that the antioxidant compounds present in *E. angustifolia* are effective in mitigating anatomical tissue alterations caused by toxic stress.

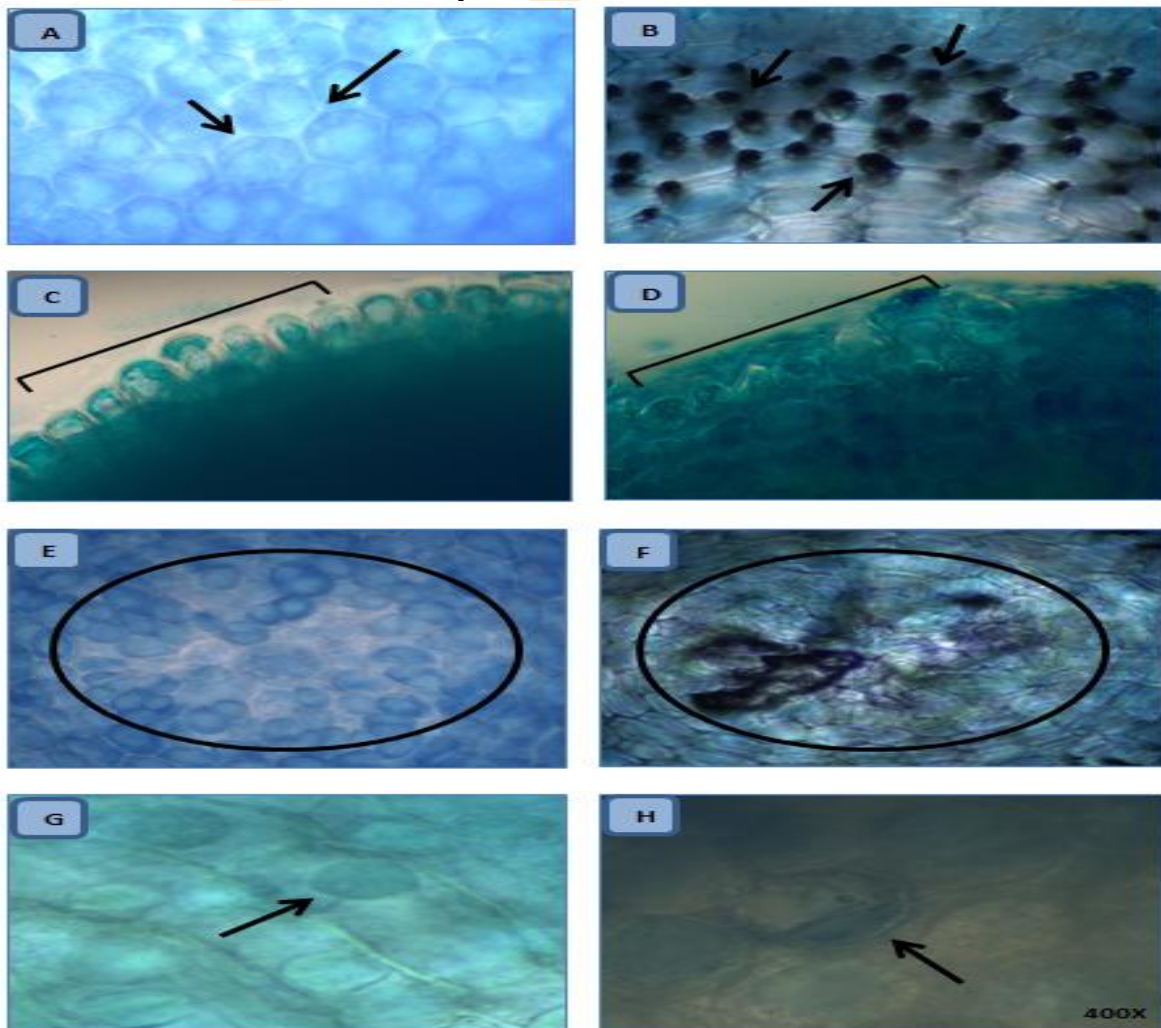


Figure 6. Anatomical structure profiles in the control and treatment groups following methacrylate exposure. A: Cortex cells in the control group, B: Thickening between cortex cell walls after methacrylate treatment, C: Regular cell arrangement in the epidermis of the control group, D: Deformations in epidermal tissue after methacrylate treatment, E: Well-organized vascular bundle in the control group, F: Collapse and compression of vascular bundle morphology after methacrylate treatment, G: Oval-shaped cell nucleus in the control group, H: Flattened cell nucleus after methacrylate treatment.

Elaeagnus angustifolia leaf extract functions as an effective bio-protective agent in significantly alleviating the physiological and genotoxic stress induced by methacrylate in *Allium cepa*. Methacrylate exposure causes marked inhibition in key physiological parameters, such as germination, root length, and weight gain; however, co-application with the extract demonstrated a dose-dependent reduction of these adverse effects.

These findings are consistent with the reported biological activity of *E. angustifolia*. Zor et al. (2025) and Doğan et al. (2025) reported that the leaf extract is rich in phenolic compounds, which exhibit strong antioxidant, antimicrobial, and enzyme inhibition properties. Similarly, Nasrabadi et al. (2021) and other studies (Ishaq, 2015; Khan, 2016; Incilay, 2014) have highlighted the presence of highly bioactive phenolic compounds in both the leaves and other plant parts. These phenolic profiles are known to modulate cellular stress response mechanisms.

The cytogenetic findings obtained in our study further support the protective role of the extract. Methacrylate, used as a positive control, significantly reduced the mitotic index (MI) and caused a pronounced increase in chromosomal abnormalities, including micronucleus (MN) formation, sticky chromosomes, bridges, fragments, and particularly vagrant chromosomes. In contrast, *E. angustifolia* treatments restored MI values closer to normal levels and reduced MN and other chromosomal damages.

This recovery is consistent with the presence of phenolic compounds such as gallic acid, trans-ferulic acid, and protocatechuic acid, which have been associated in the literature with the extract's antioxidant and cell-protective properties. Previously reported antioxidant and antimutagenic effects (Okmen & Turcan, 2014; Saboonchian, 2014) corroborate the observed reduction in genotoxicity in our study.

CONCLUSION

Methacrylate caused physiological, genotoxic, and anatomical damages in the roots of *Allium cepa*, whereas the leaf extract of *Elaeagnus angustifolia* was found to reduce these adverse effects in a dose-dependent manner. The plant extract increased the germination rate, root length, and weight gain, while elevating the mitotic index and significantly decreasing micronucleus formation and chromosomal abnormalities. Anatomical evaluations revealed that the extract application largely prevented the damages observed in the epidermis, cortex, and vascular tissues under methacrylate exposure. When all these data are evaluated together, the dose-dependent increase in the protective effect of *E. angustifolia* extract indicates a bioprotective mechanism consistent with the plant's rich phenolic content and biological activities. This study demonstrates the potential of *E. angustifolia* to alleviate plant stress responses induced by environmental pollutants or chemical agents, providing new insights into its biological and ecological applications.

REFERENCES

- Akbolat, D., Ertekin, C., Menges, H. O., Guzel, E., & Ekinici, K. (2008). Trans-Tiliroside: A potent α -glucosidase inhibitor from the leaves of *Elaeagnus angustifolia* L. *Asian Journal of Chemistry*, 20(3), 2358.
- Clayton, G. D., & Clayton, F. E. (Eds.). (1981). *Patty's Industrial Hygiene and Toxicology* (3rd rev. ed., Vol. 2A). Wiley.
- Dirr, M. (1990). *Manual of woody landscape plants: Their identification, ornamental characteristics, culture, propagation and uses* (pp. 301–306). Stipes Publishing Company.
- Doğan, S., Meşe, A., Baran, M. F., Baran, A., Aktepe, N., Ahmadian, E., Mohamed, A. J., Eftekhari, A., & Aktaş, H. (2025). Anticancer, antioxidant and antimicrobial activity of *Elaeagnus angustifolia* L. leaf extract. *Drug Design, Development and Therapy*, 19, 7719–7734. <https://doi.org/10.2147/DDDT.S509705>
- Farzaei, M. H., Bahramsoltani, R., Abbasabadi, Z., & Rahimi, R. (2015). A comprehensive review on phytochemical and pharmacological aspects of *Elaeagnus angustifolia* L. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 67(11), 1467–1480. <https://doi.org/10.1111/jphp.12442>
- Fenech, M., Chang, W. P., Kirsch-Volders, M., Holland, N., Bonassi, S., & Zeiger, E. (2003). HUMN Project: Detailed description of the scoring criteria for the cytokinesis-block micronucleus assay using isolated human lymphocyte cultures. *Mutation Research*, 534(1–2), 65–75. [https://doi.org/10.1016/s1383-5718\(02\)00249-8](https://doi.org/10.1016/s1383-5718(02)00249-8)
- Fouzati, A., Hussein, O. J., Gupta, I., Al-Farsi, H. F., Khalil, A., & Al Moustafa, A.-E. (2022). *Elaeagnus angustifolia* plant extract induces apoptosis via p53 and STAT3 signaling pathways in triple-negative breast cancer cells. *Frontiers in Nutrition*, 9, 871667. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.871667>
- Fu, Y., Ruan, J., Zhang, P., et al. (2025). The bioactive constituents from the fruits of *Elaeagnus angustifolia* L. *Phytochemistry*, 230, 114334.
- Gülcü, S., & Çelik-Uysal, S. (2010). The effects of seedling density on morphological characteristics of oleaster (*Elaeagnus angustifolia* L.) seedlings. *Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, A(2), 74–81.
- Hamidpour, R., Hamidpour, S., Hamidpour, M., et al. (2017). Russian olive (*Elaeagnus angustifolia* L.): From a variety of traditional medicinal applications to its novel roles as active antioxidant, anti-inflammatory, anti-mutagenic and analgesic agent. *Journal of Traditional and Complementary Medicine*, 7(1), 24–29. <https://doi.org/10.1016/j.jtcme.2015.09.004>
- Hashimoto, K., Sakamoto, J., & Tani, H. (1981). Neurotoxicity of acrylamide and related compounds and their effects on male gonads in mice. *Archives of Toxicology*, 47, 179–189.
- Hassanzadeh, Z., & Hassanpour, H. (2018). Evaluation of physicochemical characteristics and antioxidant properties of *Elaeagnus angustifolia* L. *Scientia Horticulturae*, 238, 83–90.
- Huojiiaihemaiti, H., Mutaillifu, P., Omer, A., Nuerxiat, R., Duan, X., Xin, X., & Yili, A. (2022). Isolation, structural characterization, and biological activity of the two acidic polysaccharides from the fruits of *Elaeagnus angustifolia* Linnaeus. *Foods*, 11(21), 3514. <https://doi.org/10.3390/foods11213514>

Incilay, G. (2014). Volatile composition, antimicrobial and antioxidant properties of different parts from *Elaeagnus angustifolia* L. *Journal of Essential Oil-Bearing Plants*, 17, 1187. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2014.929044>

Ishaq, S., Rathore, H. A., Sabir, S. M., & Maroof, M. S. (2015). Antioxidant properties of *Elaeagnus umbellata* berry solvent extracts against lipid peroxidation in mice brain and liver tissues. *Food Science and Biotechnology*, 24, 673.

Ismagilova, A., Matt, L., Jannasch, P., Kisand, V., & Vares, L. (2023). Ecotoxicity of isosorbide acrylate and methacrylate monomers and corresponding polymers. *Green Chemistry*, 25(4), 1626–1634. <https://doi.org/10.1039/D2GC04178B>

Johannsen, F. R., Vogt, B., Waite, M., & Deskin, R. (2008). Mutagenicity assessment of acrylate and methacrylate compounds and implications for regulatory toxicology requirements. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 50(3), 322–335.

Kalyoncu, I. M., Ersoy, N., & Yılmaz, M. A. (2008). Research on the effects of some hormone and relative humidity levels on rooting of softwood top cuttings of Russian olive (*Elaeagnus angustifolia* L.) determined by the selection of breeding. *Süleyman Demirel Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 3(1), 9–18.

Khadivi, A. (2018). Phenotypic characterization of *Elaeagnus angustifolia* using multivariate analysis. *Industrial Crops and Products*, 120, 155–161.

Khan, S. U., Khan, A. U., Shah, A. U. H. A., Shah, S. M., Hussain, S., Ayaz, M., & Ayaz, S. (2016). Heavy metals content, phytochemical composition, antimicrobial and insecticidal evaluation of *Elaeagnus angustifolia*. *Toxicology and Industrial Health*, 32, 154.

Kol, G., Kutluer, F., Yalçın, E., et al. (2025). Eco-friendly remediation of Triflumuron-induced stress with *Capsella bursa-pastoris* extract. *Scientific Reports*, 15, 39061. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-26298-1>

McKean, D. R. (1982). In P. H. Davis (Ed.), *Flora of Turkey and the East Aegean Islands* (Vol. 7, pp. 533–534). Edinburgh University Press.

Moss, K., Alwood, J., & Auer, C. (1997). Acrylate regulation under TSCA; government and industry cooperation leads to EPA policy shift. *Chemical Health & Safety*, May/June, 38–41.

Nasrabadi, M. H., Parsivand, M., Mohammadi, N., & Moghaddam, N. A. (2022). Comparison of *Elaeagnus angustifolia* L. extract and quercetin on mouse model of knee osteoarthritis. *Journal of Ayurveda and Integrative Medicine*, 13(2), 100529. <https://doi.org/10.1016/j.jaim.2021.10.001>

Okmen, G., & Turkcan, O. (2014). A study on antimicrobial, antioxidant and antimutagenic activities of *Elaeagnus angustifolia* L. leaves. *African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines*, 11(1), 116–120. <https://doi.org/10.4314/ajtcam.v11i1.17>

Puga, T., Schafer, J., Buffalo, A., & Agbedanu, P. N. (2022). Broad spectrum antimicrobial potential of *Crassula ovata*. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2022.01.20.477177>

Saboonchian, F., Jamei, R., & Hosseini Sarghein, S. (2014). Phenolic and flavonoid content of *Elaeagnus angustifolia* L. (leaf and flower). *Avicenna Journal of Phytomedicine*, 4(4), 231–238.

Sarsar, O., Macar, T. K., Macar, O., Yalçın, E., & Çavuşoğlu, K. (2025). Multifaceted investigation of esfenvalerate-induced toxicity on *Allium cepa* L. *Scientific Reports*, 15, 16977. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01638-3>



5th INTERNATIONAL CONGRESS ON MULTIDISCIPLINARY NATURAL SCIENCES

Topatan, Z. Ş., Kalefetoğlu Macar, T., Macar, O., Yalçın, E., Çavuşoğlu, K., Acar, A., & Kutluer, F. (2024). Alleviatory efficacy of *Achillea millefolium* L. in etoxazole-mediated toxicity in *Allium cepa* L. *Scientific Reports*, 14, 31674. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81586-6>

Yalçın, E., Kalefetoğlu Macar, T., Macar, O., & Çavuşoğlu, K. (2021). Gıda boyası Tartrazin'in *A. cepa* L. kök ucu hücrelerindeki sitotoksik ve genotoksik etkilerine karşı yeşil kahvenin koruyucu rolü. *Akademik Gıda*, 19(1), 49–58.

Yildiztugay, E., Ozfidan-Konakci, C., Arikan, B., Alp, F. N., Elbasan, F., Zengin, G., & Cavusoglu, H. (2022). The hormetic dose-risks of polymethyl methacrylate nanoplastics on chlorophyll a fluorescence transient, lipid composition and antioxidant system in *Lactuca sativa*. *Environmental Pollution*, 308, 119651. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119651>

Zor, M., Sağlamtaş, R., Demirci, A., Ceyran, E., Fettahoğlu, K., & Demir, Y. (2025). Chemical composition, antimicrobial, and enzyme inhibitory properties of *Elaeagnus angustifolia* L. *Chemistry & Biodiversity*, 22(5), e202402802. <https://doi.org/10.1002/cbdv.202402802>

ICOMNAS



Svc, K-Nn Ve Mlp Algoritmaları İle Hepatit Hastalarının Yaşam Durumunun Öngörülmesi

*Büşra KANDEĞERİ¹
İlkay Sibel KERVANCI²*

Abstract

Hepatitis is a disease that increases disease burden and mortality rates by leading to severe outcomes such as cirrhosis and liver cancer; therefore, early and accurate risk classification is of great importance. This study aims to predict the survival status of hepatitis patients using machine learning techniques. In this context, Support Vector Machines (SVM), K-Nearest Neighbors (kNN), and Multilayer Perceptron (MLP) methods were evaluated through 5-fold cross-validation. The findings revealed that the progression of survival could be predicted with an accuracy rate of up to 95%. The confusion matrices particularly indicated high correct classification rates in the “survival” class. Among the predictive variables, ascites (abdominal fluid), albumin, varices, histology, bilirubin, and spider angiomas were found to be the most influential features. In conclusion, despite the limited sample size, the use of SVM/kNN/MLP algorithms provides a feasible and effective framework for clinical decision support and risk prediction in hepatitis patients.

Keywords: Hepatitis, SVM, KNN, MLP, Clinical Decision Support Systems.

¹Gaziantep Üniversitesi, Biyoinformatik YL 0009-0001-7130-404X

² Dr.Öğr.Üyesi, Gaziantep Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 0000-0001-5547-1860:

GİRİŞ

Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) verilerine göre hepatit, her gün dünya çapında yaklaşık **3500 kişinin ölümüne** neden olmakta ve **6000 yeni enfeksiyon** ile yayılmaya devam etmektedir. 2019 yılında hepatite bağlı yıllık ölüm sayısı **1,1 milyon** iken, bu sayı 2022 itibarıyla **1,3 milyona** yükselmiştir. Günümüzde yaklaşık **304 milyon kişi**, hepatit B ve C enfeksiyonlarıyla yaşamını sürdürmektedir. Karaciğer iltihabına yol açan bu hastalık, erken tanı ve etkili tedavi sağlanmadığı takdirde **karaciğer yetmezliği, siroz ve karaciğer kanseri** gibi ciddi ve geri dönüşü olmayan komplikasyonlara neden olabilmektedir (World Health Organization). Bu nedenle, hepatit hastalarının **yaşam durumlarının erken ve doğru değerlendirilmesi**, tedavi planlamasının başarısı açısından kritik öneme sahiptir. Gecikmiş veya hatalı teşhis, tedavi hatalarına, komplikasyonlara ve ölümcül sonuçlara yol açabilir. Bu süreçte, hastalığın klinik belirtilerinin dikkatle analiz edilmesi ve hastanın tıbbi geçmişinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir.

Son yıllarda **yapay zekâ**, özellikle tıp alanında karmaşık problemlerin çözümüne yönelik etkili sistemlerin geliştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapay zekânın alt dallarından biri olan **makine öğrenmesi (ML)**, büyük ve çok boyutlu sağlık verilerini analiz ederek **erken tanı, tedaviye yanıt tahmini ve hasta izleme** gibi klinik süreçlerde önemli katkılar sunmaktadır. ML algoritmaları, **tıbbi görüntüleme, tanı destek sistemleri ve hasta risk sınıflandırması** gibi birçok uygulamada yüksek doğruluk oranlarıyla başarılı sonuçlar elde etmektedir. Özellikle **kanser teşhisi, diyabet izleme, kardiyovasküler hastalıkların erken tanısı ve COVID-19 öngörüsü** gibi alanlarda etkin biçimde kullanılmaktadır. **Derin öğrenme ve karar ağaçları** gibi teknikler sayesinde, karmaşık tıbbi verilerden anlamlı desenler çıkarılabilmektedir. Bu başarılar, makine öğrenmesinin yalnızca teorik bir yaklaşım değil, aynı zamanda **klinik karar alma süreçlerinde güçlü bir destek aracı** olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada, hepatit hastalarının yaşam durumu; **fiziksel muayene bulguları ve laboratuvar test sonuçlarını** içeren veri kümesi kullanılarak tahmin edilmiştir. Veri seti, 105 hepatit hastasına ait **19 niteliksel ve niceliksel değişkenden** (AGE, SEX, STEROID, ANTIVIRALS, FATIGUE, MALAISE, ANOREXIA, LIVER-BIG, LIVER FIRM, SPLEEN-PALPABLE, SPIDERS, ASCITES, VARICES, HISTOLOGY, BILIRUBIN, ALK-PHOSPHATE, SGOT, ALBUMIN ve PROTIME) oluşmaktadır. Sınıflandırma doğruluğunu artırmak amacıyla Destek Vektör Makineleri (SVM), k-En Yakın Komşular (KNN) ve Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) algoritmalarıyla deneyler gerçekleştirilmiş ve sonuçta %95'e varan doğruluk oranı elde edilmiştir. Bu bulgular, makine öğrenmesi temelli modellerin hepatit gibi karmaşık hastalıkların tanı ve prognozunda **etkin ve güvenilir bir yöntem** olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Makalenin devamında; **1. bölümde** literatür taraması, **2. Bölümde yöntem** veri seti ve kullanılan algoritmalar, **3. bölümde** deneysel sonuçlar, **4. bölümde** ise genel değerlendirme ve sonuçlara yer verilmiştir.

1. LİTARETÜR TARAMASI

Karaciğer hastalığı prognozunun tahmininde Lagrangian Support Vector Machine (LSVM) algoritmasıyla en anlamlı özellikleri seçmiş ve kNN, MLP ile SVM algoritmalarının birleşiminden oluşan hibrit bir model geliştirmiştir. Önerilen model, %100 AUC değeri ile yüksek doğruluk sağlamış ve makine öğrenmesi yöntemlerinin tıbbi karar destek sistemlerindeki etkinliğini göstermiştir. Bu çalışma, makine öğrenmesinin karaciğer

hastalıklarının teşhis ve prognoz tahmininde önemli bir araç olduğunu ortaya koymaktadır (Parisi vd., 2020, s. 3839-3852).

Moulaei ve arkadaşları (2023) tarafından gerçekleştirilen kapsamlı bir meta-analiz çalışmasında, viral hepatit tahmini üzerine yapılan 21 çalışmadaki toplam 82 makine öğrenmesi algoritması değerlendirilmiştir. Özellikle SVM ve kNN algoritmalarının yüksek duyarlılık ve özgüllükle öne çıktığı bu çalışma, makine öğrenmesinin hepatit hastalığının erken tanısı ve klinik yönetiminde önemli bir araç olabileceğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, bizim çalışmamızda hepatit hastalarında yaşam süresi tahmini amacıyla makine öğrenmesi kullanma yaklaşımımızla örtüşmektedir (Moulaei vd., 2023). Gao ve arkadaşları (2022), “laboratuvar parametreleri, fekal bakteriyal mikrobiyota, mykobiyota, virom, serum metabolom ve lipidom analizini kullanarak alkolik hepatitli hastalarda mortaliteyi tahmin etmek için gradient boosting, random forest, SVM ve lojistik regresyon modelleri uygulamıştır.” Ayrıca, “gradient boosting modellerinin bakteriyal & metabolik yollar veri setiyle 30 günlük ve fungal veri setiyle 90 günlük mortalite tahmininde MELD skorundan daha iyi performans göstererek 0.87 AUC elde etmiştir (Gao vd., 2022, s. 41).

2.YÖNTEM

2.1.DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE VERİSETİ

1.Verit Seti ve Açıklaması

Çalışmada, 105 hepatit hastasına ait 13 kategorik özellik (AGE, SEX, STERIOD, ANTIVIRALS, FATIGUE, MALAISE, ANOREXIA, LIVER-BIG, LIVER FIRM, SPLEEN-PALPABLE, SPIDERS, ASCITES, VARICES ve HISTOLOGY) ve 5 tıbbi laboratuvar sonucu (BILIRUBIN, ALK-PHOSPHATE, SGOT, ALBUMIN ve PROTIME) olmak üzere 18 özellik içeren veri seti kullanılmıştır. Bu veri seti “UCI ML Repository” den elde edilmiştir (Hepatitis [Dataset]. (1983). . <https://doi.org/10.24432/C5Q59J>, 1983). Tablo 1 de özelliklerin hepatitle ilişkisi ve klinik önemi yer almaktadır. Ayrıca veri setindeki alanların yaşam durumu üzerindeki etkisinin görseli Tablo1’de ki gibidir.

Tablo 1- Verit Seti Kategorik Özellikleri Hepatit İlişkisi ve Klinik Önemi

Terim	Hepatit ile İlişkisi	Klinik Önemi
SEX (Cinsiyet)	Erkeklerde bazı hepatit türlerinde (özellikle HBV) hastalık daha ağır seyredebilir (Ruggieri vd., 2018, s. 2302).	Tedavi ve risk değerlendirmesi açısından önemlidir.
STERIOD(Steroid kullanımı)	Bazı otoimmün hepatitlerde ve ağır hepatit ataklarında steroid tedavisi verilir (Czaja ve Deborah, 2002, s. 479-497)	Tedavi planlamasında dikkate alınır.
ANTIVIRALS (Antiviral ilaçlar)	HBV ve HCV enfeksiyonlarında virüsün çoğalmasını durdurmak için antiviral tedavi uygulanır (Barbara ve Bertolotti, (2015, s. 712-721).	Tedavi sürecini gösterir.
FATIGUE (Yorgunluk)	Hepatin en yaygın semptomlarından biridir (Yeonsoo vd., 2018, s. 388-395).	Hastanın yaşam kalitesini etkiler.
MALAISE (Keyifsizlik, kırıklık)	Hastalığın başlangıcında ve alevlenmelerde sık görülür (Rashid vd., 2025).	Erken tanı için ipucu olabilir.
ANOREXIA (İştahsızlık)	Akut ve kronik hepatitte sık görülür (Regev ve Schiff, 2005, s. 32-49).	Hastanın beslenme durumunu etkileyebilir.

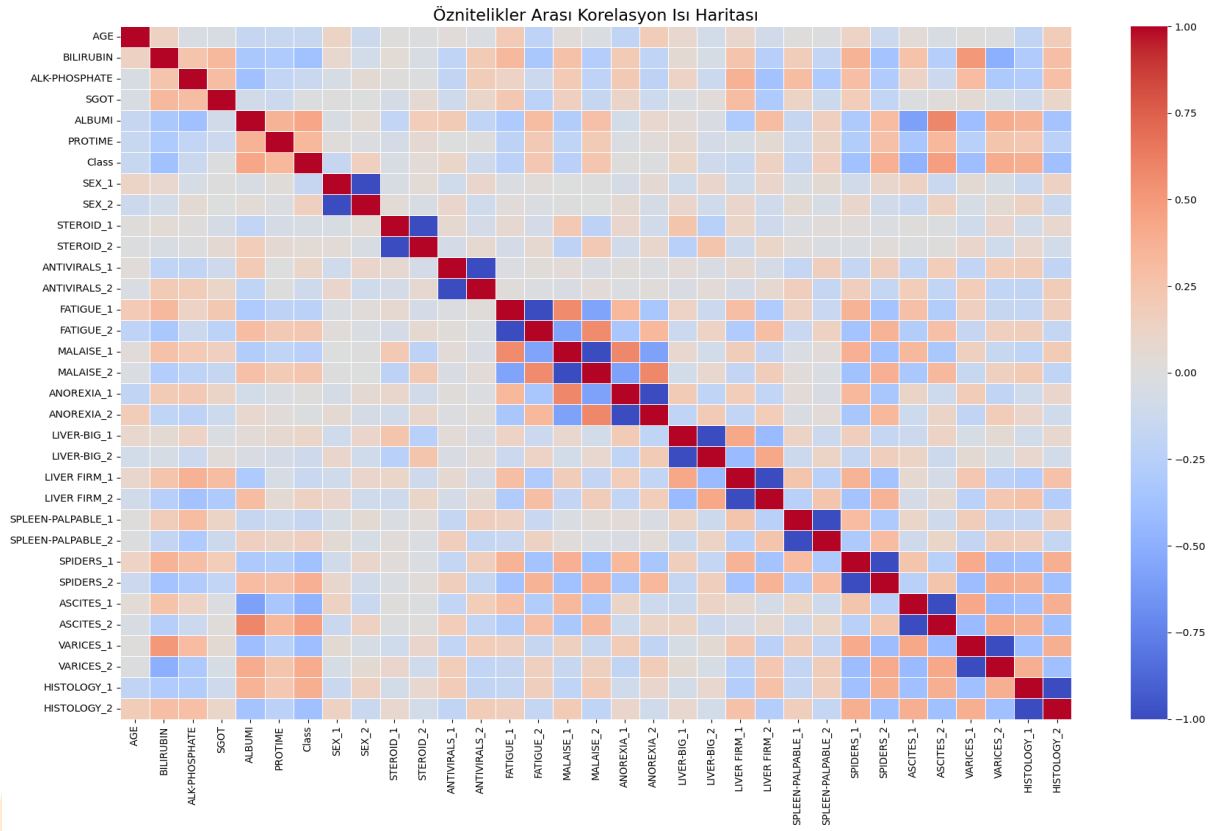
LIVER-BIG (Karaciğer büyümesi)	Karaciğerde iltihap, yağlanma, fibrozis veya tümör gibi durumlarda görülür (Koyama ve Brenner, 2017, s. 55-64).	Karaciğer hastalığının evresini gösterir.
LIVER FIRM (Karaciğer sertliği)	Fibrozis ve siroz gelişiminde karaciğer sertleşir (Rockey, 2022, s. 2000-2023).	Sirozun habercisidir.
SPLEEN- PALPABLE (Dalak büyümesi)	Portal hipertansiyon (karaciğer damar basıncı artışı) sonucu ortaya çıkar (Fernandez, 2015, s. 1406-1415).	İleri karaciğer hastalığı belirtisidir.
SPIDERS (Spider anjiomlar)	Sirozlu hastalarda ciltte görülebilir (Dogra ve Rashmi., 2011, s. 177-184).	Karaciğer yetmezliğinin göstergesi olabilir.
ASCITES (Asit)	Karaciğer yetmezliği ve portal hipertansiyonda karın sıvısı birikir (Muhammed vd., 2020).	İleri evre siroz belirtisidir.
VARICES (Varisler)	Portal hipertansiyon nedeniyle yemek borusunda varisler oluşur; kanama riski vardır (Malhi ve Bhasin, 2002, s. 119-128).	Hayati tehlike oluşturabilir.
HISTOLOGY (Histoloji)	Karaciğer biyopsisinde iltihap, fibrozis ve siroz derecesi belirlenir (Germani vd., 2011).	Hastalığın kesin tanısı ve evresi belirlenir.

Laboratuvar testlerine ait değişkenlerin ölçüm aralıkları ve değer destek sınırları Tablo 2 de yer almaktadır. Bu değerler genellikle karaciğer fonksiyonları, kanın pıhtılaşma durumu ve vücutta bazı temel biyolojik süreçler hakkında bilgi verir.

Tablo 2. Veri Seti Kategorik Özellikleri ve Destek Aralığı

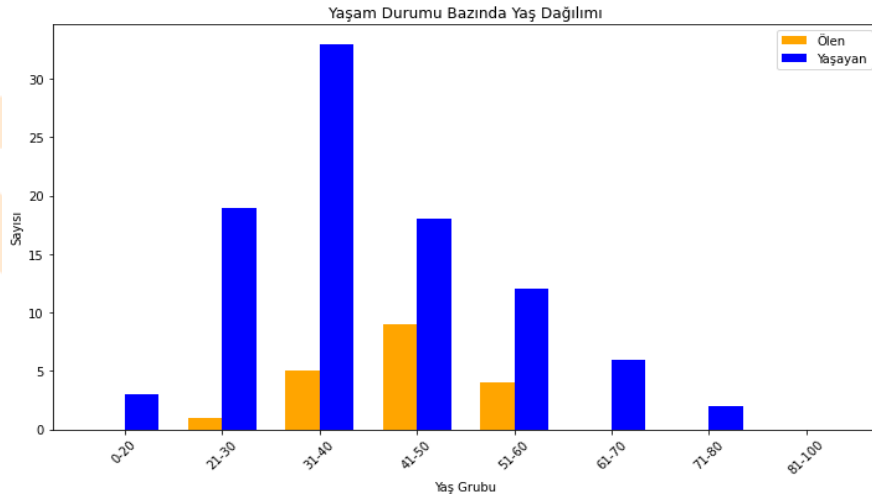
Özellik	Destek Aralığı
BILIRUBIN	0.3 – 4.8
ALK-PHOSPHATE	18 – 295
SGOT	4 – 420
ALBUMI	2.1 – 5.3
PROTIME	0 – 100 (bazı eksik)

Veri setindeki özelliklerin yaşam durumu ile en yüksek korelasyona sahip olduğu özellikler arası korelasyon Görsel 1 deki gibidir. Ve korelasyon sırasıyla “ASCITES”=0.476550, “ALBUMI”= 0.433738, “VARICES”= 0.404618, “HISTOLOGY”=0.386933, “BILIRUBIN”=0.380880, “SPIDERS”=0.379529 dir.



Görsel 1. Öznitelikler Arası Korelasyon Isı Haritası

Görsel 2’ de görüldüğü gibi, çalışmada ölen vakaların büyük çoğunluğu 41-50 yaş (n=9) ve 31-40 yaş (n=5) aralığında yoğunlaşmaktadır. Yaşayan bireyler ise en çok 31-40 yaş grubunda (n=33) ve 21-30 yaş grubunda (n=19) yer almaktadır. İleri yaş gruplarında hem yaşayan hem de ölen vaka sayıları oldukça düşüktür.



Görsel 2. Hepatitli Hasta Yaş ve Yaşam Durumu

2. Destek Vektör Makineleri (SVM)

Destek Vektör Makineleri (SVM), 1992’de tanıtılan ve sınıflandırma ile regresyon problemlerinde kullanılan güçlü bir gözetimli öğrenme yöntemidir. SVM’ler bir dizi gözetimli

öğrenme yöntemidir. SVM, makine öğrenmesi teorisini kullanarak tahmin doğruluğunu maksimize eden ve aynı zamanda veri üzerindeki aşırı uyumu (overfitting) otomatik olarak önleyen bir sınıflandırma ve regresyon aracıdır. SVM'ler, yüksek boyutlu özellik uzayında doğrusal fonksiyonların hipotez uzayını kullanan ve optimizasyon teorisine dayalı bir öğrenme algoritmasıyla eğitilen sistemler olarak tanımlanabilir. SVM, Yapısal Risk Minimizasyonu prensibini kullanarak genelleme yeteneğini artırır ve böylece daha sağlam modeller oluşturur. (Jakkula, 2006, s. 3).

3.En Yakın Komşu Algoritması (kNN)

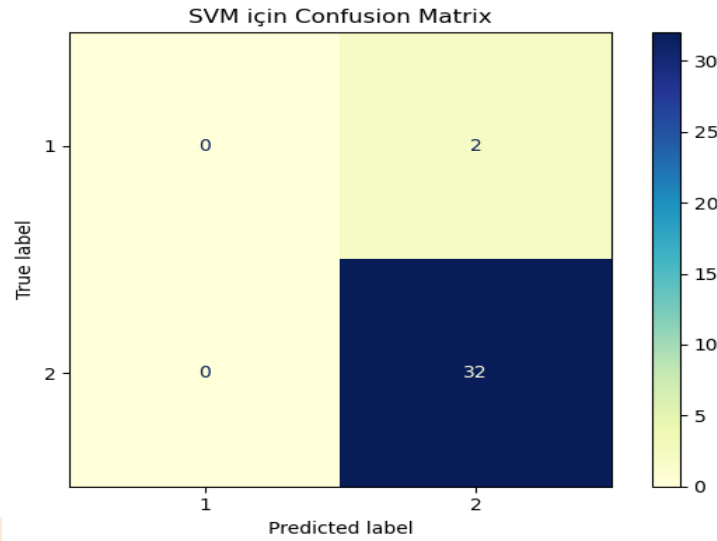
1951'de kurulan kNN yöntemi, o zamandan beri veri madenciliği, öneri sistemleri ve Nesnelerin İnterneti (IoT) gibi alanlarda temel bir araç haline geldi. kNN algoritması, sınıflandırma ve regresyon gibi gözetimli öğrenme görevlerinde yaygın olarak kullanılan, parametrik olmayan, örnek tabanlı bir öğrenme yöntemi olarak çalışır. Tahminler yapmak için eğitim verilerinden bir fonksiyon çıkaran model tabanlı öğrenme yaklaşımlarının aksine, kNN tembel öğrenme algoritması olarak sınıflandırılır. kNN algoritması, sınıflandırma ve regresyon gibi gözetimli öğrenme görevlerinde yaygın olarak kullanılan, parametrik olmayan, örnek tabanlı bir öğrenme yöntemi olarak çalışır. (Rajib vd., 2024, s. 113).

4.Çok Katmanlı Algılayıcı(MLP)

MLP, yapay sinir ağları (YSA) sınıfına ait, denetimli öğrenme yöntemleri içerisinde yaygın olarak kullanılan bir algoritmadır. MLP, hem sınıflandırma hem de regresyon problemlerinde etkili sonuçlar elde etmek amacıyla geliştirilmiştir. MLP, günümüzde; görüntü işleme, doğal dil işleme, finansal tahminleme, biyomedikal veri analizi ve daha birçok alanda başarıyla uygulanmaktadır. Derin öğrenme mimarilerinin temel yapı taşlarından biri olarak kabul edilir (Gardner ve Dorling, 1998, s. 2627-2636).

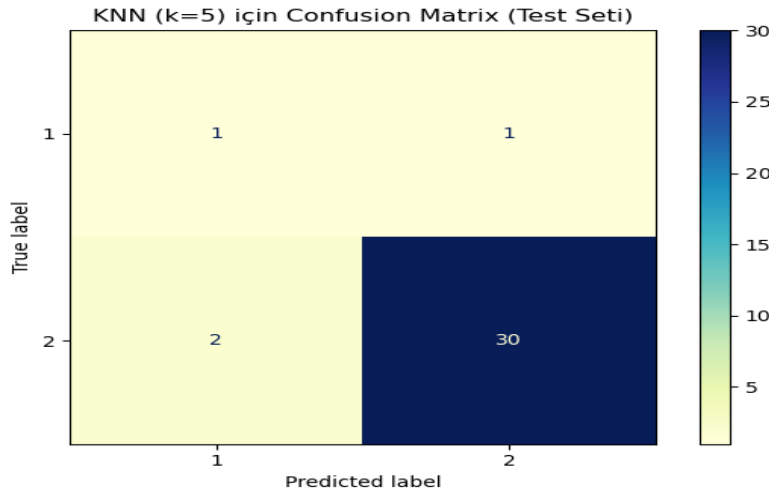
3.DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Hepatit hastalığının sınıflandırılması için SVM algoritması uygulanmış ve elde edilen performans karışıklık matrisi ile değerlendirilmiştir. Görsel 3'te Matrisde, modelin toplam 34 örnek üzerinde test edildiğini gösterilmektedir. Sınıflandırmaya göre 2 birey hepatit hastası (class 1) olarak belirtilmiş, geri kalan 32 birey sağlıklı (class 2) olarak sınıflandırılmıştır.



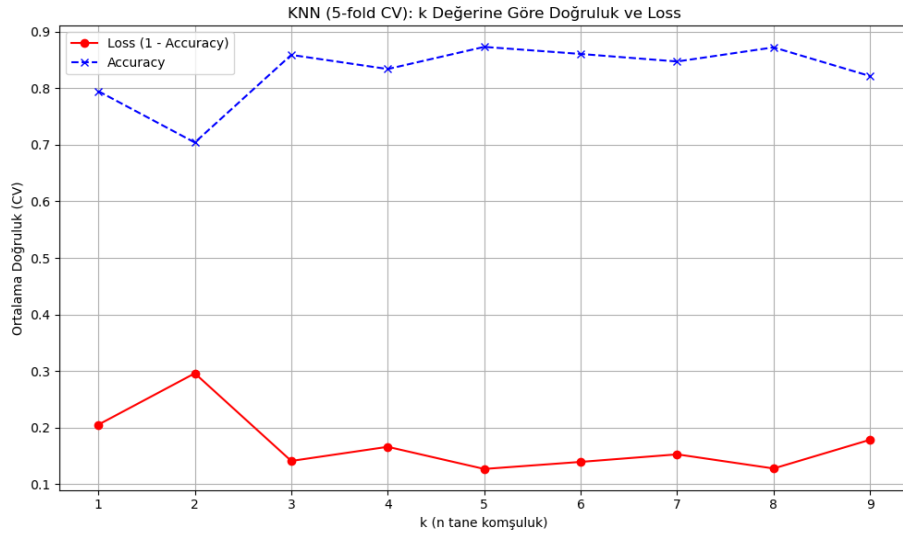
Görsel 3. SVM için Karışıklık Matrisi

Görsel 4 te görüldüğü gibi bireyleri **ölüm (sınıf 1)** ve **yaşam (sınıf 2)** olmak üzere iki sınıfa ayırarak sınıfı **ölüm (1)** olan bireylerden **1'i doğru, 1'i yanlış** (yaşam olarak) sınıflandırılmıştır. Sınıfı **yaşam (2)** olan 32 bireyden **30'u doğru, 2'si yanlışlıkla ölüm** sınıfına atanmıştır.



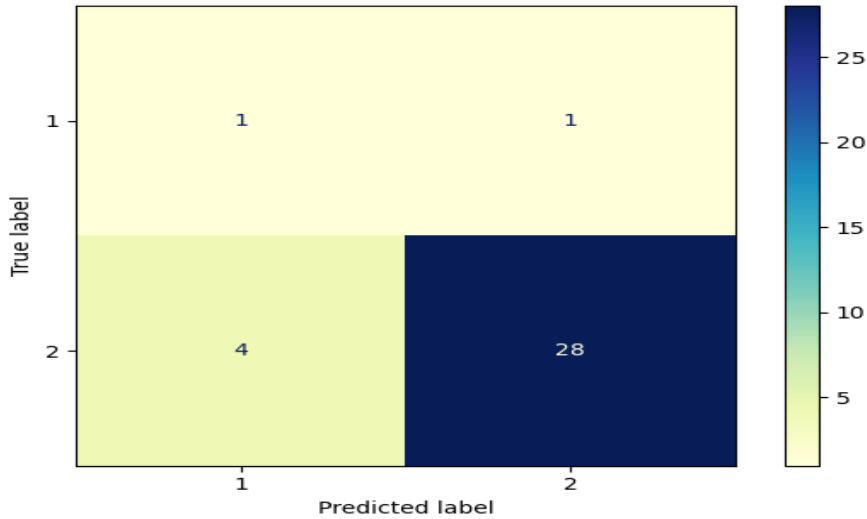
Görsel 4 Confusion Matrix (Test seti)

Yapılan 5-fold çapraz doğrulama sonuçlarına göre, kNN algoritmasının en yüksek doğruluğu $k = 3$ ve $k = 5$ değerlerinde elde ettiği gözlemlenmiştir. Bu durum, modelin hem genelleme yeteneği hem de öğrenme performansı açısından bu k değerlerinin optimal olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle çok küçük k değerlerinde modelin aşırı öğrenmeye (overfitting), çok büyük k değerlerinde ise yetersiz öğrenmeye (underfitting) eğilimli olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle, model karmaşıklığını artırmadan yüksek doğruluk sağlayan ve dengeli sonuçlar sunan $k = 5$ değeri, nihai modelde kullanılmak üzere tercih edilmiştir. Görsel 5 'te belirtilmiştir.



Görsel 5 kNN k Değerine Göre Doğruluk Grafiği

MLP Classifier için Confusing Matris



Görsel 6 MLP Sınıflandırıcısının Test Verisi Üzerindeki Karışıklık Matrisi

Görsel 6 da gerçek sınıfı **ölüm (1)** olan 2 bireyden yalnızca **1'i doğru** sınıflandırılmış, **1 birey ise yanlışlıkla "yaşam"** olarak tahmin edilmiştir. Gerçek sınıfı **yaşam (2)** olan 32 bireyden **28'i doğru**, **4'ü ise yanlışlıkla "ölüm"** sınıfına atanmıştır.

Performans Metrikleri

I. Doğruluk:

$$\frac{1 + 28}{34} = \frac{29}{34} \approx 0.8529 (\%85,3)$$

II. Hassasiyet (Precision) – Yaşam sınıfı için:

$$\frac{TP}{TP + FP} = \frac{28 + 1}{28} = \frac{28}{29} \approx 0.9655$$

III. Duyarlılık (Recall) – Yaşam sınıfı için:

$$\frac{TP}{TP + FN} = \frac{28}{28 + 4} = \frac{28}{32} = 0.875$$

IV. F1-Skoru (Yaşam sınıfı):

$$2 \cdot \frac{\text{Precision} \cdot \text{Recal}}{\text{Precision} + \text{Recal}} = 2 \cdot \frac{0.9655 \cdot 0.875}{0.955 + 0.875} \approx 0.918$$

4.SONUÇ

Bu çalışmada, hepatit hastalarının yaşam durumunun tahmini amacıyla SVC, kNN ve MLP algoritmaları kullanarak kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir. UCI veri tabanından elde edilen 105 hasta kaydı üzerinde yapılan deneylerde, modellerin performansları karşılaştırılmış ve en yüksek doğruluk oranı %95 olarak elde edilmiştir. Özellikle kNN algoritmasının k=5 parametresiyle en dengeli ve tutarlı sonuçları verdiği görülmüştür. Bulgular, makine öğrenmesi tabanlı modellerin hepatit gibi karmaşık hastalıkların prognozunda etkili, güvenilir ve klinik karar destek sistemlerinde kullanılabilir araçlar olduğunu ortaya koymaktadır. Gelecekte, modelin derin öğrenme yaklaşımları ve daha geniş veri kümeleriyle geliştirilmesi, klinik uygulamalarda doğruluk ve genellenebilirliği daha da artıracaktır.

ICOMNAS

Kaynakça

- Barbara ve Bertolotti. ((2015). Immunological aspects of antiviral therapy of chronic hepatitis B virus and hepatitis C virus infections. *Hepatology*, 61.2 , 712-721.
- Czaja ve Deborah. (2002). Diagnosis and treatment of autoimmune hepatitis. *Hepatology*, 36(2), 479-497.
- Dogra ve Rashmi. (2011). Cutaneous manifestations of common liver diseases. *Journal of clinical and experimental hepatology*, 1(3), 177-184.
- Fernandez, M. (2015). "Molecular pathophysiology of portal hypertension". *Hepatology*, 61(4), 1406-1415.
- Gao vd. (2022). Machine Learning Applied to Omics Datasets Predicts Mortality in Patients with Alcoholic Hepatitis. *Metabolites*, 12(1), 41.
- Gardnerand ve Dorling. (1998). Artificial neural networks (the multilayer perceptron)—a review of applications in the atmospheric sciences. *Atmospheric environment*, 32, 2627-2636.
- Germani vd. (2011). Assessment of fibrosis and cirrhosis in liver biopsies: an update. *Seminars in liver disease*, 31(1).
- Hepatitis [Dataset]. (1983). . <https://doi.org/10.24432/C5Q59J>. (1983). (UCI Machine Learning Repository) 06 17, 2025 tarihinde <https://doi.org/10.24432/C5Q59J> adresinden alındı
- Jakkula, V. (2006). Tutorial on support vector machine (svm). *School of EECS, Washington State University*, 37, 3.
- Koyama ve Brenner. (2017). Liver inflammation and fibrosis. *The Journal of clinical investigation*, 127(1), 55-64.
- Malhi ve Bhasin. (2002). Variceal bleeding and portal hypertension: much to learn, much to explore. *Endoscopy*, 34.02, 119-128.
- Moulaei vd. (2023). Machine learning for prediction of viral hepatitis: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Medical Informatics*, 179(105243).
- Muhammed vd. (2020). Impact of Ascites in Pulmonary Function of Patients with Portal Hypertension. *Medical Forum Monthly*, 31(10).
- Parisi vd. (2020). A novel hybrid algorithm for aiding prediction of prognosis in patients with hepatitis. *Neural Computing and Applications*, 32, 3839–3852.
- Rajib vd. (2024). Enhancing K-nearest neighbor algorithm: a comprehensive review and performance analysis of modifications. *Journal of Big Data*, 11.1, 113.
- Rashid vd. (2025). Psychosomatic and Psychological Impact of Hepatitis C: A Cross-Sectional Study of Depression, Fibrosis, and Somatic Symptoms in Treatment-Naive and Treatment-Experienced Patients Who Achieved Sustained Virologic Response. *Cureus*, 13(7).
- Regev ve Schiff. (2005). Clinical features of hepatitis. *Viral Hepatitis*, 12(3), 32-49.
- Rockey, D. C. (2022). "Hepatic fibrosis and cirrhosis. *Yamada's Textbook of Gastroenterology*, 2000-2023.
- Ruggieri vd. (2018). Sex-dependent outcome of hepatitis B and C viruses infections: synergy of sex hormones and immune responses? *Frontiers in Immunology*, 9, 2302.
- World Health Organization. (2025). 06 11, 2025 tarihinde https://www.who.int/health-topics/hepatitis#tab=tab_1 adresinden alındı
- Yeonsoo vd. (2018). Hepatitis B virus infection: Fatigue-Associated illness experiences among Koreans. *Gastroenterology nursing*, 41(5), 388-395.



Performance Evaluation of Hargreaves and Allen Models for Solar Radiation Estimation in Dublin Using a 5-Year Dataset (2020–2024)

Can EKİCİ¹

Abstract

In this study, five years of meteorological data (2020–2024) from Dublin Airport were used to calibrate and evaluate the Allen and Hargreaves solar radiation estimation models. The models showed similar statistical performances. Although the predictive accuracy was moderate, the results indicate that both models can partially represent solar radiation under Dublin's climate. In future studies, models incorporating parameters such as humidity or cloud cover may be tested to assess whether they provide improved estimation accuracy.

Keywords: Allen model; Hargreaves model; Dublin, solar radiation

¹ Dr., Türk Standardları Enstitüsü, Orcid: 0000-0002-1123-0253

1. Introduction

Accurate estimation of solar radiation is vital for energy and climate-related applications, yet its direct measurement is sometimes limited due to the high cost and maintenance requirements of radiometric instruments. In such cases, solar radiation estimation models are employed to predict global solar irradiance using commonly available meteorological parameters such as temperature, humidity, and sunshine duration [1,2,3].

In this study, five years of Dublin Airport's climatic data (2020–2024) obtained from Ireland's national meteorological agency, Met Éireann, were used to calibrate and evaluate the Allen [4] and Hargreaves [5] solar radiation estimation models, followed by performance evaluation through error analysis.

The meteorological dataset for this study was retrieved in October 2025 from the official Met Éireann database (<https://www.met.ie/climate/available-data/historical-data>) for the Dublin Airport station.

The key mathematical expressions employed in the models are presented below

The solar declination angle (δ) is calculated using Equation 1, where J represents the day of the year ($J = 1$ for January 1 and $J = 365$ or 366 for December 31) [6].

$$\sin \delta = 0.39785 * \sin [278.97 + 0.9856J + 1.9165 * \sin(356.6 + 0.9856J)] \quad (1)$$

The sunrise hour angle (ω_s) is calculated using Equation 2, where ϕ denotes the site latitude [7].

$$\omega_s = \cos^{-1} [-\tan \phi * \tan \delta] \quad (2)$$

The eccentricity correction factor of the Earth's orbit (E_0), defined as the reciprocal of the square of the Earth–Sun radius vector, can be approximated by a simplified expression given in Equation 3 [7].

$$E_0 = 1 + 0.033 * \cos \left[\left(\frac{2\pi * J}{365} \right) \right] \quad (3)$$

Equation 4 expresses the daily extraterrestrial radiation, where I_{sc} is the solar constant ($4.921 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$) [2,7].

$$H_0 = \frac{24}{\pi} * I_{sc} * E_0 * \sin \phi * \sin \delta * \left[\frac{\pi}{180} * \omega_s - \tan \omega_s \right] \quad (4)$$

The Allen and Hargreaves models examined for the Dublin case in this study are presented below.

Allen [4] proposed a self-calibrating model for estimating mean global solar radiation as a function of the mean monthly maximum and minimum air temperatures. The formulation of this model is given in Equation 5.

$$\frac{H}{H_0} = a * (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (5)$$

Hargreaves et al. [5] proposed a simple empirical method for estimating global solar radiation, as shown in Equation 6, where a and b denote the empirical coefficients.

$$\frac{H}{H_0} = a * (T_{max} - T_{min})^{0.5} + b \quad (6)$$

2. Meteorological Data

In this study, five years of meteorological data (2020–2024) from Dublin Airport, obtained from Met Éireann, were used to derive the empirical coefficients of the Allen [4] and Hargreaves [5] models. The performance of both models was subsequently evaluated through error analyses using the same dataset. The parameters employed in these models; daily total global solar radiation (H), daily minimum temperature (T_{min}), and daily maximum temperature

($T_{\max}$); were obtained from the daily measurement records of the mentioned meteorological dataset.

The meteorological data used in this study are publicly accessible through Met Éireann's official database (<https://www.met.ie/climate/available-data/historical-data>), which was accessed in October 2025.

The Dublin Airport meteorological station, identified as Station No. 532 in the Met Éireann network, has been recording observations since 1939. Dublin Airport meteorological station (No. 532) is located at latitude 53.4278°N, longitude 6.2408°W, and elevation 71 m above sea level.

3. Methods of Evaluation

This section describes the statistical indicators used to evaluate model performance. Using the derived empirical coefficients, daily global solar radiation was estimated and compared with measured values to quantitatively assess model accuracy.

Model performance was evaluated using three statistical indicators: Mean Percentage Error (MPE), Mean Bias Error (MBE), and Root Mean Square Error (RMSE), as defined in Equations 7–9. In these equations, $H_{i,m}$ and $H_{i,c}$ denote the measured and calculated values, respectively, and N is the total number of observations [2].

The RMSE indicates the model's short-term accuracy by measuring point-by-point deviations between estimated and observed values. The MBE reflects systematic bias and long-term accuracy, with positive values indicating overestimation and negative values indicating underestimation. The MPE represents the average percentage error between predicted and measured data [8].

$$MPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left[\frac{H_{i,c} - H_{i,m}}{H_{i,m}} \right] \cdot 100 \quad (7)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n H_{i,c} - H_{i,m}}{N} \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_{i,c} - H_{i,m})^2}{N}} \quad (9)$$

The Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE) is used to assess model performance, where values closer to 1 indicate higher predictive accuracy. Its formulation is given in Equation 10, with $\bar{H}_m$ denoting the mean of the measured radiation values [2].

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (H_{i,m} - H_{i,c})^2}{\sum_{i=1}^n (H_{i,m} - \bar{H}_m)^2} \quad (10)$$

4. Results and Evaluation

Meteorological data from Dublin Airport for the 2020–2024 period were obtained from the Met Éireann database. The parameters used in the Allen (Eq. 5) and Hargreaves (Eq. 6) models (daily total global solar radiation (H) and daily minimum and maximum temperatures ($T_{\min}$, $T_{\max}$)) were taken from this database. The daily extraterrestrial radiation (H_0) was calculated for each day using Equation 4. To establish the relationships, regression analysis was performed in Excel using the LINEST function, yielding the empirical coefficients for both models: $a = 0.1443$ for the Allen model, and $a = 0.1397$, $b = 0.0128$ for the Hargreaves model. Using these coefficients, daily global solar radiation values were calculated and compared with measured observations. The resulting errors were analyzed using the statistical indicators

described in the previous section, and Mean Percentage Error (MPE) analysis was additionally applied on monthly basis.

Table 1 shows the statistical error indicators for the models.

The error analysis results of the Allen and Hargreaves models are quite similar. This can be attributed to the clustering of the data points around a relatively thick linear trend band (Figure 1). Due to the linear nature of both models, such data dispersion can only be represented at a general trend level. Furthermore, since both models employ the same independent variables and share a linear structure, their error analysis outcomes are expected to be similar. Therefore, it can be concluded that while the models capture the overall trend reasonably well, they fail to fully reflect local fluctuations.

Table 1. Error analysis results for the models

Model		Monthly MPE	Model-wide	
Allen	January	-20.53	MBE	0.08
	February	-12.44	RMSE	3.34
	March	-19.89	MPE	-20.26
	April	-8.34	NSE	0.79
	May	-7.44		
	June	-16.61		
	July	-20.09		
	August	-21.32		
	September	-35.35		
	October	-21.61		
	November	-24.73		
	December	-34.19		
Hargreaves	January	-21.41	MBE	0.08
	February	-13.09	RMSE	3.35
	March	-20.32	MPE	-20.66
	April	-8.32	NSE	0.79
	May	-7.38		
	June	-16.56		
	July	-20.25		
	August	-21.44		
	September	-35.54		
	October	-22.26		
	November	-25.55		
	December	-35.26		

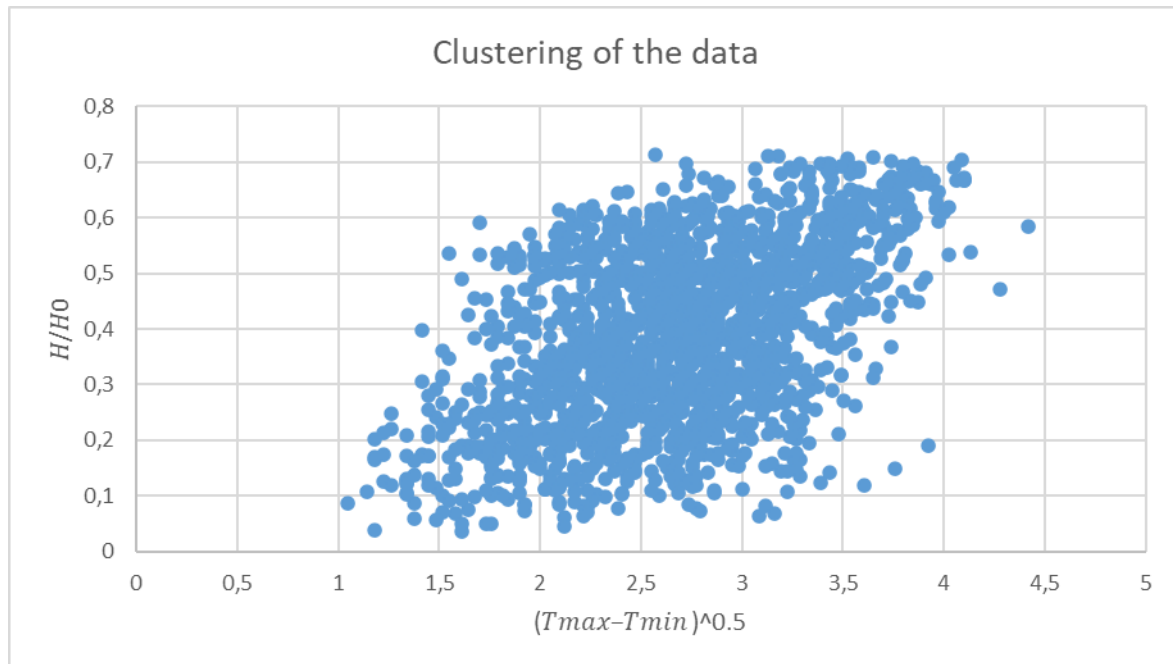


Figure 1. *Clustering of the data*

Seasonal differences in model performance may be attributed to atmospheric variability and changing weather patterns throughout the year. The relatively lower errors observed in February could be related to decreasing cloud cover and an increasing daily temperature range, which may allow temperature-based models to establish a clearer relationship between solar radiation and temperature difference. Similarly, the low error values in April and May might be associated with drier and more stable atmospheric conditions, reduced precipitation, and a higher solar angle. Despite the peak solar angle in June, increased humidity, sea fog, and cloud transitions may have contributed to a rise in model errors. Toward late summer and autumn (July–September), higher atmospheric variability and cloudiness may again have led to increased errors in model estimations.

Although the models did not exhibit very strong performance, they can be considered partially applicable under Dublin's climatic conditions. The MBE value being close to zero suggests that systematic errors are limited and that the models are able to represent the general trend reasonably well. The NSE value, while not excellent, does not appear poor either, indicating that the models can explain a portion of the observed variability in solar radiation. However, the RMSE value of approximately 3 MJ/m² may be considered relatively high in a low-radiation region such as Dublin, particularly during winter months, suggesting that the models' performance could be limited under low solar irradiance conditions.

4. Conclusions

1. In this study, five years of meteorological data (2020–2024) from Dublin Airport were used to calibrate and evaluate the Allen and Hargreaves solar radiation estimation models. Both models produced similar error statistics, mainly due to their linear structure and shared input variables.

2. The models were unable to fully represent local fluctuations caused by varying atmospheric conditions. Seasonal differences in model accuracy may be attributed to cloud cover variability, humidity, and solar angle changes throughout the year.



5th INTERNATIONAL CONGRESS ON MULTIDISCIPLINARY NATURAL SCIENCES

3. Statistical evaluation showed that the MBE value was close to zero, indicating limited systematic bias, while the NSE value (≈ 0.79) reflected a moderate predictive capability. The RMSE of about 3 MJ/m² may be considered relatively high for a low-radiation region like Dublin, especially during winter months.

4. Although the models did not demonstrate high predictive accuracy, they may still be considered partially applicable under Dublin's climatic conditions. Future studies evaluating models that incorporate parameters such as humidity, cloudiness, or sunshine duration may help determine whether more consistent results can be achieved.





5th INTERNATIONAL CONGRESS ON MULTIDISCIPLINARY NATURAL SCIENCES

References

- Chen, R., Ersi, K., Yang, J., Lu, S., Zhao, W., Validation of five global radiation models with measured daily data in China, *Energ Convers Manage*, 2004, 45(11):1759-1769.
- Menges, H. O., Ertekin, C., Sonmete, M.H., Evaluation of global solar radiation models for Konya, Turkey, *Energ Convers Manage*, 2006, 47(18):3149-3173.
- Armstrong, S., Hurley, W.G., A new methodology to optimise solar energy extraction under cloudy conditions. *Renew Energ*, 2010, 35(4):780-787.
- Allen, R. G. (1997). Self-calibrating method for estimating solar radiation from air temperature. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2(2), 56-67.
- Hargreaves, G. L., Hargreaves, G. H., & Riley, J. P. (1985). Irrigation water requirements for Senegal River basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 111(3), 265-275
- Campbell, G.S., Norman, J.M, *An introduction to environmental biophysics*, Springer Science & Business Media, 1998.
- Iqbal M., *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press, Toronto, 1983.
- Almorox, J., Estimating global solar radiation from common meteorological data in Aranjuez, Spain, *Turk J Phys.*, 2011, 35(1):53-64.

ICOMNAS



Makine İmalat Şirketinin Boyahane Bölümünde Metot Çalışmaları Kullanılarak Yapılan Bir Verimlilik Çalışması

Feyza Nur KESKİN¹
Muhammet Sefa GÖKTAŞ²

Abstract

This study comprehensively investigated the operational bottlenecks, waste issues, and ergonomic difficulties caused by the conventional manual wire-tying method used in industrial paint shops characterized by high product variety. Considering the material diversity in terms of length, weight, and volume, a standardized hanger design was deemed impractical in this field; therefore, a portable and variable hanging system was conceived. The study analyzed the effects of transitioning to a standardized new hanging system, which utilizes the existing assembly holes on the sheet metal parts and features S-shaped and triangular-bracket geometries made of Stainless Steel. The thickness and length of the S-hooks to be used in the hanging process were designed based on the calculated parameters necessary for the respective materials. To ensure long-term usability, it was decided that the hooks would be made of wires resistant to bending and corrosion. Detailed Method and Time Studies confirmed that the new system achieved a 72.2% time improvement, reducing the total operational time from 180 minutes to 50 minutes. Furthermore, the elimination of wire waste contributed to environmental sustainability, and the removal of manual workload significantly improved worker ergonomics. The improvement in preparation time, coupled with the overall reduction in the paint process's total cycle time, subsequently led to better feed rates for the assembly line. The time allocated for operator preparation was minimized, thereby eliminating time waste (*muda*). The findings demonstrate the potential for simple geometric optimization, when integrated with Lean Manufacturing principles, to radically increase paint shop efficiency.

Keywords: Paint Shop Hanging Systems, Time Study, Lean Manufacturing, Geometric Optimization, Stainless Steel, Zero Waste

¹ Feyza Nur KESKİN, Ar-Ge Mühendisi, Yenar Döküm A.Ş., feyzanur@yenar.com.tr, Orcid: 0009-0005-4295-3779

² Muhammet Sefa GÖKTAŞ, Ar-Ge Mühendisi, Yenar Döküm A.Ş., muhammetsefa@yenar.com.tr, Orcid:

GİRİŞ

Günümüz rekabetçi pazar koşullarında, üretim tesislerinin karlılık ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında Yalın Üretim prensipleri kritik bir rol oynamaktadır. Bu felsefenin temelini, ürüne değer katmayan her türlü israfın (Muda) ortadan kaldırılması oluşturur (Womack & Jones, 2003, 27-35). Özellikle çevrim sürelerinin yüksek olduğu boyahane gibi kritik hatlarda, değişim (set-up) sürelerinin azaltılması hayati öneme sahiptir ve bu, Tekil Dakikada Kalıp Değişimi (SMED) metotlarıyla sağlanır (Shingo, 1985,15-25). Süreç iyileştirme çalışmalarının başarısı, mevcut durumun nesnel bir şekilde analiz edilmesini gerektirir. Bu analiz, iş adımlarının etkinliğini ve standardizasyonunu inceleyen Metot Etüdü ve harcanan süreyi nicel olarak ölçen Zaman Etüdü teknikleri aracılığıyla gerçekleştirilir.

Boyahane Süreçlerindeki Darboğazlar ve Çalışmanın Amacı

Endüstriyel boyahaneler, karmaşık operasyonel gereklilikleri nedeniyle sıklıkla darboğazların kaynağı olmaktadır. Özellikle yüksek ürün çeşitliliğine sahip tesislerde, sac parçaların boya hattına asılması için kullanılan geleneksel manuel tel bağlama yöntemi; işçilik yoğunluğunun artması, uzun hazırlık ve değişim süreleri, tel atığı ve tekrarlayan zorlayıcı hareketler nedeniyle yüksek ergonomik riskler (McAtamney & Corlett, 1993,91-93) yaratmaktadır. Bu durum, toplam çevrim süresini uzatarak montaj hattını beslemede aksamalara yol açmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, yüksek çeşitliliğe sahip sac parçalar için, üzerlerindeki montaj deliklerini kullanan, Paslanmaz Çelikten imal edilmiş, standartlaştırılmış geometrik askılar tasarlayarak ve uygulayarak; operasyonel verimlilikte nicel iyileşme sağlamak, tel atığını sıfırlamak ve çalışan ergonomisini maksimize etmektir. Çalışma, Yalın Üretim prensipleri çerçevesinde basit bir geometrik optimizasyonun, üretim hattında nasıl radikal bir değişim yarattığını göstermeyi hedeflemektedir.

Boyahane Süreçlerinde Yalın Üretim ve Verimlilik

Literatürde boyahane verimliliği, özellikle **SMED** ve **Muda** eliminasyonu çerçevesinde incelenmektedir. Yeni geometrik askı tasarımı, bu iç set-up süresini minimize ederek Yalın Üretim felsefesiyle tam uyum sağlamıştır. Hazırlık süresindeki atık malzemeler ve harcanan iş gücü minimize edilerek süreç iyileştirmesi uygulanmıştır.

Ergonomi ve İnsan Faktörleri Mühendisliği

Boyahane süreçlerindeki manuel ve tekrarlayan işler, operatörlerde kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları (MSDs) açısından risk taşır. (McAtamney & Corlett, 1993) tarafından tanımlanan **RULA/REBA** gibi ergonomik risk değerlendirme metotları, geleneksel tel bağlama metodunun yüksek risk skoruna sahip olduğunu göstermektedir. Yeni "**geçir-tak**" operasyonu, insan-askı arayüzünü iyileştirerek manuel iş yükünü azaltmış ve ergonomik kazanım sağlamıştır.

Sürdürülebilirlik ve Askı Ömrü

Askılamada kullanılacak olan s ve kanca askılar uzun süre kullanılmak üzere seçilmiştir. Korozyon direnci yüksek ve gerekli mukavemeti sağlayacak paslanmaz çelik tercih edilmiştir. Seçilen Paslanmaz Çelik (AISI 304/316) kalitelerinin boyahane kimyasallarına ve yüksek

sıcaklıklara karşı gösterdiği üstün korozyon direnci, askı ömrünü uzatır ve kaynak tüketimini azaltır (Davis, 2019,150-175).

YÖNTEM

Geleneksel Durum Analizi ve Problemin Kapsamı

Geleneksel tel bağlama yöntemi, operatörlerin her parçayı ayrı ayrı tel ile sabitlemesini gerektiriyordu. Bu süreç; tel kesme, parçaya uygun noktayı bulma, teli sıkıca bağlama ve boya işlemi sonrası teli kesip atma aşamalarından oluşuyordu. Bu durum, özellikle parça geometrilerinin yüksek çeşitliliği ve sık değişen üretim partileri nedeniyle operasyonel karmaşayı ve yorgunluğu artırıyordu.

Eski Yöntemin Kullanım Şekli

Eski yöntemde boyanacak saclar planlama birimi tarafından belirlenir ve takımlanmış paletler boyahanenin önüne getirilirdi. Saclar uzunluk, genişlik ve hacimlerine göre eşit şekilde dağıtılarak asılırdı. Teller kalın ve ince olmak üzere iki çeşitti. Operatör tel seçimini yaptıktan sonra belirli uzunluklarda kesip sac malzemelerin deliklerine geçirir ve eliyle sıkıştırırdı. Ardından alt alta gelmesini istediği parçaları bağlayıp tüm düzeneği boyanacak sac malzemelerle doldururdu.



Şekil 1: Boyahane Bölümü Eski Yöntem düzenek

Yeni Askı Sistemi Geliştirilmesi ve Malzeme Seçimi

Yeni askı sisteminin geliştirilmesinde temel odak noktası, sacların üzerindeki mevcut montaj deliklerinin doğrudan kullanılmasıdır.

Tasarım ve Malzeme Seçimi: Sacların çeşitliliğine uyum sağlamak için iki ana geometride askı geliştirilmiştir: S-şekilli Askılar (hızlı geçmeli bağlantı) ve Üçgen Uçlu Parantez Askılar (rijit, güvenli tutuş). Tasarım, minimum temas yüzeyi ile topraklama sürekliliğini koruyarak boya birikimini en aza indirmeyi hedeflemiştir.

Askılar, boyahane ortamının kimyasal agresifliği, yüksek sıcaklık dayanımı ve temizlik döngülerinin yıpratıcı etkisi göz önüne alınarak Paslanmaz Çelik (AISI [304/316] Kalite) kullanılarak imal edilmiştir. Bu seçim, korozyon direncini ve uzun ömrü garanti altına almıştır.

Teknik Resim (CAD) Süreci

Askı geometrilerinin detaylı tasarımı, Solidworks kullanılarak yapılmıştır. Tüm askılar için gerekli geometrik toleransları ve malzeme spesifikasyonlarını içeren Teknik Resimler (CAD Çizimleri) hazırlanmıştır. Hazırlanan teknik resimler, seri üretim için üreticilere gönderilerek kalite kontrol süreçleri ile tedarik edilmiştir.



Şekil 2: Kanca Askı Tasarımı



Şekil 3: S Askı Tasarımı

Metot Etüdü ve Performans Ölçümü

Yeni askı sisteminin performansı, eski yöntemle karşılaştırılarak, Zaman Etüdü ile ölçülmüştür. Ölçümler, 10 adet sac parça partisinin askılanması ve askıdan alınması operasyonlarını kapsamıştır.

Zaman Etüdü Karşılaştırması ve Operasyonel Verimlilik

Yapılan zaman etüdü sonuçları (Tablo 1), yeni askı sistemine geçişin **operasyonel sürede %76,6'lık dramatik bir iyileşme** sağladığını göstermektedir.

Tablo 1- Boyahane Askılama Operasyonu için Zaman Etüdü

Süreç Aşaması	Eski Metot (Tel Bağlama) (Sn.)	Yeni Metot (Geometrik Askı) (Sn.)	Süre Farkı (Sn.)	İyileşme Oranı (%)
Askılama Ön Hazırlık (Tel Kesme/Askı Hazırlama)	44	32	12	27%
Parçanın Bağlanması/Takılması (Operasyonel)	345	76	269	77%
Parçanın Çözülmesi/Askıdan Alınması (Operasyonel)	366	68	298	81%
Toplam Operasyon Süresi	755	176	579	76%

SONUÇ

Bu çalışma, Paslanmaz Çelikten imal edilen yeni geometrik askı sistemlerinin, geleneksel tel bağlama yöntemine göre operasyonel sürede %76,6 oranında verimlilik artışı

sağladığını kanıtlamıştır. Hazırlık süresinin büyük oranda iyileştirilmesinin yanı sıra, operatörlerin ergonomik açıdan daha iyi koşullarda çalışması sağlanmıştır. Hazırlık süresinin kısılmasıyla birlikte azalan çevrim süresi sayesinde boyahanedeki karşılaşılan darboğaz sorunu da aynı oranda azalmıştır. Bu çalışmada boyahanedeki sacların çeşitliliği ayırılırken aynı zamanda paletlerde takımlama yapmış olup saha düzenlemesine de katkı sağlanmıştır.

Ergonomik ve Çevresel Katkılar

Tel atığının sıfırlanması, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir adımdır. Tel atığının sıfırlanması, maliyet tasarrufu sağlamanın yanı sıra, Döngüsel Ekonomi hedeflerini desteklemektedir. Ayrıca, tekrarlayan ve zorlayıcı manuel tel işlemlerinin eliminasyonu, çalışan yorgunluğunu ve MSDs risklerini azaltarak daha ergonomik bir çalışma ortamı sağlamıştır (Karwowski, 2012).

Öneriler

- Yeni askı geometrilerinin topraklama direnci ve boya birikimi üzerindeki etkilerinin boya kalınlığı ölçümleriyle nicel olarak analiz edilmesi.
- Paslanmaz çelik askıların, farklı temizleme metotları (kimyasal sıyırma vs. piroliz) altında uzun vadeli ömür döngüsü testlerinin yapılması.

ICOMNAS



5th INTERNATIONAL CONGRESS ON MULTIDISCIPLINARY NATURAL SCIENCES

KAYNAKÇA

1. **Davis (2019)** Davis, J. R. (2019). *Corrosion: Understanding the basics*. ASM International.
2. **Ellen MacArthur Foundation (2017)** Ellen MacArthur Foundation. (2017). *Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition*. Ellen MacArthur Foundation.
3. **Karwowski (2012)** Karwowski, W. (2012). *The discipline of human factors and ergonomics*. CRC Press.
4. **McAtamney & Corlett (1993)** McAtamney, L., & Corlett, E. N. (1993). RULA: A survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics*, 24(2), 91–99. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(93\)90080-S](https://doi.org/10.1016/0003-6870(93)90080-S)
5. **Shingo (1985)** Shingo, S. (1985). *A revolution in manufacturing: The SMED system*. Productivity Press.
6. **Tingstad & Bergstrom (2015)** Tingstad, D., & Bergstrom, J. (2015). Improving changeover performance using SMED: A case study. *International Journal of Industrial Engineering and Management*, 6(3), 121–130.
7. **Womack & Jones (2003)** Womack, J. P., & Jones, D. T. (2003). *Lean thinking: Banish waste and create wealth in your corporation* (Rev. ed.). Free Press.

ICOMNAS

Multi-Domain Feature Extraction and Band-Specific Analysis for EEG-Based Epilepsy Classification: A Comparative Machine Learning Approach

Hamed KAGHAZCHI¹

Abstract

Electroencephalography (EEG) is a mainstay of epilepsy diagnosis; however, EEG signals are non-linear and non-stationary and present a challenge to seizure classification with reliability. The focus of this study is to improve automated epilepsy diagnosis by carrying out a comparative study of multi-domain feature extraction and band-specific analysis on the University of Bonn EEG dataset. EEG signals were preprocessed by applying a 50 Hz notch filter and breaking down into intrinsic frequency bands (Delta, Theta, Alpha, Beta, Gamma) with a 4th-order Butterworth filter applied to each. Features such as mean, variance, skewness, kurtosis, and Shannon entropy were computed on three domains: time domain, frequency domain (with discrete Fourier transform), and time–frequency domain (with discrete wavelet transform of Daubechies-6 order). Four supervised classifiers (k-Nearest Neighbor (KNN), Support Vector Machine (SVM), Decision Tree (DT), Linear Discriminant Analysis (LDA)) were trained and tested on a 5-fold cross-validation strategy. Results proved that Decision Tree and RBF-SVM resulted in the best accuracy (above 0.97) and sensitivity (above 0.96) for all domains, with LDA exhibiting relatively constant performance (~0.94–0.95 sensitivity) and KNN with inferior domain-based performance (best accuracy being 0.87 with sensitivity 0.74 for the time domain). The values of specificity were kept near perfect, with DT and LDA performing 100% in all domains. It was overall seen that time–frequency domain features provided balanced characterization of data, with the best classifiers being those with a non-linear decision boundary (SVM, DT) to handle complex dynamics of EEG signals. The findings highlight the clinical promise of automated domain-based machine learning to arrive at robust as well as accurate epilepsy classification.

Keywords: Electroencephalography (EEG), Epilepsy Detection and Classification, Feature Extraction, Machine Learning, Time–Frequency Domain Analysis

¹ Assist. Prof. Dr., Ankara Science University, Electrical Electronics Engineering, Orcid: 0000-0003-3085-1669

Introduction

Electroencephalography (EEG) is widely accepted as an essential tool for diagnosis and epilepsy monitoring, a form of neurological disorder that manifests sudden and unpredictable seizures. EEG signals provide a non-invasive method for measuring brain electrical activity, enabling clinicians and researchers to detect aberrant neural patterns associated with seizure onset. Nevertheless, due to the highly nonlinear, non-stationary, and multidimensional EEG data involved, there are considerable challenges to obtaining reliable classification success. Consequently, powerful feature extraction approaches capable of retaining the temporal, spectral, and time-frequency properties of EEG signals are needed to improve the accuracy of computer-assisted epilepsy diagnosis(Wang et al., 2017).

Robust classification and detection of epileptic seizures hold essential clinical value because timely and trustworthy diagnosis significantly enhances therapy plans and patients' quality of life. Current practices usually associate diagnosis with manual EEG interpretation by neurologists, which is subject to subjectivity and is tedious, particularly with longer records. Automated machine learning (ML) solutions present an excellent alternative with scalable, objective, and repeatable analysis. Notably, signal decomposition into frequency bands like Delta, Theta, Alpha, Beta, and Gamma reveals different neurophysiological processes, and feature descriptors like mean, variance, skewness, kurtosis, and entropy allow quantitative signal characterization(Tsipouras, 2019). If band-specific analysis is combined with classifiers like k-Nearest Neighbor (KNN), Support Vector Machine (SVM), Decision Tree, and Linear Discriminant Analysis (LDA), differentiating performance among various algorithms across several domains of representation can be rigorously ascertained(Guharoy et al., 2022).

Various contributions in the literature have investigated various combinations of machine learning models and feature extraction domains for computerized seizure detection. Some of these include, for instance, time–frequency methods like wavelet-based decomposition and nonlinear descriptors in conjunction with classifiers from support vector machines and k-nearest neighbors up to adaptive resonance theory models(Sharma et al., 2017),(Shah et al., 2024). These contributions, in aggregate, clarify that both strategies for feature extraction and selection of classifiers have a marked impact on performance, with some contributions enjoying near-perfect accuracy while others provide a trade-off between accuracy, interpretability, and computational tractability. Extending this, this contribution establishes a comparison between various domains for feature extraction and machine learning classifiers in order to supply a systematic comparison of relative efficacy for epilepsy classification based on EEG.

Method

This work followed a quantitative, experimental design to examine the time-domain, frequency-domain, and time-frequency-domain feature extraction methods for EEG-based classification of epilepsy. The experimental design involved supervised machine learning with extracted EEG signal features as inputs to classifiers, and performance was determined by statistical validation.

This study used the publicly available University of Bonn EEG dataset(Andrzejak et al., 2001). The dataset includes five subsets (Z, O, N, F, S), each with 100 EEG segments of 23.6 seconds and a sampling rate of 173.61 Hz. The study focused on signals from set S (epileptic patients during ictal episodes) and set Z (healthy subjects under normal conditions), representing two categories: normal and ictal. Each segment contains 4,096 samples, totaling 100 segments (Figure 1).

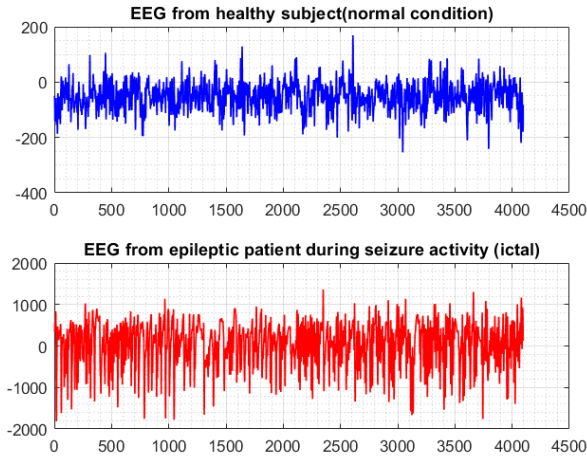


Figure 1. Representative EEG Signals from Healthy Subjects and Epileptic Patients During Seizure Activity.

Preprocessing of EEG data was performed to eliminate noise and improve signal quality before feature extraction. The first step included applying a notch filter to eliminate 50 Hz power line interference(Leske & Dalal, 2019). The transfer function of the notch filter is given by

$$H(z) = \frac{1 - 2\cos(2\pi f_0 / f_s)z^{-1} + z^{-2}}{1 - 2r\cos(2\pi f_0 / f_s)z^{-1} + r^2z^{-2}} \quad (1)$$

where $f_0 = 50$ Hz is the target frequency, f_s is the sampling frequency, and r controls the bandwidth of attenuation. The signals were next broken down into five canonical EEG rhythms with a 4th-order Butterworth band-pass filter(Torabi & Daliri, 2021), which are Delta (0–4 Hz), Theta (4–8 Hz), Alpha (8–12 Hz), Beta (12–30 Hz), and Gamma (30–60 Hz) (Figure 2). The Butterworth filter magnitude response is given by

$$|H(w)|^2 = \frac{1}{1 + (\frac{w}{w_c})^{2n}} \quad (2)$$

where ω_c is the cutoff frequency and n is the filter order.

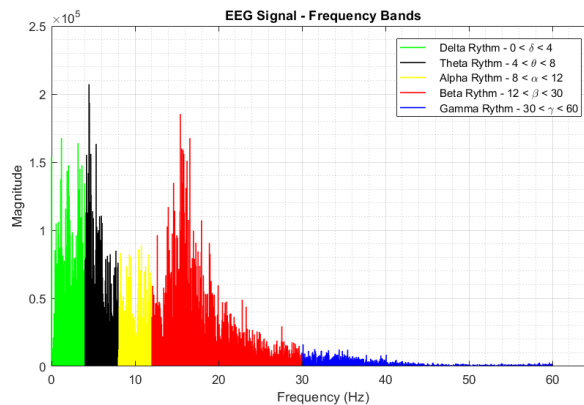


Figure 2. Frequency-domain representation of an EEG signal illustrating canonical brain rhythms.

Feature extraction was performed in three different domains. In the time domain, statistical measures including mean, variance, skewness, kurtosis, and Shannon entropy were computed from each frequency band (T & M, 2021). For a discrete EEG sequence x_i of length N , the mean was computed as

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3)$$

the variance as

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2 \quad (4)$$

the skewness as

$$\text{Skew} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^3}{\sigma^3} \quad (5)$$

and the kurtosis as

$$\text{Kurt} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^4}{\sigma^4} \quad (6)$$

Finally, Shannon entropy, which quantifies signal uncertainty, was defined as

$$H = -\sum_{i=1}^M p_i \log(p_i) \quad (7)$$

where p_i denotes the probability distribution of amplitude values.

Features were extracted from the Fourier spectrum for the frequency domain (Singh & Krishnan, 2023). The Discrete Fourier Transform (DFT) was applied to every segment:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi kn/N}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (8)$$

with only the first half of the coefficients retained due to symmetry. The magnitude spectrum was obtained as

$$|X(k)| = \sqrt{\Re(X(k))^2 + \Im(X(k))^2} \quad (9)$$

and then partitioned into the same five EEG bands. From each band, the same statistical features (mean, variance, skewness, kurtosis, entropy) were extracted as in the time-domain analysis.

For the time–frequency domain, a wavelet-based solution was utilized to preserve transient signal properties (Guharoy et al., 2022). As wavelet decomposition is only possible with dyadic sampling rates, EEG signals were resampled from 173.61 to 120 Hz. The four-level Daubechies-6 (db6) discrete wavelet transform (DWT) was applied next, which breaks down the signals into detail and approximation coefficients. The DWT representation is defined as

$$x(t) = \sum_{j,k} a_{j,k} \phi_{j,k}(t) + \sum_{j=1}^J \sum_k d_{j,k} \varphi_{j,k}(t) \quad (10)$$

Here, $d_{j,k}$ and $a_{j,k}$ are detail and approximation coefficients, respectively, with scaling and wavelet functions denoted as $\phi_{j,k}(t)$ and $\psi_{j,k}(t)$. Continuing with four levels of decomposition, the following resulting sub-bands were identified per level: 0–4 Hz (A4), 4–8 Hz (D4), 8–15 Hz (D3), 15–30 Hz (D2), and 30–60 Hz (D1). Extracting the same statistical features from all those resulting sub-bands followed.

Classification was carried out with four supervised learning methods: K-Nearest Neighbors (KNN), Support Vector Machine (SVM) with a non-linear kernel, Decision Tree (DT), and Linear Discriminant Analysis (LDA)(Ramírez-Arias et al., 2022). KNN classification was based on Euclidean distance.

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (11)$$

while SVM constructed an optimal separating hyperplane with the decision function

$$f(x) = \text{sign} \left(\sum_{i=1}^N \alpha_i y_i K(x, x_i) + b \right) \quad (12)$$

where $K(x, x_i)$ is the kernel function. Decision Trees were derived by recursive partitioning on entropy or Gini index, whereas LDA optimized between-class variance with respect to within-class variance. For robustness, all classifiers were tested by 5-fold cross-validation, with the data divided into five folds such that each fold became once a test set and four times a training set.

Model performance was assessed through the confusion matrix, and three metrics were derived (Slimen et al., 2020): accuracy,

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (13)$$

sensitivity (recall),

$$\text{Sensitivity} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (14)$$

and specificity,

$$\text{Specificity} = \frac{TN}{TN + FP} \quad (15)$$

where TP, TN, FP, and FN represent true positives, true negatives, false positives, and false negatives, respectively.

Results

Comparative analysis of classifiers within the time, frequency, and time–frequency domains over time identified several key trends. Accuracy outcomes indicate, as shown in Figure 3, that all classifiers registered generally high performance with Decision Tree and RBF-SVM models reaching near-perfect values of accuracy (≥ 0.97 for all domains). KNN registered relatively weaker performance, with notably weaker performance within the time domain (0.87), which translates to higher sensitivity of this classifier to feature domain choice. LDA registered domain-invariant accuracy values, which imply insensitivity to feature representation variations.

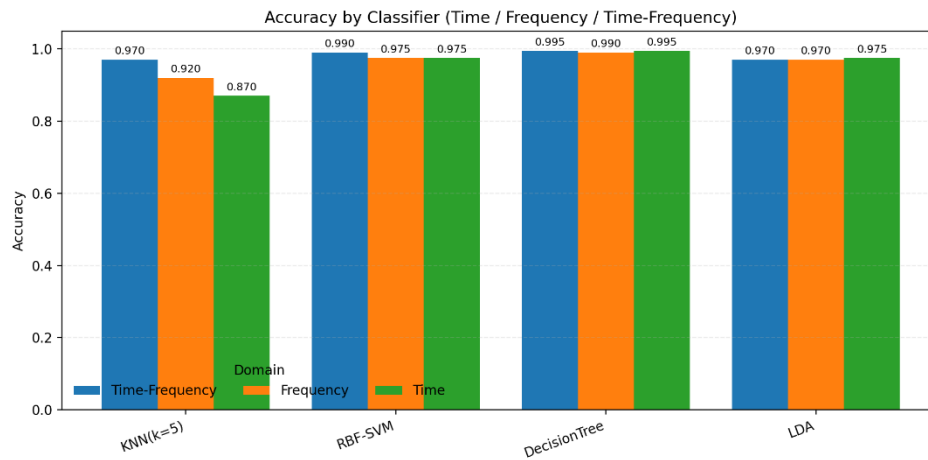


Figure 3. Comparison of Classification Accuracy Across Time, Frequency, and Time–Frequency Domains.

Sensitivity analysis shown in Figure 4 once more supports the superior performance of the Decision Tree and RBF-SVM classifiers that maintained sensitivity rates higher than 0.96 for all the domains. KNN, however, exhibited high variability with sensitivity dropping to 0.74 for the time domain. This means KNN exhibits a higher false-negative rate if only temporal features are considered, and points to its low ability to detect seizure events with this kind of representation. LDA maintained relatively balanced sensitivity for all domains (~0.94–0.95), which shows consistent detection performance, though not as superior as observed for Decision Tree and RBF-SVM. The result suggests that detectors with higher non-linear decision boundaries (e.g., SVM and Decision Tree) might be superior for EEG-based seizure detection due to non-stationarity and intricacy of signal data.

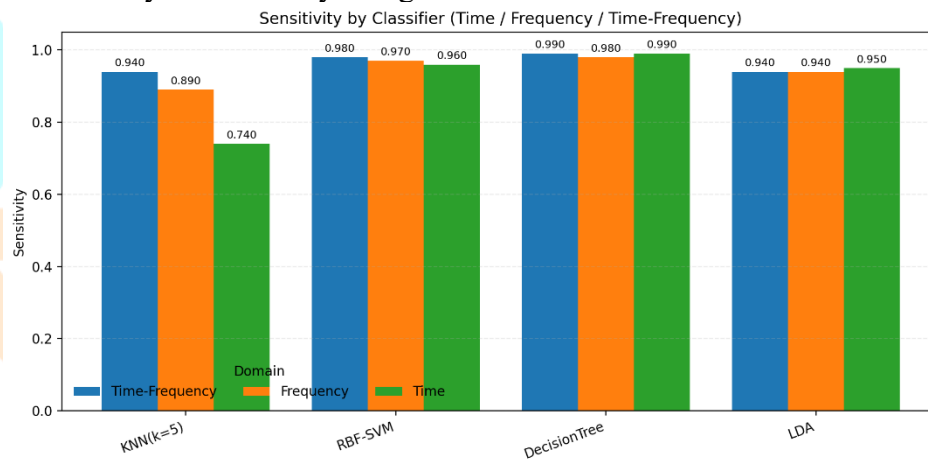


Figure 4. Comparison of Classification Sensitivity Across Time, Frequency, and Time–Frequency Domains.

Specificity values validate high discriminative powers for all classifiers, with perfect or near-perfect performance for most domains. The Decision Tree and LDA obtained 100% specificity for all feature domains, meaning there is no misclassification of non-seizure events. KNN repeated its domain dependence with a lower specificity of 0.95 within the frequency domain, whereas RBF-SVM lowered only to 0.98 within the corresponding domain. These findings indicate that whereas sensitivity can significantly vary with domain and classifier type,

specificity remains high throughout with all model variants (see Figure 5), as if the models are more put to the test by recognizing seizure events rather than rejecting non-seizure ones.

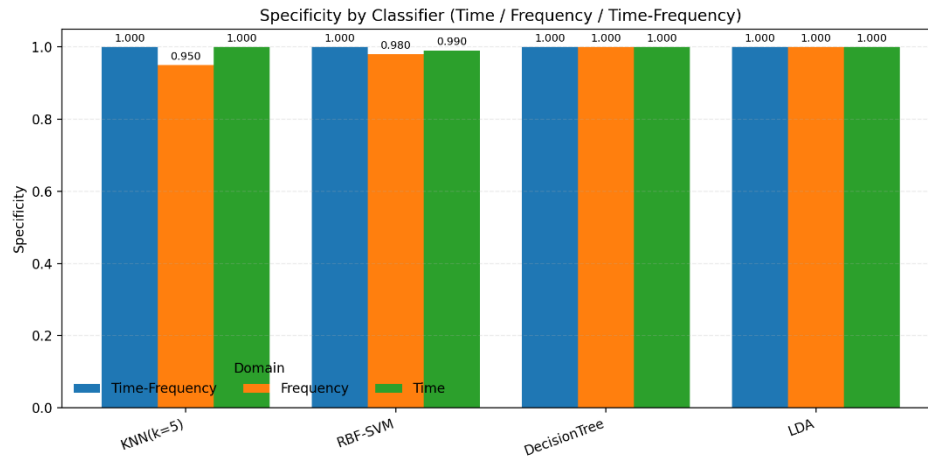


Figure 5. Comparison of Classification Specificity Across Time, Frequency, and Time–Frequency Domains.

Conclusion

This study established multi-domain feature extraction with band-oriented analysis as a robust foundation for epilepsy classification from EEG-based data. Systematic comparison of time, frequency, and time–frequency representations demonstrated that wavelet-based time–frequency features provide the optimal balanced performance among classifiers. Support Vector Machine and Decision Tree provided the best accuracy and sensitivity, which underlines the necessity of non-linear decision boundaries to accommodate EEG data with complex and non-stationary dynamics. Conversely, KNN offered domain-dependent variability due to its feature representation sensitivity, whereas LDA provided stable though moderately inferior performance. Notably, high specificity was observed in all models, indicating a high reliability in rejecting non-seizure events. These findings suggest that time–frequency analysis combined with high-end classifiers holds promise to significantly improve automated seizure detection reliability to deliver worthwhile clinical aid to enable diagnosis at an early onset, as well as optimal epilepsy management. Future directions include expanding the framework to larger patient-independent datasets, resolving class imbalance issues, and exploring deep learning-based solutions to enable solutions that are clinically deployable and provide seizure detection in real-time mode.

References

- Andrzejak, R. G., Lehnertz, K., Mormann, F., Rieke, C., David, P., & Elger, C. E. (2001). Indications of nonlinear deterministic and finite-dimensional structures in time series of brain electrical activity: Dependence on recording region and brain state. *Phys. Rev. E*, 64(6), 61907. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.64.061907>
- Guharoy, R., Jana, N. D., & Biswas, S. (2022). An Efficient Epileptic Seizure Detection Technique using Discrete Wavelet Transform and Machine Learning Classifiers. *Journal of Physics: Conference Series*, 2286(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2286/1/012013>
- Leske, S., & Dalal, S. S. (2019). Reducing power line noise in EEG and MEG data via spectrum interpolation. *NeuroImage*, 189(January), 763–776. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.01.026>
- Ramírez-Arias, F. J., García-Guerrero, E. E., Tlelo-Cuautle, E., Colores-Vargas, J. M., García-Canseco, E., López-Bonilla, O. R., Galindo-Aldana, G. M., & Inzunza-González, E. (2022). Evaluation of Machine Learning Algorithms for Classification of EEG Signals. *Technologies*, 10(4), 1–22. <https://doi.org/10.3390/technologies10040079>
- Shah, S. Y., Larijani, H., Gibson, R. M., & Liarokapis, D. (2024). Epileptic Seizure Classification Based on Random Neural Networks Using Discrete Wavelet Transform for Electroencephalogram Signal Decomposition. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/app14020599>
- Sharma, M., Pachori, R. B., & Rajendra Acharya, U. (2017). A new approach to characterize epileptic seizures using analytic time-frequency flexible wavelet transform and fractal dimension. *Pattern Recognition Letters*, 94, 172–179. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2017.03.023>
- Singh, A. K., & Krishnan, S. (2023). Trends in EEG signal feature extraction applications. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 5. <https://doi.org/10.3389/frai.2022.1072801>
- Slimen, I. Ben, Boubchir, L., Mbarki, Z., & Seddik, H. (2020). EEG epileptic seizure detection and classification based on dual-tree complex wavelet transform and machine learning algorithms. *Journal of Biomedical Research*, 34(3), 151–161. <https://doi.org/10.7555/JBR.34.20190026>
- T, S. C., & M, D. T. (2021). Classification of EEG Signals using Nonlinear Features and Preprocessing Techniques. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 10(5), 297–301. <https://doi.org/10.35940/ijeat.e2789.0610521>
- Torabi, A., & Daliri, M. R. (2021). Applying nonlinear measures to the brain rhythms : an effective method for epilepsy diagnosis. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 6, 1–9. <https://doi.org/10.1186/s12911-021-01631-6>
- Tsipouras, M. G. (2019). Spectral information of EEG signals with respect to epilepsy classification. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, 2019(1). <https://doi.org/10.1186/s13634-019-0606-8>
- Wang, L., Xue, W., Li, Y., Luo, M., Huang, J., Cui, W., & Huang, C. (2017). Automatic epileptic seizure detection in EEG signals using multi-domain feature extraction and nonlinear analysis. *Entropy*, 19(6), 1–17. <https://doi.org/10.3390/e19060222>

Müşteri Etkileşimlerinin Özetlenmesi ve Otomatik Kalite Değerlendirmesi: Pronet Çağrı Merkezi Durum Çalışması

İbrahim ŞAHAN¹

Subaşı ŞAHİN²

Osman Melih TOLUNAY³

Salih ŞEKER⁴

Abstract

This study presents a scalable architecture for the automatic summarization and quality evaluation of high-volume telephone calls, aiming to increase customer satisfaction and standardize the performance assessment of call center agents. The proposed AI-supported architecture seeks to prevent biased evaluations that may arise because traditional call quality monitoring processes and performance metrics such as call duration do not fully reflect customer satisfaction. The developed architecture is based on a Speech-to-Text layer that uses a DeepSeek model retrained for the Turkish language through transfer learning. The system is designed with an asynchronous queue structure to process more than 20,000 calls per day in parallel. Text transcriptions are evaluated for quality through department-based scoring algorithms, keyword and intent analyses via microservices. Analysis results are stored in databases to ensure fast query performance. The presented architecture enables continuous fine-tuning of the DeepSeek model with low-performance words and sentences and allows tracking of results, with the aim of continuously monitoring and optimizing call quality. In the quality evaluation phase, sample calls selected by team leaders are re-examined according to Pronet's tactical guidelines. At this stage, the system evaluates not only model accuracy but also the quality of customer interaction. In conclusion, this study offers an operationally viable, highly scalable AI architecture that addresses language-specific challenges and provides a holistic approach for summarizing customer interactions and performing automatic quality evaluation.

Keywords: Agent Performance Evaluation, Call Summarization, Call Evaluation, Call Center, Automatic Speech Recognition, Large Language Models

¹ Arş. Gör., Kocaeli Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği, Orcid: 0000-0001-6968-1770

² Prof. Dr., Kocaeli Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği, Orcid: 0000-0003-1340-8972

³ Mühendis, Pronet Güvenlik A.Ş., ARGE Departmanı, Orcid: 0009-0006-9869-8612

⁴ Mühendis, Pronet Güvenlik A.Ş., ARGE Departmanı, Orcid: 0009-0003-6072-9987

GİRİŞ

Müşteri ilişkilerinin öneminin giderek arttığı bu günlerde, iletişim teknolojilerinin gelişmesi ile birlikte şirketler müşterileriyle hem çevrimiçi kanallar üzerinden hem de telefon görüşmeleri ile sürekli iletişim kurmaktadır. Hizmet kalitesinin artırılması ve müşteri memnuniyetinin sürekliliğinin sağlanması, hizmet sağlayan tüm kurumların temel stratejik hedefleri arasında yer almaktadır (Karataş vd., 2023; Santiago-Rufasto vd., 2025). Teknolojik gelişmeler, iletişim kanallarının çoğalması ve hizmet talebindeki yüksek artışlar, işlenmesi için devasa boyutlarda veri havuzları oluşturmaktadır. Bununla birlikte verilerin işlenme hızı ve çözümlerin uygunluğu müşteri memnuniyetini doğrudan etkilemektedir. Bu doğrultuda, çağrı merkezlerinde gerçekleştirilen yüksek hacimli telefon görüşmelerinin hızlı, ölçeklenebilir ve güvenilir yöntemlerle analiz edilmesi kritik bir gereklilik hâline gelmiştir.

Birçok çağrı merkezi, çağrı süresi ve ortalama cevaplama süresinin, müşteri memnuniyetinde nesnel ölçütlerin olduğu konusunda yanılgıya kapılmaktadır (Ahmed vd., 2024; Marr ve Neely, 2004). Bu tür verimlilik kriterlerinden çoğunun aslında bireysel değerlendirme ile ilişkili olduğu ve taraflı değerlendirmeye sebep olabileceği görülmektedir (Ahmed vd., 2024). Yapılan uygulamaların çoğu bu sebeple müşteri memnuniyetini yansıtamamakta ve çağrı kalitesi analizlerinde çeşitli tutarsızlıklara yol açmaktadır. Son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmeler sonucunda; otomatik konuşma tanıma, duygu tanıma ve çağrı değerlendirmede yapay zeka kullanılarak bahsedilen problemlere çözüm aranmaktadır.

Iheme ve Ozan (2022) çağrı merkezi temsilcisi suistimalinin tespiti için yeni bir yarı-denetimli çerçeve önermiştir. Sistem, çağrı süresindeki sessizlik yüzdesi gibi önemli performans göstergelerini dikkate alarak kalite kontrol yöneticilerinin performansını artırmayı hedeflemektedir. Konuşma yüzdesi, müzik, sessizlik ve gürültü gibi dört özellik, kaydedilen her çağrıdan otomatik enerji eşikleme algoritması ve Mel Frekans Cepstral Katsayısı (MFCC), öznitelik çıkarımı kullanılarak elde edilmiştir. Ahmed vd. (2024) geleneksel çağrı kalitesi izleme süreçlerindeki subjektifliği azaltmak amacıyla, dikkat mekanizmalı derin sinir ağı modelleri kullanılarak subjektif çağrıları otomatik olarak tespit eden bir çerçeve geliştirilmiştir. Bu çerçeve, CNN, LSTM ve dikkat katmanlarını art arda kullanarak subjektiflik sınıflandırmasında en iyi doğruluğu elde etmeyi amaçlamıştır. Literatürde, metinden duygu sınıflandırması için BLSTM ağının BERT (Devlin vd., 2018) modeliyle birlikte kullanıldığı çözümler ve sesli kanalda CNN, kNN, LDA, SVM gibi sınıflandırıcıların kullanıldığı çözümler de mevcuttur (Płaza vd., 2022). İş bağlamında, belirli varlıklara (ürünler veya şirketler gibi) yönelik kullanıcı duygularını anlamak için varlık seviyesinde duygu analizi çalışmaları da yapılmıştır. Bu yaklaşım için DistilBERT (Sanh vd., 2020) tabanlı modellerin yanı sıra, sezgisel kurallarla desteklenmiş CNN tabanlı modeller de kullanılmıştır (Fu vd., 2022).

Son yıllarda Otomatik Konuşma Tanıma sistemleri, özellikle derin sinir ağları kullanılarak büyük ilerleme kaydetmiştir (Ahlawat vd., 2025). Ses işleme araştırmalarında önemli bir yere sahip olan MFCC, yüksek başarı oranı sunan bir öznitelik çıkarma tekniğidir ve makine öğrenmesi, derin öğrenme algoritmalarında öznitelik olarak kullanılarak dijital ses işleme alanında birçok çalışma gerçekleştirilmesine olanak tanımıştır (Karataş vd., 2023). Evrişimli Tekrarlayan Sinir Ağları mimarisi çağrı merkezi kayıtlarında müşteri/temsilci segmentasyonu, cinsiyet tespiti gibi görevler için uyarlanmıştır ve bu tür mimariler eğitim verisi Türkçe olsa bile, Almanca ve İngilizce gibi diğer dillerdeki çağrı merkezi kayıtlarında bile yüksek doğruluk elde etme yeteneği göstermektedir (Ozan, 2021). LSTM ağları, zamansal bağımlılıkları yakalamak ve tekrarlayan sinir ağlarının yaşadığı gradyan kaybolma problemini

aşmak için kullanılırken transformer mimarisi ve dikkat mekanizmaları ses özelliklerinin konuşma bölümleriyle hizalanmasını ve değişken uzunluktaki dizileri ele almayı mümkün kılmıştır (Ahmed vd., 2024).

Türkiye, çağrı merkezi hizmetleri ve hizmet kalitesi araştırmaları açısından önemli bir yayın dağılımına sahip ülkelerden biridir (Santiago-Rufasto vd., 2025). Türkçe, morfolojik olarak zengin ve zamir düşürme eğilimine sahip bir dil olması nedeniyle doğal dil işleme görevlerinde zorluklar teşkil eder (Pamay Arslan ve Eryiğit, 2025). Bu çalışmada, yüksek hacimli Türkçe çağrı verilerini işleyebilen ve yapay zekâ destekli kalite değerlendirmesi yapabilen ölçeklenebilir bir sistem mimarisi önerilmektedir. Sistem, otomatik konuşma tanıma süreçleriyle elde edilen metin verisi üzerinden niyet sınıflandırması ve duygu analizi gerçekleştirerek müşteri memnuniyetini olumsuz etkileyen durumları otomatik olarak tespit etmeyi amaçlamaktadır. Türkiye'de yapılan bu çalışma, Türkçe diline özgü zorlukları (örneğin, yoğun morfolojik yapı ve düşürülen zamirler) ele alırken, DeepSeek (Liu vd., 2024) gibi dil modellerinin transfer öğrenme ile Türkçe'ye özelleştirilmesinin ticari bir çağrı merkezi ortamında nasıl uygulandığını göstermektedir. Çalışmanın temel katkıları arasında, derin öğrenme yöntemlerinin yüksek hacimli Türkçe çağrı merkezi trafiğinde gerçek zamanlı kalite yönetimi için nasıl kullanılabileceğinin uygulamalı bir örneği yer almaktadır.

YÖNTEM

Bu çalışmada, çağrı merkezi operasyonlarında müşteri temsilcisi performansının otomatik, objektif ve ölçeklenebilir bir şekilde değerlendirilmesi amacıyla bir sistem mimarisi önerilmektedir. Bu bölümde sistem çalışma kapsamında yapılan çalışmalar üç alt başlık altında incelenmektedir.

Veri Kümesi

Çalışma, kuruma ait çağrı merkezi veritabanında yer alan yaklaşık 1.200.000 çağrı kaydı kullanılarak yapılmıştır. 2025 senesine ait bu kayıtlar yaklaşık altı aylık sürede gerçekleştirilmiştir. Her çağrı kaydı; kimlik, görüşme taraflarına ait bilgileri, çağrı tarihi ve süresi, temsilci ve departman verileri, çağrı nedeni, konuşma metni, model özellikleri, kalite puanı ile model tarafından üretilen özet ve duygu etiketlerini içeren kapsamlı bir veri yapısından oluşmaktadır.

Sistem Mimarisi

Çağrı analizi ve kalite değerlendirme sürecinin çekirdeğini, python tabanlı bir Konuşmadan Metne (Speech-to-Text, STT) işlem hattı oluşturmaktadır. Çağrılar, kurum içi güvenlik gereksinimlerini karşılamak üzere GPU destekli kurum içi sunucular üzerinde çalışan, Türkçe diline özel olarak transfer öğrenme yöntemiyle yeniden eğitilmiş DeepSeek tabanlı bir model aracılığıyla STT katmanında metne dönüştürülmektedir. STT sürecinde her çağrı için model çalıştırma işlemi asenkron olarak yürütülmektedir. Bu süreçte çağrı yükü, Redis + Celery tabanlı görev kuyruğu mimarisi üzerinden dağıtılarak günlük 20.000'den fazla çağrının paralel biçimde işlenebilmesi, iş yükünün konteyner tabanlı görev işleyici süreçlerine otomatik dağıtılması ve yeniden deneme mekanizmaları sayesinde hata toleransı sağlanmaktadır. Görev işleyici bileşenleri ürettikleri STT çıktısını FastAPI tabanlı servis katmanına iletmekte; bu servis ise API ağ geçidi üzerinden çağrı trafiğini merkezi olarak yöneterek işlenmiş verileri kalite değerlendirme modülüne aktarmaktadır. Kalite değerlendirme katmanında metne dönüştürülmüş çağrılar, departmanların tanımladığı taktik dokümanlara göre analiz edilmekte;

bu aşamada departman bazlı puanlama algoritmaları, anahtar kelime çıkarımı, niyet tespiti ve konu sınıflandırması uygulanmaktadır. Üretilen skorlar, özetler ve duygu etiketleri FastAPI tabanlı mikroservisler aracılığıyla PostgreSQL üzerinde saklanmakta ve aynı zamanda Elasticsearch indeksine işlenerek hızlı ve esnek sorgulama imkânı sunmaktadır. Sürekli kalite iyileştirme kapsamında, düşük doğruluk gösteren kelime ve cümle örnekleri manuel testlerle belirlenmekte, bu örnekler kullanılarak model üzerinde ince ayar yapılmakta ve tüm performans metrikleri Grafana ve Prometheus tabanlı izleme panelleri üzerinden takip edilmektedir.

Özetle mimari; DeepSeek dil modeli, Redis+Celery görev kuyruğu, Docker konteynerları, PostgreSQL ve Elasticsearch veritabanları, Grafana/Prometheus izleme katmanı ve Kubernetes uyumlu bileşenlerden oluşan, tamamen kurum içi sunucular üzerinde çalışan ölçeklenebilir bir yapı olarak karşımıza çıkmaktadır.

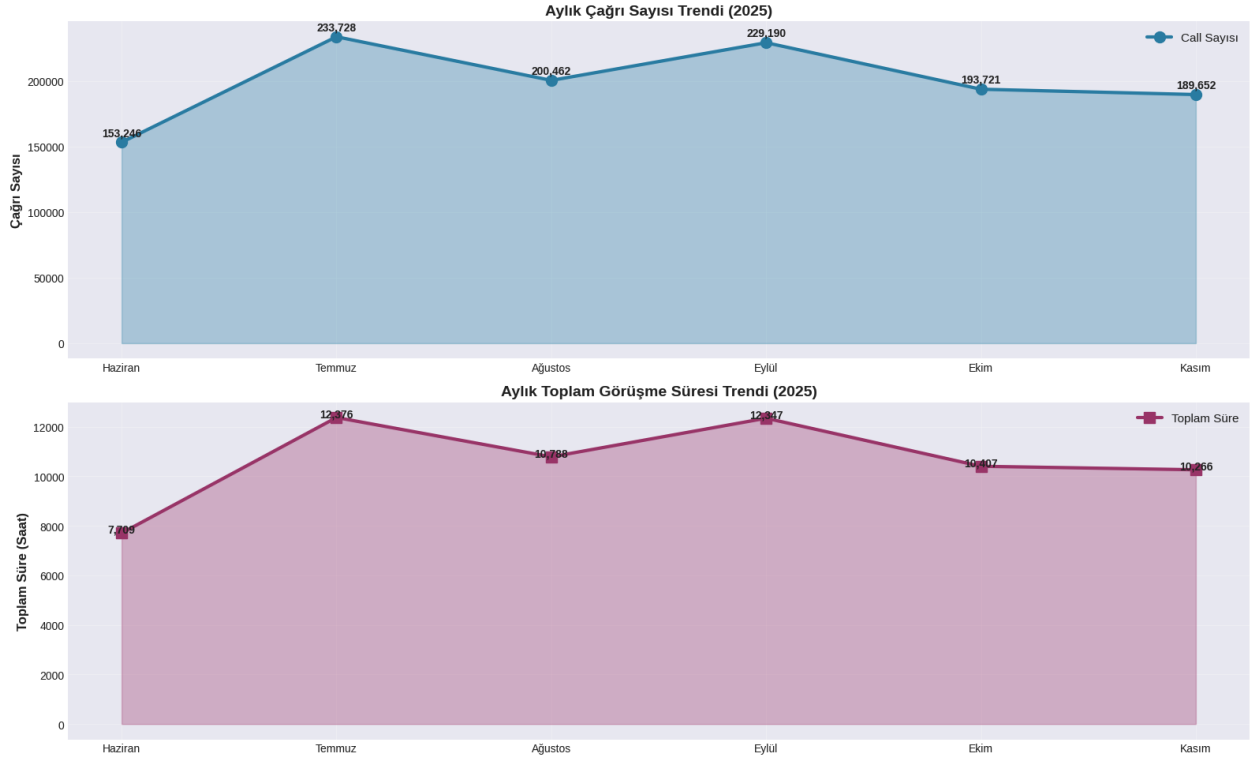
Analiz İşlemleri

Veri analizi aşamasında, STT ve kalite değerlendirme mimarisi tarafından üretilen çağrı kayıtları üzerinde betimsel istatistikler hesaplanmış ve operasyonel performans göstergeleri çıkarılmıştır. İlk olarak, ön işleme kapsamında yıl ve ay gibi türetilmiş zaman değişkenleri oluşturulmuş, temel analiz için ise yalnızca analitik alanlar üzerinde işlem yapılmıştır. Ardından, zaman serisi ve aylık dağılım analizi gerçekleştirilmiş; çağrı sayıları yıl ve ay bazında gruplanarak aylık çağrı hacmi ile her ayın toplam ve ortalama görüşme süreleri hesaplanmış, Haziran–Kasım 2025 dönemindeki değişimi incelemek üzere aylık sonuçlar özetlenmiştir. Çağrı süresi analizi için görüşme süreleri 0–30 sn, 30–60 sn, 1–2 dk, 2–5 dk, 5–10 dk ve 10+ dk sınıflarına ayrılarak kategori bazında dağılımlar elde edilmiştir. Temsilci ve departman bazlı analizde, temsilcilerin çağrı sayısı, toplam ve ortalama görüşme süresi gibi metrikleri çıkarılmış; 0–1, 1–5, 5–10 gibi performans kategorileri oluşturulmuştur. Ayrıca departman bazlı çağrı sayısı, temsilci sayısı, toplam ve ortalama süre ile temsilci başına düşen çağrı sayısı hesaplanmıştır. Son olarak, çağrı dökümü ve özet analizi kapsamında her çağrı için çağrı dökümü metnindeki kelime sayısı ve özetlerin kelime sayısı; özetlerin çağrı dökümüne göre yüzdesel sıkıştırma oranı ve kelime azalışı hesaplanmıştır. Çağrı dökümleri ayrıca kelime sayılarına göre 0–10, 10–30, 30–50, 50–100 ve 100+ kategorilerine ayrılarak içerik yoğunluğu analiz edilmiştir. Bu yöntem sayesinde hem STT işlem hattının üretim ortamındaki performansı hem de çağrı merkezi operasyonlarının hacim, süre, temsilci ve içerik boyutlarındaki davranışı bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirilmiştir.

BULGULAR

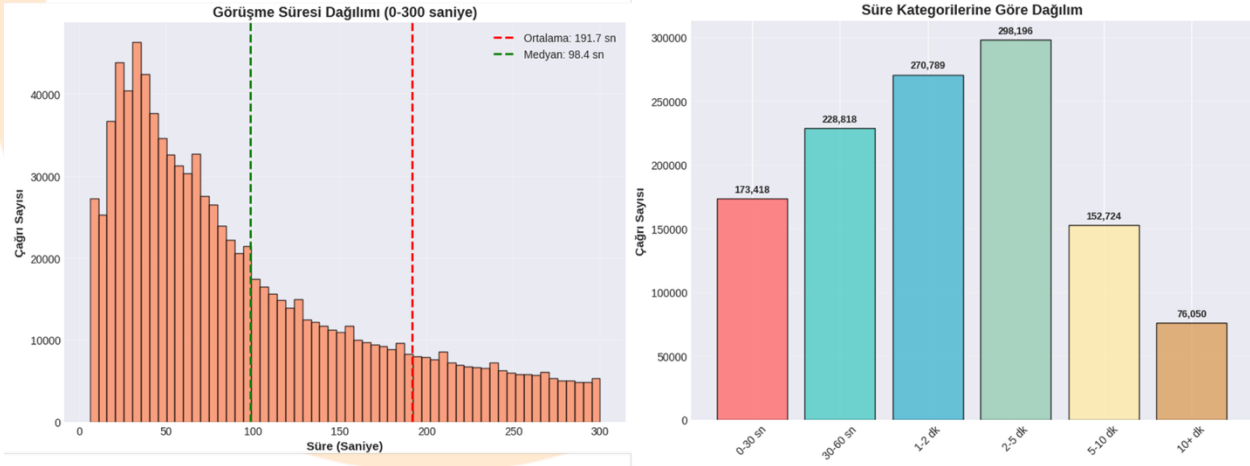
Çalışmada, Pronet çağrı merkezi operasyonlarından elde edilen 1.200.000 çağrı kaydı analiz edilmiştir. Veri kümesi; çağrı kimliği, arayan/aranan numaralar, tarih ve süre, temsilci ve departman bilgileri, konuşma metni, özet, duygu etiketleri ve model parametreleri gibi hem operasyonel hem de yapay zekâ çıktısı içeren 23 alandan oluşan zengin bir yapı sunmaktadır.

Çağrı hacmi ve süre dinamikleri incelendiğinde, ortalama çağrı süresinin 3,19 dakika olması, görece kısa görüşmelerin ağırlıkta olduğunu göstermektedir. Bu zamansal değişim ve aylara göre hacim/süre ilişkisi, Şekil 1’de verilmektedir.



Şekil 1. Çağrı sayısı ve çağrı süresinin aylara göre dağılımı

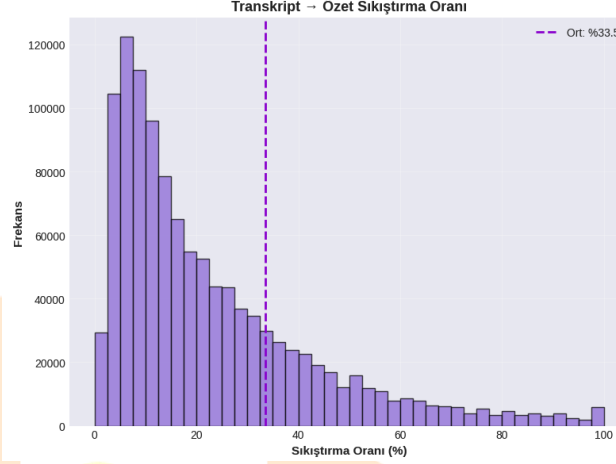
Çağrı sayısının, süre ve süre kategorilerine göre dağılımı, Şekil 2’de sunulmaktadır. Bu dağılım, operasyonel planlama ve kapasite yönetimi açısından dengenin ağırlıklı olarak kısa ve orta uzunluktaki çağrılara kaydığını göstermektedir.



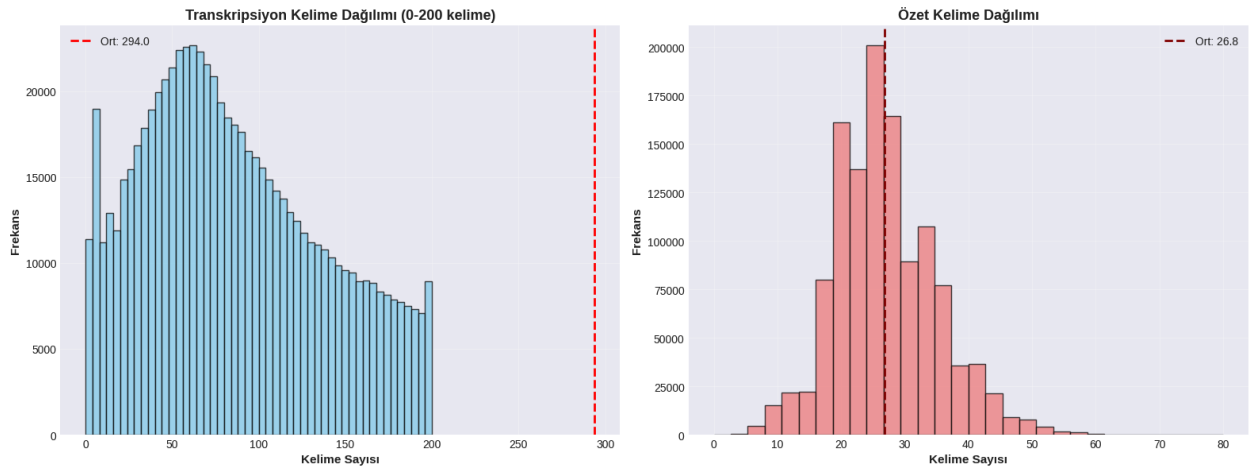
Şekil 2. Çağrı sayısının, süre ve süre kategorilerine göre dağılımı

Metin ve özet analizi kapsamında, STT işlem hattı tarafından üretilen çağrı dökümleri ve büyük dil modelleri tabanlı özetler üzerinde ayrıntılı kelime istatistikleri çıkarılmıştır. Tüm veri seti boyunca çağrı dökümlerinde toplam $\approx 352,7$ milyon kelime, çağrı başına ortalama ≈ 294 kelime; özetlerde ise toplam $\approx 32,1$ milyon kelime, çağrı başına ortalama ≈ 27 kelime elde edilmiştir. Çağrı dökümü/özet dönüşümünde, ortalama %30 civarında bir sıkıştırma oranı ve çağrı başına yaklaşık 267 kelimelik azalma söz konusudur. Sıkıştırma oranlarının dağılımı, Şekil 3’te histogram olarak gösterilmekte; çağrı dökümü ve özet kelime sayılarının genel dağılımı ise Şekil 4’te özetlenmektedir. Bu sonuçlar, özetleme modülünün uzun çağrılarda dahi

içeriği önemli ölçüde sade hâle getirdiğini, fakat anlam taşıyan çekirdeği koruduğunu göstermektedir.



Şekil 3. Sıkıştırma oranlarının dağılımı



Şekil 4. Çağrı dökümü ve özet kelime sayılarının dağılımı

Ayrıca, süre kategorileri ile kelime sayısı arasındaki ilişkiler incelendiğinde, çağrı süresi ile çağrı dökümü kelime sayısı arasında belirgin bir pozitif ilişki olduğu; buna karşın özet kelime sayısının süreye göre oldukça stabil kaldığı gözlenmiştir. Bu durum, kalite ekipleri için süre bağımsız, standart uzunlukta özetler üreten bir mimarinin kurulduğunu ve metin inceleme yükünü ciddi şekilde azalttığını göstermektedir.

SONUÇ

Bu çalışma, büyük ölçekli bir çağrı merkezi operasyonunda, kurum içi GPU destekli STT altyapısının ölçeklenebilir mikroservis mimarisi ve zengin betimsel analitiklerle birleştirildiğinde hem teknik hem de operasyonel açıdan güçlü çıktılar üretebildiğini göstermiştir. Çalışma, çağrı hacmi ile süre dinamiklerinin dengeli ancak kuyruklu bir yapı sergilediğini; çağrıların büyük kısmının 1–5 dakika aralığında yoğunlaştığını, çok uzun çağrıların ise nispeten sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır. Özetleme tarafında, çağrı dökümü/özet dönüşümünde yaklaşık %30'luk sıkıştırma oranı ile yüksek metin yükü, kalite ekipleri için yönetilebilir boyutlu ve standart uzunlukta özetlere indirgenmektedir. Böylece, manuel örnekleme ve rastgele çağrı dinleme yaklaşımı yerine, tüm çağrı evrenini kapsayan ve veriye dayalı bir kalite değerlendirme çerçevesi oluşturulmaktadır.



5th INTERNATIONAL CONGRESS ON MULTIDISCIPLINARY NATURAL SCIENCES

Önerilen mimari ve analitik yaklaşım; çağrı merkezi kalite süreçlerini manuel, sınırlı ve sezgisel bir yapıdan, ölçeklenebilir, ölçülebilir ve model destekli bir yapıya taşımaktadır. Gelecekte, bu altyapının gerçek zamanlı uyarı sistemleri, temsilciye anlık geri bildirim sağlayan koçluk asistanları ve farklı kanallara (chat, e-posta vb.) genişletilmesiyle, müşteri deneyimi ve operasyonel verimlilikte daha bütüncül bir yapay zekâ tabanlı kalite yönetimi çerçevesi geliştirilebilir.



KAYNAKÇA

- Ahlawat, H., Aggarwal, N., & Gupta, D. (2025). Automatic Speech Recognition: A survey of deep learning techniques and approaches. *International Journal of Cognitive Computing in Engineering*, 6, 201–237. <https://doi.org/10.1016/j.ijcce.2024.12.007>
- Ahmed, A., Sivarajah, U., Irani, Z., Mahroof, K., & Charles, V. (2024). Data-driven subjective performance evaluation: An attentive deep neural networks model based on a call centre case. *Annals of Operations Research*, 333(2–3), 939–970. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04874-2>
- Devlin, J., Chang, M.-W., Lee, K., & Toutanova, K. (2018). BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding.
- Fu, X., Chen, C., Laskar, M. T. R., Gardiner, S., Hiranandani, P., & Tn, S. B. (2022). Entity-level Sentiment Analysis in Contact Center Telephone Conversations. *Proceedings of the 2022 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing: Industry Track*, 484–491. <https://doi.org/10.18653/v1/2022.emnlp-industry.49>
- Iheme, L. O., & Ozan, Ş. (2022). A novel semi-supervised framework for call center agent malpractice detection via neural feature learning. *Expert Systems with Applications*, 208, 118173. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118173>
- Karataş, A. F., Mercan, Ö. B., ÖzdiL, U., & Ozan, Ş. (2023). Çağrı Merkezlerinde Olumsuzluk İçeren Çağrıların Evrimsel Sinir Ağları ile Tespiti. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 16(1), 13–19. <https://doi.org/10.17671/gazibtd.1156330>
- Liu, A., Feng, B., Xue, B., Wang, B., Wu, B., Lu, C., ... & Piao, Y. (2024). Deepseek-v3 technical report. *arXiv preprint arXiv:2412.19437*.
- Marr, B., & Neely, A. (2004). Managing and measuring for value: The case of call centre performance. *Cranfield School of Management and Fujitsu*.
- Ozan, Ş. (2021). Classification of Audio Segments in Call Center Recordings using Convolutional Recurrent Neural Networks (No. arXiv:2106.02422). *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.02422>
- Pamay Arslan, T., & Eryigit, G. (2025). Enhancing Turkish Coreference Resolution: Insights from deep learning, dropped pronouns, and multilingual transfer learning. *Computer Speech & Language*, 89, 101681. <https://doi.org/10.1016/j.csl.2024.101681>
- Plaža, M., Kazała, R., Koruba, Z., Kozłowski, M., Lucińska, M., Sitek, K., & Spyłka, J. (2022). Emotion Recognition Method for Call/Contact Centre Systems. *Applied Sciences*, 12(21), 10951. <https://doi.org/10.3390/app122110951>
- Sanh, V., Debut, L., Chaumond, J., & Wolf, T. (2020). DistilBERT, a distilled version of BERT: Smaller, faster, cheaper and lighter (No. arXiv:1910.01108). *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.01108>
- Santiago-Rufasto, J., Gonzales-Macavilca, M., Marrujo-Ingunza, C., & Ramos-Cosi, S. (2025). Systematic analysis of the relationship between service quality and customer satisfaction in call centers: Evidence from the last decade. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 73(6), 439–449. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V73I6P135>

AHP (Analitik Hiyerarşi Süreci), Bulanık MOORA (Oran Analizine Dayalı Çok Amaçlı Optimizasyon) ve Bulanık TOPSIS (İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Sıra Tercihi Tekniği) Yöntemleriyle Akıllı Telefon Seçimi

Selin İNCEKUL¹

Abstract

Technology is becoming an increasingly indispensable part of our lives. Smartphones are a clear example of this. Today, technological advancements lead to a wide variety of smartphone models. People's demands and expectations are constantly evolving. Smartphones with new features are emerging. While this may seem appealing at first glance, it actually causes people to experience significant challenges when choosing a smartphone. The criteria for phone features also vary by age group. This study reviewed the literature and identified six important criteria for phone selection: camera, battery, screen size, memory (GB), weight, and color. These criteria were rated on a scale of 0 to 9 by 10 people aged 22-25. University students were observed during their smartphone selections. The AHP (Analytic Hierarchy Process) method was applied to the obtained data to calculate the weights of the criteria. Three smartphones in the same price range were then evaluated by three decision-makers with a deeper understanding of the technical details. In this evaluation, the best smartphone model was selected using the fuzzy MOORA (Multi-Objective Optimization Based on Ratio Analysis) and fuzzy TOPSIS (Ideal Solution Similarity Rank Preference Technique) methods. The aim was to compare two different fuzzy decision-making methods. The study yielded the same rankings with both methods, and Model-2 was selected as the first model.

Keywords: AHP Method, Fuzzy TOPSIS Method, Fuzzy MOORA Method, Smartphone Selection, Multi Criteria Decision Making

¹ Product Portfolio Engineer, Sampa Automotive, Turkey, Orcid: 0009-0009-1156-1587

GİRİŞ

Akıllı telefonlar, insanların günlük yaşamlarında sıklıkla kullandıkları cihazlardır (Harari vd., 2017). Akıllı telefonlar sayesinde insanlar iletişim kurabilir, internetten faydalanabilir, fotoğraf ve video çekip paylaşabilir, yeni diller öğrenebilir, sosyal medyayı ve çeşitli haber sitelerini takip edebilirler. 22 ve 25 yaş aralığındaki üniversite öğrencilerinin telefon seçimleri gözlemlenilmesi amaçlanmıştır.

Akıllı telefonlar artık insanların vazgeçilmez cihazları haline gelmiştir (Godwin ve Jones, 2017). Bu nedenle, bu sektördeki yenilikler hız kesmeden devam etmektedir. Bu durumu, sürekli olarak yeni modellerle piyasaya sürülen akıllı telefonlardan anlamak mümkündür.

Kuşkusuz, sürekli yeni modellerin piyasaya sürülmesindeki en büyük etken akıllı telefon sektöründeki rekabettir. Bu rekabete teknolojik gelişmeler de eklendiğinde, günümüzün çeşitli özelliklere sahip akıllı telefonlarının pazarda yer bulması kaçınılmazdır.

Günümüzde, 16-90 yaş aralığındaki çoğu insan, genç veya yaşlı olsun, bir akıllı telefona sahiptir. Elbette, telefonların özellikleri yaş gruplarına göre değişiklik gösterebilir. Örneğin, 20-30 yaş aralığındaki gençler yeni bir akıllı telefon satın alırken kamera ve hafıza gibi özelliklere daha çok dikkat ederken, 50 yaş üstü kişiler pil ve ekran boyutu gibi özelliklere daha çok dikkat ediyor.

Yaş gruplarına ve hatta cinsiyete göre talep ve beklentilerin farklı olması akıllı telefon sektörünü de etkiliyor (Turnbull vd., 2000). Örneğin, hafıza özelliği dışında aynı özelliklere sahip telefonlar veya aynı sistem özelliklerine sahip ancak sadece rengi farklı olan akıllı telefonlar görmek mümkündür. Piyasada çok çeşitli akıllı telefon modellerinin bulunması, insanların akıllı telefon seçerken çok fazla düşünmesine neden olabiliyor.

Bu çalışmada, öncelikle AHP (Analitik Hiyerarşi Süreci) yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemle, akıllı telefonlarda önem taşıyan kriterlerin ağırlıkları hesaplanmıştır. Ardından, bulanık MOORA (Oran Analizine Dayalı Çok Amaçlı Optimizasyon) ve bulanık TOPSIS (İdeal Çözüme Benzerlik Sıra Tercihi Tekniği) yöntemleri sırasıyla uygulanmış ve bu iki yöntem kullanılarak 3 farklı akıllı telefon modeli arasından en iyi akıllı telefon modeli belirlenmiştir.

Bulanık karar verme yöntemlerinin uygulandığı birkaç örnek verecek olursak; (Arabsheybani, 2018) tedarikçinin performansını ölçmek için bulanık MOORA (Oran Analizine Dayalı Çok Amaçlı Optimizasyon) uyguladı. FMEA analizi de tedarikçinin risklerini analiz etmek için kullanıldı. (Zarbakhshnia vd., 2017) değerlendirme kriterlerini ölçmek için bulanık SWARA yöntemini kullandı. Plastik endüstrisindeki değerleri ölçmek için bulanık MOORA yöntemi kullanıldı. Bu makalede ayrıca operasyonel riskin en yüksek olduğu gözlemlendi.

YÖNTEM

Analitik Hiyerarşi Süreci Yöntemi

Analitik Hiyerarşi Süreci, nitel ve nicel bir yöntemdir. Problemi çözmek için bir yapı oluşturulur. Ardından, ikili karşılaştırma matrisi hesaplanır. Matristeki değerlerin tutarlılığı kontrol edilir. Tutarlılık oranı kabul edilebilir düzeydeyse, alternatiflere öncelik verilir. En yüksek değere sahip alternatif seçilir. Karar kriterleri tanımlanır. Öncelik değerlendirmesi yapılır, kriter ve öncelik ağırlıkları hesaplanır ve ardından tutarlılık analizi yapılır. AHP problemleri en az üç katmanda tanımlanır: Amaç, kriterler, alternatifler.

AHP'nin kolay uygulanabilirliğinin nedenleri:

- Yöntem doğal kabul edilir ve yöntemi kullanmaktan çekinmeyiz.
- Kullanımı için ileri düzeyde teknik bilgiye sahip olmak gerekmez.
- Kişilerin duygu, düşünce ve hislerine dayalı veriler içerebilir.
- Ölçülen veriler arasında öznel değerlendirmeyi dikkate alabilir.
- Belirli bir puanı dikkate alıp seçmek yerine, değerlendirilen kriterlere göre ikili karşılaştırmalar sağlar.

• Basit ve etkili bir prosedürle, farklı deneyim ve görüşlere rağmen bir sonuca ulaşılabilir.

- Karar vericilerin yargılarını ve düşüncelerini dikkate alır.
- Hem ölçülebilir hem de ölçülemeyen verileri kullanabilir.
- Yöntem, kaynak tahsisi, fayda/maliyet analizi, çatışma çözümü ve sistem tasarım optimizasyonu alanlarında doğrudan kullanılabilir (Saaty T., 1994).

BULANIK TOPSIS Yöntemi

Bulanık TOPSIS yönteminde, karar vericiler öncelikle karar kriterlerinin önemini öznel olarak değerlendirir. Daha sonra alternatifleri karar kriterlerine göre değerlendirirler. Karar vericiler hem karar kriterlerini hem de alternatifleri dilsel değişkenlerle değerlendirir. Dilsel değişkenleri sayısal olarak ifade etmek için üçgen veya yamuk üyelik fonksiyonları kullanılmaktadır.

1.Adım: Karar jürisi oluşturulur ve karar kriterleri belirlenir.

$$W_{jk}=(W_{jk1},W_{jk2},W_{jk3},W_{jk4})$$

$$X_{ijk}=(a_{ijk},b_{ijk},c_{ijk},d_{ijk})(i=1,2,\dots,m;j=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

2.Adım: Karar kriterleri ve alternatifler dilsel değişkenlerle değerlendirilir.

$$a_{ij}=\min_k \{a_{ij}^k\}, b_{ij}=\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K b_{ij}^k, c_{ij}=\max_k \{c_{ij}^k\} \quad (2)$$

3.Adım: Değerlendirme sonrasında dilsel değişkenler pozitif yamuk bulanık sayılara dönüştürülür ve kriter ağırlıkları ve kriter değerleri bulunur.

$$W_{j1}=\min_k \{W_{j1}^k\}, W_{j2}=\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K W_{j2}^k, W_{j3}=\max_k \{W_{j3}^k\} \quad (3)$$

4.Adım: Bulanık karar matrisi ve bulanık ağırlıklar matrisi elde edilir.

$$D=\begin{bmatrix} K_1 & K_2 & \dots & K_3 \\ X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{m1} & X_{m2} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix}, W=[w_1, w_2, \dots, w_n] \quad (4)$$

5.Adım: Normalleştirilmiş bulanık karar matrisi oluşturulur.

$x_{ij}=(a_{ij},b_{ij},c_{ij})$ ve $w_j=(w_{j1},w_{j2},w_{j3})$ pozitif yamuk bulanık sayılardır. D ise bulanık karar matrisidir.

6.Adım: Ağırlıklandırılmış normalleştirilmiş bulanık karar matrisi oluşturulur.

$$R=[r_{ij}]_{m \times n} \quad (5)$$

c_j * fayda kriterini ve c_j - maliyet kriterini temsil eder.

$$r_{ij}=\left(\frac{a_{ij}}{c_j^*}, \frac{b_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*}\right), c_j^*=\max_i \{c_{ij}\} \text{ (fayda kriteri)}$$

$$r_{ij}=\left(\frac{a_{ij}}{c_j}, \frac{a_{ij}}{b_{ij}}, \frac{a_{ij}}{a_{ij}}\right), c_j^-=\min_i \{a_{ij}\} \text{ (maliyet kriteri)} \quad (6)$$

olarak hesaplanır. Her karar kriteri farklı ağırlıklara sahip olabileceğinden, ağırlıklı normalleştirilmiş bulanık bir karar matrisinin belirlenmesi gerekir. Bu matris;

$$V = [v_{ij}]_{m \times n}$$

$$i = 1, 2, \dots, m;$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$
(7)

$$V_{ij} = r_{ij}(\cdot) W_j$$
(8)

7.Adım : A_j^* ve A_j^- -belirlenmesi gerekir.

$$A^* = (v_1^*, v_2^*, \dots, v_n^*), v_j^* = \max_i \{v_{ij}\}$$

$$A^- = (v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-), v_j^- = \min_i \{v_{ij}\}$$
(9)

8.Adım: Her alternatifin uzaklıkları hesaplanır.

İki bulanık sayı arasındaki uzaklığı (dv) göstermek için, her alternatifin uzaklığı aşağıdaki gibi bulunur:

$$d_i^* = \sum_{j=1}^n d(v_{ij}, v_j^*), d_i^- = \sum_{j=1}^n d(v_{ij}, v_j^-)$$
(10)

9.Adım: Alternatiflerin yakınlık katsayıları hesaplanır ve alternatifler sıralanır.

Mesafeler bulunduktan sonra, alternatiflerin yakınlık katsayıları hesaplanır.

Yakınlık katsayısı,

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^* + d_i^-}, i = 1, 2, \dots, m$$
(11)

Bulanık MOORA Yöntemi

Karar problemlerinde MOORA yöntemi kullanılır. MOORA yöntemi literatürde birçok çalışmada yer almaktadır. Güvenilirliği yüksektir ve karar vericiye kolaylık sağlar. Adımlar aşağıdaki gibidir.

1.Adım: Bulanık karar matrisini oluşturmak için üçgensel bulanık sayılar kullanılır.

$$X = \begin{bmatrix} [x_{11}^l, x_{11}^m, x_{11}^n] [x_{12}^l, x_{12}^m, x_{12}^n] \dots [x_{1n}^l, x_{1n}^m, x_{1n}^n] \\ [x_{21}^l, x_{21}^m, x_{21}^n] [x_{22}^l, x_{22}^m, x_{22}^n] \dots [x_{2n}^l, x_{2n}^m, x_{2n}^n] \\ [x_{m1}^l, x_{m1}^m, x_{m1}^n] [x_{m2}^l, x_{m2}^m, x_{m2}^n] \dots [x_{mn}^l, x_{mn}^m, x_{mn}^n] \end{bmatrix}$$
(12)

$x_{ij}^l, x_{ij}^m, x_{ij}^n$ değerleri matrisi; j , alternatif için i kriteri açısından, üçgensel bulanık sayı sırasıyla küçük, orta ve büyük değerleri temsil eder. Karar vericiler matrisi oluştururken aşağıdaki ölçek kullanılmıştır.

Tablo 1: Alternatiflerin değerlendirilmesinde kullanılan değişkenler

Dilsel terim/ Bulanık değerler	l	m	n
Çok Kötü (ÇK)	0	0	1
Kötü (K)	0	1	3
Orta Kötü (OK)	1	3	5
Orta (O)	3	5	7
Orta İyi (Oİ)	5	7	9
İyi (İ)	7	9	10
Çok İyi (Çİ)	9	10	10

2.Adım: Vektör normalizasyonu ve normalleştirilmiş bulanık karar matrisi hesaplanır.

$$r_{ij}^l = \frac{x_{ij}^l}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \left[(x_{ij}^l)^2 + (x_{ij}^m)^2 + (x_{ij}^n)^2 \right]}} \quad (13)$$

$$r_{ij}^m = \frac{x_{ij}^m}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \left[(x_{ij}^l)^2 + (x_{ij}^m)^2 + (x_{ij}^n)^2 \right]}} \quad (14)$$

$$r_{ij}^n = \frac{x_{ij}^n}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \left[(x_{ij}^l)^2 + (x_{ij}^m)^2 + (x_{ij}^n)^2 \right]}} \quad (15)$$

3.Adım: Ağırlıklandırılmış normalleştirilmiş bulanık karar matrisi hesaplanır.

$$\begin{aligned} v_{ij}^l &= w_j r_{ij}^l \\ v_{ij}^m &= w_j r_{ij}^m \\ v_{ij}^n &= w_j r_{ij}^n \end{aligned} \quad (16)$$

4.Adım: Maliyet ve fayda kriterlerine göre sıralama yapılır.

$$\begin{aligned}
 S_i^{+l} &= \sum_{j=1}^n v_{ij}^l \mid j \in j^{\max} \\
 S_i^{+m} &= \sum_{j=1}^n v_{ij}^m \mid j \in j^{\max} \\
 S_i^{+n} &= \sum_{j=1}^n v_{ij}^n \mid j \in j^{\max}
 \end{aligned} \tag{17}$$

Maliyet kriterleri şu şekildedir;

$$\begin{aligned}
 S_i^{-l} &= \sum_{j=1}^n v_{ij}^l \mid j \in j^{\min} \\
 S_i^{-m} &= \sum_{j=1}^n v_{ij}^m \mid j \in j^{\min} \\
 S_i^{-n} &= \sum_{j=1}^n v_{ij}^n \mid j \in j^{\min}
 \end{aligned} \tag{18}$$

5.Adım: Tüm alternatifler için performans puanları hesaplanır. Performans puanları için alternatiflerin fayda ve maliyet kriteri değerleri netleştirilir.

$$S_i(S_i^+, S_i^-) = \sqrt{\frac{1}{3} \left[(S_i^{+l} - S_i^{-l})^2 + (S_i^{+m} - S_i^{-m})^2 + (S_i^{+n} - S_i^{-n})^2 \right]} \tag{19}$$

6. Adım: Si değerleri hesaplanır. Bu hesaplamalara göre sıralanırlar. En iyi puan tercih edilir.

Çalışmanın Yöntemi

Bu çalışmada, öncelikle 22-25 yaşları arasında 10 kişiye anket uygulandı. Katılımcılardan kamera, pil, ekran boyutu, bellek (GB), ağırlık ve renk kriterlerini 0 (hiç önemli değil) ile 9 (çok önemli) arasında derecelendirmeleri istendi. Anket sonucunda elde edilen değerler Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Anket Sonuçları

Katılımcı/Kriterler	Kamera	Batarya	Ekran Boyutu	Bellek (GB)	Ağırlık	Renk
Katılımcı 1	9	6	6	4	8	4
Katılımcı 2	9	7	8	9	6	6
Katılımcı 3	8	8	6	9	6	3
Katılımcı 4	9	6	6	8	6	8
Katılımcı 5	9	8	6	9	9	2
Katılımcı 6	5	8	4	7	5	4
Katılımcı 7	8	6	7	9	4	5
Katılımcı 8	9	6	7	8	4	2
Katılımcı 9	7	8	5	9	1	3
Katılımcı 10	7	7	5	8	1	3

Analitik Hiyerarşi Süreci Yönteminin Uygulanması

1.Adım: İkili karşılaştırma matrisinin oluşturulması

İkili karşılaştırma matrisini oluşturmak için, her kriter için 10 katılımcının verdiği değerlerin ortalaması hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Kriterlerin Ortalamaları

Kamera	8
Batarya	7
Ekran Boyutu	6
Bellek (GB)	8
Ağırlık	5
Renk	4

Kriterlerin ortalamaları baz alınarak ikili karşılaştırma matrisi oluşturuldu. Bunun için kriterler ikili olarak karşılaştırıldı ve ortalamaları arasındaki farka 1 eklendi.

Tablo 4. İkili Karşılaştırma Matrisi

İkili Karşılaştırma Matrisi	Kamera	Batarya	Ekran Boyutu	Bellek(GB)	Ağırlık	Renk
Kamera	1	2	3	1	4	5
Batarya	0.5	1	2	0.5	3	4
Ekran Boyutu	0.333	0.5	1	0.333	2	3
Bellek (GB)	1	2	3	1	4	5
Ağırlık	0.25	0.333	0.5	0.25	1	2
Renk	0.2	0.25	0.333	0.2	0.5	1

2.Adım: İkili karşılaştırma matrisinin normalizasyonu

1. adımda elde edilen ikili karşılaştırma matrisine normalizasyon uygulandı ve Tablo 5 elde edildi.

Tablo 5. Normalleştirilmiş İkili Karşılaştırma Matrisi

Normalleştirilmiş İkili Karşılaştırma Matrisi	Kamera	Batarya	Ekran Boyutu	Bellek (GB)	Ağırlık	Renk
Kamera	0.305	0.329	0.305	0.305	0.276	0.250
Batarya	0.152	0.164	0.203	0.152	0.207	0.200
Ekran Boyutu	0.102	0.082	0.102	0.102	0.138	0.150
Bellek (GB)	0.305	0.329	0.305	0.305	0.276	0.250
Ağırlık	0.076	0.055	0.051	0.076	0.069	0.100
Renk	0.061	0.041	0.034	0.061	0.034	0.050

3.Adım: Kriter ağırlıklarının hesaplanması

Tablo 5'teki veriler kullanılarak, Tablo 6'da gösterilen kriterlerin ağırlıkları hesaplanmıştır.

$$0.305 + 0.329 + 0.305 + 0.305 + 0.276 + 0.250 = 1.77$$

$$1.77 / 6 = 0.295 \text{ Kamera kriterinin ağırlığı hesaplanmıştır.}$$

Tablo 6. Kriterlerin Ağırlıkları

Kamera	0.295
Batarya	0.180
Ekran Boyutu	0.112
Bellek (GB)	0.295
Ağırlık	0.071
Renk	0.047

Bulanık MOORA Yönteminin Uygulanması

Bulanık MOORA yöntemi, 3 akıllı telefon modelinden birini seçmek için kullanılmıştır. Bu çalışmada incelenen aynı fiyat aralığındaki 3 akıllı telefonun özellikleri Tablo 7'de gösterilmiştir.

Tablo 7. Çalışmada Kullanılan 3 Akıllı Telefonun Özellikleri

Kriter/Model türü	Model-1	Model-2	Model -3
Kamera	12 MP	15 MP	12 MP
Batarya	2815 mAH	4700 mAH	3900 mAH
Ekran Boyutu (inch)	6.1	6.5	6.1
Bellek (GB)	128 GB	256 GB	256 GB
Ağırlık	164 gr	209 gr	168 gr
Renk	Mavi	Siyah	Siyah

1.Adım: 3 karar vericiden, her bir kriter açısından 3 modeli değerlendirmeleri istendi. Karar vericilerin yaptığı değerlendirmeler Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Karar Vericilerin Değerlendirmeleri

Karar Vericiler	Model türleri	Kamera	Batarya	Ekran Boyutu	Bellek (GB)	Ağırlık	Renk
KV-1	Model-1	Oİ	O	Oİ	Oİ	İ	O
	Model-2	İ	Çİ	İ	Çİ	Oİ	İ
	Model-3	Oİ	Oİ	Oİ	Çİ	İ	İ
KV-2	Model-1	İ	O	İ	İ	Çİ	Oİ
	Model-2	Çİ	İ	İ	Çİ	Oİ	İ
	Model-3	İ	Oİ	İ	Çİ	İ	İ
KV-3	Model-1	Oİ	OK	İ	O	İ	İ
	Model-2	Çİ	Çİ	Oİ	Çİ	İ	O
	Model-3	Oİ	O	İ	Çİ	İ	O

2.Adım: Karar vericiler tarafından yapılan bu dilsel değerlendirmeler, Tablo 1’de alternatiflerin değerlendirilmesinde kullanılan dilsel değişkenlere karşılık gelen sayılarla değiştirilmiştir.

Tablo 9. Karar Vericilerin Değerlendirmelerine Karşılık Gelen Bulanık Sayılar

Karar Vericiler	Model türleri	Kamera	Batarya	Ekran Boyutu	Bellek (GB)	Ağırlık	Renk
KV-1	Model-1	5,7,9	3,5,7	5,7,9	5,7,9	7,9,10	3,5,7
	Model-2	7,9,10	9,10,10	7,9,10	9,10,10	5,7,9	7,9,10
	Model-3	5,7,9	5,7,9	5,7,9	9,10,10	7,9,10	7,9,10
KV-2	Model-1	7,9,10	3,5,7	7,9,10	7,9,10	9,10,10	5,7,9
	Model-2	9,10,10	7,9,10	7,9,10	9,10,10	5,7,9	7,9,10
	Model-3	7,9,10	5,7,9	7,9,10	9,10,10	7,9,10	7,9,10
KV-3	Model-1	5,7,9	1,3,5	7,9,10	3,5,7	7,9,10	7,9,10
	Model-2	9,10,10	9,10,10	5,7,9	9,10,10	7,9,10	3,5,7
	Model-3	5,7,9	3,5,7	7,9,10	9,10,10	7,9,10	3,5,7

3.Adım: Karar vericilerin yaptıkları değerlendirmelerin ortalamaları alınarak Tablo 10’da görülen bulanık karar matrisi elde edildi.

Tablo 10. Birleştirilmiş Bulanık Karar Matrisi

Model türü/Kriterler	Kamera	Batarya	Ekran Boyutu	Bellek (GB)	Ağırlık	Renk
Model-1	5.667,7.667, 9.333	2.333,4.333, 6.333	6.333,8.333, 9.667	5.000,7.000, 8.667	7.667,9.333, 10.000	5.000,7.000, 8.667
Model-2	8.333,9.667, 10.000	8.333,9.667, 10.000	6.333,8.333, 9.667	9.000,10.000, 10.000	5.667,7.667, 9.333	5.667,7.667, 9.000
Model-3	5.667,7.667, 9.333	4.333,6.333, 8.333	6.333,8.333, 9.667	9.000,10.000, 10.000	7.000,9.000, 10.000	5.667,7.667, 9.000

4.Adım: 13, 14 ve 15 numaralı formüller uygulanarak Tablo 11’de gösterilen normalize bulanık karar matrisi elde edildi.

Tablo 11. Normalleştirilmiş Bulanık Karar Matrisi

Model türü/Kriterler	Kamera	Batarya	Ekran Boyutu	Bellek (GB)	Ağırlık	Renk
Model-1	0.228,0.308, 0.375	0.109,0.203, 0.297	0.257,0.338, 0.392	0.188,0.263, 0.325	0.300,0.365, 0.391	0.225,0.315, 0.390
Model-2	0.335,0.389, 0.402	0.390,0.453, 0.469	0.257,0.338, 0.392	0.338,0.375, 0.375	0.222,0.300, 0.365	0.255,0.345, 0.405
Model-3	0.228,0.308, 0.375	0.203,0.297, 0.390	0.257,0.338, 0.392	0.338,0.375, 0.375	0.274,0.352, 0.391	0.255,0.345, 0.405

5.Adım: Bu aşamada Tablo 12’de gösterilen ağırlıklı normalleştirilmiş bulanık karar matrisi 16 numaralı formül uygulanarak elde edildi.

Tablo 12. Ağırlıklı Normalleştirilmiş Bulanık Karar Matrisi

Model türü/Kriterler	Kamera	Batarya	Ekran Boyutu	Bellek (GB)	Ağırlık	Renk
Model-1	0.067,0.091, 0.111	0.020,0.037, 0.053	0.029,0.038, 0.044	0.055,0.077, 0.096	0.021,0.026, 0.028	0.011,0.015, 0.018
Model-2	0.099,0.115, 0.119	0.070,0.081, 0.084	0.029,0.038, 0.044	0.099,0.111, 0.111	0.016,0.021, 0.026	0.012,0.016, 0.019
Model-3	0.067,0.091, 0.111	0.037,0.053, 0.070	0.029,0.038, 0.044	0.099,0.111, 0.111	0.019,0.025, 0.028	0.012,0.016, 0.019

6.Adım: Bu aşamada, fayda kriterleri (kamera, pil, ekran boyutu, bellek ve renk) için formül 17 uygulanarak S_i^+ değerleri, maliyet kriterleri (ağırlık) için formül 18 uygulanarak S_i^- değerleri hesaplanmıştır. Ardından, 19 numaralı formül uygulanarak alternatiflerin performans puanları hesaplanmıştır.

Tablo 13. Alternatiflerin Performans Sıralaması

Alternatifler	S_i^+	S_i^-	S_i	Sıra
Model-1	0.182,0.258,0.322	0.021,0.026,0.028	0.235	3
Model-2	0.309,0.361,0.376	0.016,0.021,0.026	0.329	1
Model-3	0.244,0.309,0.354	0.019,0.025,0.028	0.281	2

Bulanık TOPSIS Yönteminin Uygulanması

Tablo 8’de 3 karar vericinin belirlediği 3 akıllı telefonun dilsel değişkenlerle değerlendirmeleri gösterilmektedir. Bu tabloda yer alan dilsel değişkenler, Tablo 1’deki dilsel değişkenlere karşılık gelen bulanık sayılar kullanılarak Tablo 9’da elde edilmiştir. Daha sonra bu tablo kullanılarak bulanık TOPSIS yöntemi için sırasıyla aşağıdaki adımlar uygulanmıştır.

1.Adım: Tablo 9’daki değerlere formül 3 uygulanarak Tablo 14’teki birleşik karar matrisi elde edildi.

Tablo 14. Birleştirilmiş Bulanık Karar Matrisi

Model türü/Kriterler	Kamera	Batarya	Ekran Boyutu	Bellek (GB)	Ağırlık	Renk
Model-1	5,7.667,10	1,4.333,7	5,8.333,10	3,7,10	7,9.333,10	3,7,10
Model-2	7,9.667,10	7,9.667,10	5,8.333,10	9,10,10	5,7.667,10	3,7.667,10
Model-3	5,7.667,10	3,6.333,9	5,8.333,10	9,10,10	7,9,10	7,7.667,10

2.Adım: Formül 6 uygulanarak Tablo 15’te gösterilen normalize bulanık karar matrisi elde edildi.

Tablo 15. Normalleştirilmiş Bulanık Karar Matrisi

Model türü/Kriterler	Kamera	Batarya	Ekra	Memory (GB)	Weight	Colour
Model-1	0.5,0.767,1	0.1,0.433,0.7	0.5,0.833,1	0.3,0.7,1	0.5,0.536,0.714	0.3,0.7,1
Model-2	0.7,0.967,1	0.7,0.967,1	0.5,0.833,1	0.9,1,1	0.5,0.652,1	0.3,0.767,1
Model-3	0.5,0.767,1	0.3,0.633,0.9	0.5,0.833,1	0.9,1,1	0.5,0.556,0.714	0.3,0.767,1

3.Adım: Bu adımda, AHP yöntemi ile bulunan kriterlerin ağırlıkları ile Tablo 15'teki normalize edilmiş bulanık karar matrisi değerleri çarpılarak Tablo 16'daki ağırlıklı normalize edilmiş bulanık karar matrisi elde edildi.

Tablo 16. Ağırlıklı Normalleştirilmiş Bulanık Karar Matrisi

Model türü/Kriterler	Kamera	Batarya	Ekran Boyutu	Bellek (GB)	Ağırlık	Renk
Model-1	0.147,0.226,0.295	0.018,0.078,0.126	0.056,0.094,0.112	0.088,0.206,0.295	0.036,0.038,0.051	0.014,0.033,0.047
Model-2	0.206,0.285,0.295	0.126,0.174,0.180	0.056,0.094,0.112	0.265,0.295,0.295	0.036,0.046,0.071	0.014,0.036,0.047
Model-3	0.147,0.226,0.295	0.054,0.114,0.162	0.056,0.094,0.112	0.265,0.295,0.295	0.036,0.040,0.051	0.014,0.036,0.047

4.Adım: Tablo 17'de verilen Bulanık Pozitif İdeal Çözüm (FPIC-A*) ve Bulanık Negatif İdeal Çözüm (FNIS-A⁻) Formül 9 uygulanarak elde edildi.

Tablo 17. Bulanık Pozitif İdeal Çözüm (FPIS-A) ve Bulanık Negatif İdeal Çözüm (FNIS-A⁻)*

	Kamera	Batarya	Ekran Boyutu	Bellek (GB)	Ağırlık	Renk
A*	0.206,0.285,0.295	0.126,0.174,0.180	0.056,0.094,0.112	0.265,0.295,0.295	0.036,0.046,0.071	0.014,0.036,0.047
A ⁻	0.147,0.226,0.295	0.018,0.078,0.126	0.056,0.094,0.112	0.088,0.206,0.295	0.036,0.038,0.051	0.014,0.033,0.047

5.Adım: Bu adımda her bir alternatifin FPIS ve FNIS'e olan uzaklığı formül 10 kullanılarak hesaplandı.

Tablo 18. FPIS ve FNIS'den Uzaklıklar

	d _i [*]	d _i ⁻
Model 1	0.266	0.000
Model 2	0.000	0.266
Model 3	0.116	0.153

6.Adım:Her bir alternatifin yakınlık katsayısı formül 11 kullanılarak hesaplanır.

Tablo 19. Yakınlık Katsayısı ve Alternatiflerin Sıralanması

	CC _i	Rank
Model 1	0.000	3
Model 2	1.000	1
Model 3	0.569	2

Tablo 20. Bulanık MOORA ve Bulanık TOPSIS Yöntemlerine Göre Alternatiflerin

	Sıralanması	
	Fuzzy MOORA	Fuzzy TOPSIS
Model 1	3	3
Model 2	1	1
Model 3	2	2

SONUÇ

Cep telefonları geçmişte yalnızca konuşmak ve mesajlaşmak için kullanılırken, günümüzde iletişimin yanı sıra haber takip etmek, dizi izlemek, müzik dinlemek, oyun oynamak ve hatta kitap okumak için de kullanılıyor. Bu nedenle akıllı telefonların önemi her geçen gün artıyor.

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte insanların talep ve beklentileri de her geçen gün değişiyor. Bu durum akıllı telefon sektörünü doğrudan etkiliyor. Her geçen gün yeni özelliklerle karşımıza çıkan akıllı telefonlar bunun en açık örneği. İlk bakışta kulağa hoş gelen bu durum, aslında insanların akıllı telefon seçerken büyük zorluklar yaşamasına neden oluyor. Çünkü bir akıllı telefonun kamerası çok iyi olsa da, pili kötü ve hafızası düşük olabilir.

Literatür taraması yoluyla akıllı telefon pazarı için çalışmanın önemli kriterleri belirlenmiştir. Bu kriterler; kamera, batarya, ekran boyutu, bellek (GB), ağırlık ve renktir. Bu çalışmada, seçilecek 3 akıllı telefon modelinin aynı fiyat aralığında olması nedeniyle fiyat bir değerlendirme kriteri olarak alınmamıştır. 22-25 yaş aralığındaki 10 bireyden, bu kriterlerin her birini 0 (hiç önemli değil) ile 9 (çok önemli) arasında bir ölçekte derecelendirmeleri istenmiştir. Anket sonucunda elde edilen veriler üzerinde AHP yaklaşımı kullanılarak kriterlerin ağırlıkları hesaplanmıştır. Daha sonra, belirlenen 3 akıllı telefon 3 karar verici tarafından değerlendirilmiştir. Karar vericilerin bu değerlendirmelerine sırasıyla hem bulanık MOORA hem de bulanık TOPSIS yöntemleri uygulanmıştır. Belirlenen kriterlere göre, uygulanan iki yöntem sonucunda, ilk seçilen akıllı telefon model-2, son seçilen akıllı telefon ise model-1 olmuştur.

Kriter ağırlıkları AHP yaklaşımı kullanılarak türetildiğinde, kamera ve bellek kriteri aynı ve en yüksek ağırlıklara sahipken, renk kriteri en düşük ağırlığa sahiptir. Seçilecek modeller arasında en yüksek belleğe sahip olan model 2 ve model 3'tür ve en iyi kamera ise model 2'ye aittir. Bu nedenle, hem bulanık MOORA hem de bulanık TOPSIS yöntemleri sonucunda model 2'nin ilk sırada yer alması şaşırtıcı değildir.

Bu çalışmada hem bulanık MOORA hem de bulanık TOPSIS yöntemleri tercih edilmiştir. Çünkü literatürde AHP'yi bulanık MOORA ve bulanık TOPSIS yöntemleriyle bu



5thINTERNATIONAL CONGRESS ON Multidisciplinary NATURAL SCIENCES

şekilde birleştiren bir çalışma bulunmamaktadır. Ayrıca, bu çalışmada bulanık karar verme yöntemlerinden olan bulanık MOORA ve bulanık TOPSIS yöntemlerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır.





5th INTERNATIONAL CONGRESS ON MULTIDISCIPLINARY NATURAL SCIENCES

KAYNAKÇA

Arabsheybani, A., Paydar, M. M., & Safaei, A. S. (2018). An integrated fuzzy MOORA method and FMEA technique for sustainable supplier selection considering quantity discounts and supplier's risk. *Journal of cleaner production*, 190, 577-591.

Godwin-Jones, R. (2017). Smartphones and language learning.

Harari, G. M., Müller, S. R., Aung, M. S., & Rentfrow, P. J. (2017). Smartphone sensing methods for studying behavior in everyday life. *Current opinion in behavioral sciences*, 18, 83-90.

Mavi, R.K., Goh, M., & Zarbakhshnia, N. 2017. "Sustainable third-party reverse logistic provider selection with fuzzy SWARA and fuzzy MOORA in plastic industry." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(5-8), 2401-2418.

Saaty, T. L. (1994). A ratio scale metric and the compatibility of ratio scales: The possibility of Arrow's impossibility theorem. *Applied Mathematics Letters*, 7(6), 51-57.

Turnbull, P. W., Leek, S., & Ying, G. 2000. Customer confusion: The mobile phone market. *Journal of Marketing Management*, 16(1-3), 143-163.



ICOMNAS

Tekstil Boyalarının Gideriminde Gram-pozitif ve Gram-negatif Bakterilerin Karşılaştırmalı Biyoremediasyon Potansiyeli

Şule Aybüke DİKİCLAŞIK¹

Gizem TALAŞ²

Berkan SOLMAZ³

İsa DÜZEL⁴

Gökhan CORAL⁵

Abstract

Wastewater from the textile industry constitutes a major environmental pollutant, primarily due to the synthetic dyes employed in dyeing processes. Effective treatment of these effluents prior to their release into the environment is therefore critical. This study investigates the potential application of microorganisms as biosorbents for the removal of textile dyes via biosorption. Two Gram-positive bacterial strains (*Bacillus subtilis* subsp. *spizizenii* ATCC 6633 and *Bacillus cereus* ATCC 14579) and two Gram-negative strains (*Escherichia coli* ATCC 8739 and *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853) were evaluated as biosorbents. Experiments were conducted using four textile dyes: Methylene Blue, Methyl Orange, Congo Red, and Synozol Blue KBR, with stock solutions prepared at 1000 ppm (mg/L). The strain *Bacillus subtilis* subsp. *spizizenii* ATCC 6633 exhibited 98.35% removal efficiency for Congo Red dye under acidic pH conditions; *Bacillus cereus* ATCC 14579 showed 99.21% removal of Methyl Orange dye at acidic pH; *Escherichia coli* ATCC 8739 achieved 92.21% removal of Methylene Blue dye under basic pH conditions; and *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853 demonstrated 98.58% removal efficiency for Methyl Orange dye at neutral pH. The effects of dye concentration, and contact time on biosorption efficiency were systematically assessed. The results demonstrate that the tested bacterial strains can serve as effective biosorbents, with specific strains exhibiting higher removal efficiencies for particular dyes. These findings suggest that microorganism-based biosorption offers a cost-effective and environmentally sustainable approach for the treatment of textile wastewater.

Keywords: Bioremediation, Biosorption, Wastewater, Textile dyes, Microorganisms

¹ Arş. Gör., Mersin Üniversitesi, Biyoteknoloji Bölümü, suleaybukeyavuz@mersin.edu.tr, Orcid: 0000-0003-2441-0955

² Dr. Arş. Gör., Mersin Üniversitesi, Biyoteknoloji Bölümü, gyildizli@mersin.edu.tr, Orcid: 0000-0001-6884-3344

³ Mersin Üniversitesi, Biyoteknoloji Bölümü, berkaysolmaz01@gmail.com, Orcid: 0009-0005-6897-0913

⁴ Mersin Üniversitesi, Biyoteknoloji Bölümü, isaduzel901@gmail.com, Orcid: 0009-0006-8121-8096

⁵ Prof. Dr., Mersin Üniversitesi, Biyoteknoloji Bölümü, coral@mersin.edu.tr, Orcid: 0000-0002-3533-118X

GİRİŞ

Sanayileşme ve kentleşmenin bir sonucu olan hızlı nüfus artışı, tüketim ihtiyaçlarının ve buna bağlı olarak endüstriyel üretimin artmasına yol açarak pek çok çevre kirliliğine sebep olmuştur. Dünya üzerinde kirlilik sıralamasının başında ise su kirliliği gelmektedir. Kirleticinin kaynağına göre evsel atıksular, tarımsal atıksular, endüstriyel atıksular olarak sınıflandırılır (El Bakraoui vd., 2022: 2). Tekstil endüstrisi (%54), en yüksek miktarda boya atık suyu salan sektördür ve dünya genelinde çevrede gözlemlenen boya atık sularının yarısından fazlasına katkıda bulunur (Katheresan vd., 2018: 4677; Wang vd., 2022: 2077).

Boyar maddeler; iyonik yük durumları, kimyasal yapı ve boyama mekanizmalarına göre sınıflandırılır. Güncel çalışmalarda bu sınıflandırma genel olarak anyon boyalar, katyon boyalar ve non-iyonik/disperse boyalar olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır (Rápó ve Tonk, 2021: 5; Tolkou vd., 2025: 1). Boyar maddelerin görünür ışığı absorbe edebilmesini sağlayan gruplarına kromojen adı verilmektedir. Kromojen gruplar ise renk verici anlamına gelen, aromatik yapılar olan kromofor gruplarından oluşurlar ve bu gruplar kimyasal yapılarına göre Nitraso, Nitro, Azo, Etilen, Karbonil, Karbon-Azot ve Kükürt olmak üzere 7 gruba ayrılmaktadır (Benkhaya vd., 2020a: 3).

Azo boyalar, reaktif boyaların farklı reaktif gruplarla birleşmesi sonucu ortaya çıkan ve tekstil boyamada yaygın şekilde kullanılan bir boya grubudur. En belirgin özellikleri arasında bir veya birkaç azo ($-N=N-$) bağı içermeleri ve tekstil liflerine kovalent bağlarla tutunabilmeleri yer alır. Tekstil endüstrisinde kullanılan sentetik boyaların %60-70'ini azo boyalar oluşturmakta ve bunların önemli kısmı reaktif azo boyalar olarak kullanılmaktadır (Al-Tohamy vd., 2022: 2; Aayed vd., 2011: 272; Benkhaya vd., 2020b: 1).

Çevreye olan zararlı etkileri nedeniyle, boyar maddeler atık suya bırakılmadan önce mutlaka etkin bir şekilde giderilmelidir. Boyar maddelerin atıksulardan uzaklaştırılması için günümüzde fiziksel (adsorpsiyon, membran filtrasyonu, iyon değişimi), kimyasal (koagülasyon / flokülasyon, gelişmiş oksidasyon prosesi, fotokataliz, ozonlama) ve biyolojik (aktif çamur, oksidatif biyoreaktörler, enzimatik ayrışma, mikroorganizma-bazlı dekolorizasyon) yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır (Al-Tohamy vd., 2022: 8). Bu yaklaşımlar sayesinde hem renk giderimi sağlanmakta hem de atıksu kalitesi, işlem maliyeti ve çevresel güvenlik arasında optimum denge hedeflenmektedir (Abhisek vd., 2025: 25). Bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajları, maliyet, proses karmaşıklığı ve atıksu karakteristiklerine bağlı olarak değişir. Mikrobiyal ve enzimatik renk giderme süreçleri, tekstil endüstrisinden kaynaklanan atık suların arıtılmasında, fizikokimyasal yöntemlere kıyasla daha düşük su tüketimi, daha az çamur üretimi ve daha düşük maliyet gibi avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, bu biyolojik yöntemler çevreye daha az zarar vererek sürdürülebilir bir çözüm olarak öne çıkmaktadır (Ngo ve Tischler, 2022: 5; Rápó ve Tonk, 2021: 9). Boyar madde arıtımında kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1 – Boyar Madde Arıtımında Kullanılan Yöntemlerin Avantaj ve Dezavantajları
Fiziksel Yöntemler

Yöntem	Avantajlar	Dezavantajlar
Membran filtrasyonu	Tüm boyar maddelere uygulanabilir ve çevresel koşullardan bağımsızdır (Dutta vd., 2021: 4501).	Yoğun çamur oluşumu gözlenir (Lim ve Bai, 2003: 280).
İyon değişimi	Adsorban kaybı olmaz ve kullanılan çözücü tekrar kullanılabilir (Fouda-Mbanga vd., 2024: 1).	Maliyeti yüksektir; dispers boyalar için uygun değildir (Fouda-Mbanga vd., 2024: 3).
Elektrokinetik pıhtılaşma	Ekonomiktir (Rápó ve Tonk, 2021: 9).	Yüksek çamur oluşumuna yol açar (Tolkou vd., 2025: 3).
Aktif karbon ile adsorpsiyon	Çoğu boyar maddeyi etkili şekilde giderir (Hammad vd., 2024: 2).	Yüksek maliyet; her boyar maddeye uygun değildir (Gupta, 2009: 2320).

Kimyasal Yöntemler

Ozonlama	Atık su ve çamur oluşumunu önler; boya tekrar kullanılabilir (Takdastan vd., 2019: 129).	Yarı ömrü çok kısadır (Von Gunten, 2003: 1445).
Oksidasyon	Uygulaması kolaydır (Sharma vd., 2018: 25).	H ₂ O aktivasyonu gerekir (Tran vd., 2016: 101)
Fotokimyasal	Çamur ve kötü koku oluşumu minimaldir (Kumari vd., 2023: 349).	Atık yan ürünler ortaya çıkar (Kumari vd., 2023: 349).
Fenton (H ₂ O ₂ + Fe ²⁺)	Giderim hızı yüksektir (Gómez vd., 2023: 15).	Çamur oluşumuna yol açar (Su vd., 2019: 145).
Elektrokimyasal yıkım	Çamur ve kimyasal atık oluşmaz (Samarghandi vd., 2020: 6848).	Boyar madde giderimi akış hızının artmasıyla düşer (Garajehdaghi ve Seyyedi, 2019: 195).
Sodyum hipoklorit (NaOCl)	Azo bağlarının kırılmasını hızlandırır (Akter ve Dong 2024: 243).	Aromatik aminler açığa çıkar (Ganaie vd., 2023: 9).

Biyolojik Yöntemler

Anaerobik sistemler	Suda çözüneabilen boyar maddeleri giderir (Won vd., 2006: 208).	Hidrojen sülfür ve metan oluşumu gözlenir (Sousa vd., 2016: 1387).
Beyaz çürükçül mantarlar	Ekstraselüler enzimler boyar maddeleri degrade eder (Chaturvedi, 2019: 10).	Enzim üretimi ve aktivitesi stabil değildir (Chaturvedi, 2019: 12).
Diğer mikrobik kültürler	24–30 saat içinde renk giderimi sağlar (Rápó ve Tonk, 2021: 9).	Azo boyalar aerobik koşullarda metabolize edilmesi zordur (Rápó ve Tonk, 2021: 9).
Yaşayan veya ölü mikrobiyal biyokütle	Mikroorganizmalar boyar maddelere spesifik bağlanır (Daniel-González vd., 2025: 2).	Tüm mikroorganizmalar her boyar maddeyi adsorbe edemez (Abubakar vd., 2023: 41).

Temiz su kaynaklarının da azalması göz önüne alındığında atıksuların geri kazanımı çevre ve insan sağlığı açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmanın amacı sulu ortamdan çeşitli tekstil boyar maddelerin biyoremediasyonunda mikroorganizmaların kullanım potansiyelinin araştırılmasıdır.

YÖNTEM

Bakterilerin Aktifleştirilmesi

Biyolojik arıtma uygulamaları için, halihazırda ticari olarak elde edilen 2 farklı Gram (+) [*Bacillus subtilis* subsp. *spizizenii* ATCC (American Type Culture Collection) 6633, *Bacillus cereus* ATCC 14579)] ve 2 farklı Gram (-) (*Escherichia coli* ATCC 8739, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853) bakteri suşları kullanıldı. Bakteriler optimum gelişme sıcaklıkları olan 37 °C’de Nutrient Broth (NB) ve Nutrient Agar (NA) besiyerlerinde 18-24 saat inkübe edilerek aktifleştirildi.

Stok Boya Çözeltilisinin Hazırlanması

Metilen Blue (MB), Metil Orange (MO), Kongo Red (KR) ve Synozol Blue KBR (KBR) olmak üzere dört farklı tekstil boyası, 1000 ppm (mg/L) konsantrasyonda stok boya çözeltisi olarak hazırlandı. Deneylerde stok boya çözeltisi hedeflenen konsantrasyonlarda seyreltilerek kullanıldı.

Bakterilerin Boyalı Ortama Adaptasyonu

Aktifleştirilen suşlar 20 ppm boyar madde içeren, pH 7’ye ayarlanan Nutrient Broth besiyerine inoküle edilerek ve optimum büyüme koşullarında inkübasyonu sağlandı. Üreyip gelişen bakteri kültürleri 40 ppm boyar madde içeren, pH 7’ye ayarlanan Nutrient Agar besiyerine pasajlanarak optimum büyüme koşullarında inkübe edildi. Boyalı ortama adapte olabilen suşlar ileri çalışmalarda kullanılmak üzere seçildi.

Optimum Boya Giderimi Koşullarının Belirlenmesi

Boyar madde arıtımında bakterilerin giderim sağladığı optimum koşulların belirlenmesi amacıyla, her boyar madde için 3 farklı boya konsantrasyonu (25 ppm, 50 ppm, 100 ppm) pH 7’de test edildi. Boya gideriminin en yüksek olduğu koşullar seçilerek pH 4,5 ve pH 9 değerlerindeki giderim oranları belirlendi. Deneyler 3 tekrarlı olarak uygulandı.

Boya Gideriminin Spektrofotometrik Analizi

Boya çözeltililerindeki renk değişimi ve boya konsantrasyonundaki azalma, 24. ve 48. (C_{son}) saatlerde spektrofotometre ile her boyar maddenin maksimum absorbans yaptığı dalga boyunda (Metilen Blue; 543 nm, Metil Oranj; 500 nm, Kongo Red; 497 nm, Synozol Blue KBR; 615 nm) ölçüldü. İnkübasyon sonunda alınan örnekler, 2 dakika 12.000 rpm’de santrifüj edildi ve bakteriler çöktürülerek uzaklaştırıldı. Mikroorganizma inokülasyonundan önceki boyalı NB absorbans değeri; C₀ olup, kör olarak mikroorganizma ve boya içermeyen NB kullanıldı. Boya giderim yüzdesi E.1 formülü ile hesaplandı (Kadhium vd., 2021: 4784):

$$(E.1) \% \text{ Boya Giderimi} = (C_0 - C_{\text{son}}) / C_0 \times 100$$

BULGULAR

Bu çalışmada dört bakteri türünün farklı konsantrasyon, pH ve inkübasyon sürelerinde tekstil boyar maddelerini giderme potansiyeli incelenmiştir. Elde edilen bulgular,

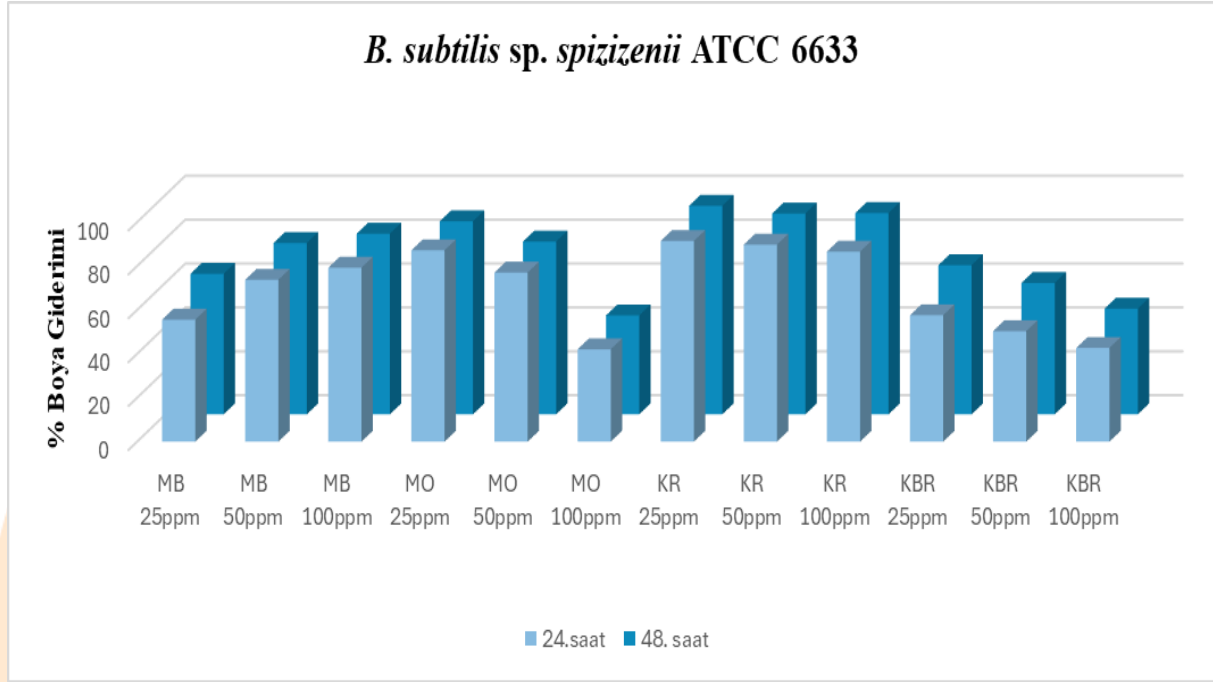
biyoremediasyon veriminin boya türü ile konsantrasyonu, pH ve inkübasyon süresi gibi etkenlere bağlı olduğunu göstermektedir. Bakterilerin pH 7’de boya giderim aktiviteleri Tablo 2’de gösterilmiştir. *B. subtilis* sp. *spizizenii* ATCC 6633’ün % boya giderim aktivite grafiği Şekil 1’de; *B. cereus* ATCC 14579’un % boya giderim aktivite grafiği Şekil 2’de; *E. coli* ATCC 8739’un % boya giderim aktivite grafiği Şekil 3’de ve *P. qeruginosa* ATCC 27853’ün % boya giderim aktivite grafiği Şekil 4’te gösterilmiştir.

Deney serilerinden en yüksek boya giderim aktivitesi gösteren bakteri suşları ve boyar madde konsantrasyon kombinasyonları pH 4,5 ve pH 9,0’da test edilmiştir. Bakterilerin pH 4,5’deki giderim oranları grafiği Şekil 5’de; pH 9,0’daki giderim oranları grafiği Şekil 6’da gösterilmiştir. Bakterilerin % boya giderim aktiviteleri Tablo 3’de; pH karşılaştırmalı boya giderim aktivite grafikleri 24. saat için Şekil 7’de, 48. saat için Şekil 8’de gösterilmiştir.

Tablo 2 – Bakterilerin Boya Giderim Aktiviteleri (%)

Bakteri türü	Boyar madde	Konsantrasyon	24. saat boya giderimi	48. saat boya giderimi
<i>B. subtilis</i> sp. <i>spizizenii</i> ATCC 6633	Metilen Blue	25 ppm	%55,55	%64,03
		50 ppm	%73,72	%78,04
		100 ppm	%79,24	%82,29
	Metil Orange	25 ppm	%87,16	%87,94
		50 ppm	%77,02	%78,66
		100 ppm	%42,07	%45,04
	Kongo Red	25 ppm	%91,41	%94,99
		50 ppm	%89,75	%91,48
		100 ppm	%86,54	%91,69
	Synozol Blue KBR	25 ppm	%57,57	%67,96
		50 ppm	%50,34	%59,86
		100 ppm	%42,66	%48,14
<i>B. cereus</i> ATCC 14579	Metilen Blue	25 ppm	%68,55	%73,12
		50 ppm	%70,43	%87,94
		100 ppm	%79,43	%78,47
	Metil Orange	25 ppm	%77,37	%93,97
		50 ppm	%68,98	%87,39
		100 ppm	%55,03	%88,85
	Kongo Red	25 ppm	%85,69	%43,74
		50 ppm	%64,61	%52,84
		100 ppm	%34,96	%42,33
	Synozol Blue KBR	25 ppm	%87,44	%93,93
		50 ppm	%92,06	%95,01
		100 ppm	%88,11	%95,24
<i>E. coli</i> ATCC 8739	Metilen Blue	25 ppm	%61,01	%87,00
		50 ppm	%83,05	%87,98
		100 ppm	%91,85	%90,48
	Metil Orange	25 ppm	%8,08	%26,17
		50 ppm	%-2,83	%10,50
		100 ppm	%-6,97	%0,57
	Kongo Red	25 ppm	%44,57	%18,95
		50 ppm	%30,96	%19,38
		100 ppm	%30,41	%-1,43
	Synozol Blue KBR	25 ppm	%84,41	%79,22
		50 ppm	%91,60	%90,47
		100 ppm	%80,88	%90,80
	Metilen Blue	25 ppm	%54,99	%61,58
		50 ppm	%80,03	%78,21
		100 ppm	%80,33	%56,75

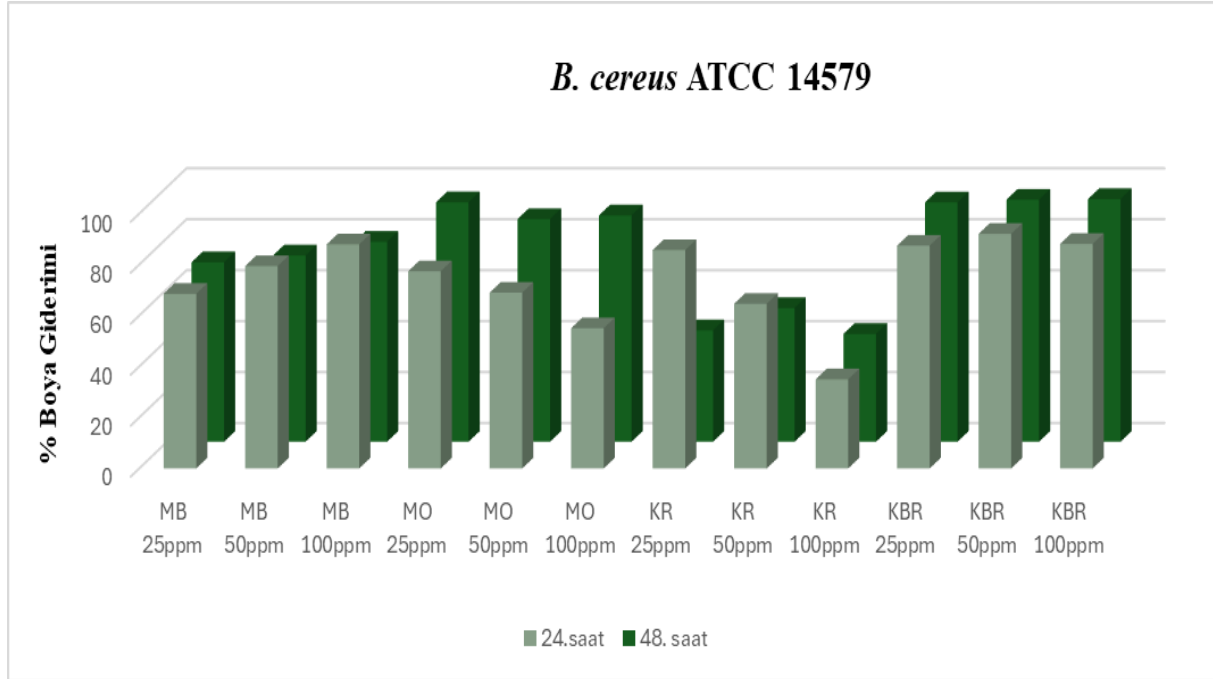
<i>P. aeruginosa</i> ATCC 27853	Metil Orange	25 ppm	%97,02	%97,09
		50 ppm	%96,29	%98,58
		100 ppm	%97,93	%97,10
	Kongo Red	25 ppm	%73,89	%79,85
		50 ppm	%63,90	%75,25
		100 ppm	%66,96	%41,44
	Synozol Blue KBR	25 ppm	%91,77	%83,98
		50 ppm	%92,06	%92,51
		100 ppm	%92,66	%93,38



Şekil 1 – *B. subtilis* sp. *spizizenii* ATCC 6633 boya giderim aktivitesi grafiği (%)

Nötr pH’da *B. subtilis* sp. *spizizenii* ATCC 6633; Metilen Blue boyar maddesinde %80-85 aralığında sonuçlar elde edilmiştir. Metil Oranj ve Kongo Red boyalarında %95-97 oranında çok yüksek giderim gerçekleşmiştir. Syonozol Blue KBR’de %90’a yakın sonuçlar izlenmiştir.

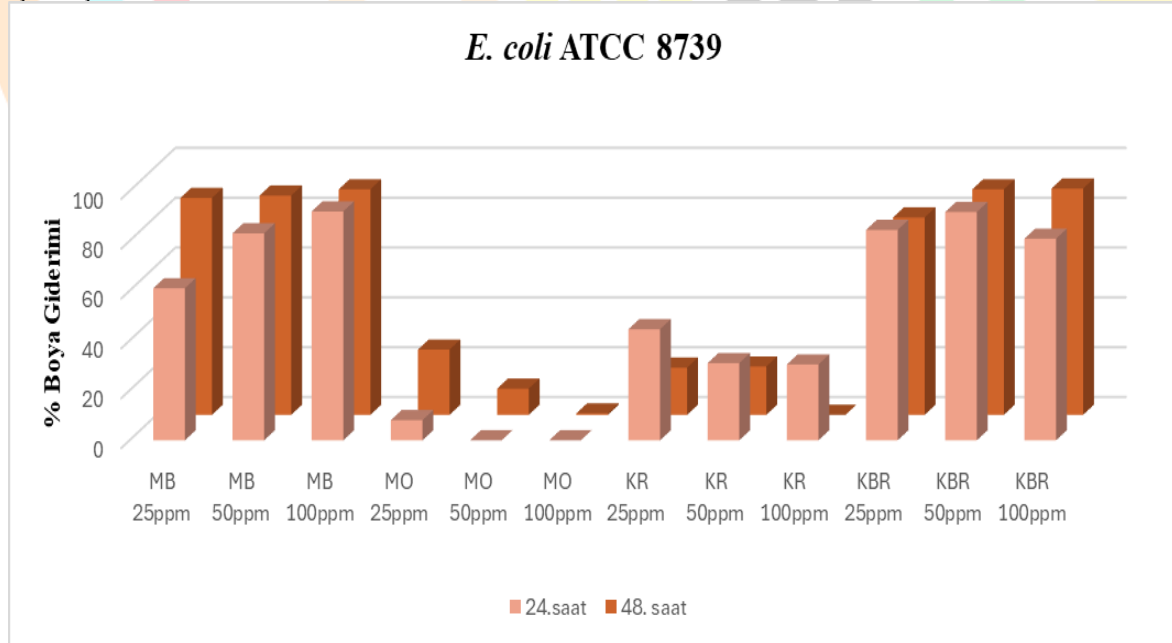
B. subtilis sp. *spizizenii* ATCC 6633 tarafından nötr pH’da en yüksek giderim oranı Metil Orange ve Kongo Red boyar maddelerinde, 25 ppm konsantrasyonda elde edilmiştir. Bu nedenle pH optimizasyonu çalışmalarında bu konsantrasyonlar tercih edilmiştir.



Şekil 2 – *B. cereus* ATCC 14579 boya giderim aktivitesi grafiği (%)

Nötr pH'da *B. cereus* ATCC 14579; Metilen Blue'da %85-88, Metil Oranj'da %99'a varan, Kongo Red'de %90'ın üzerinde ve Syonozol Blue KBR'de %93-95 oranında renk giderimi sağlanmıştır. Özellikle Metil Oranj'da elde edilen %99'luk giderim, bu türün asidik azo boyalara karşı yüksek etkinliğini göstermektedir.

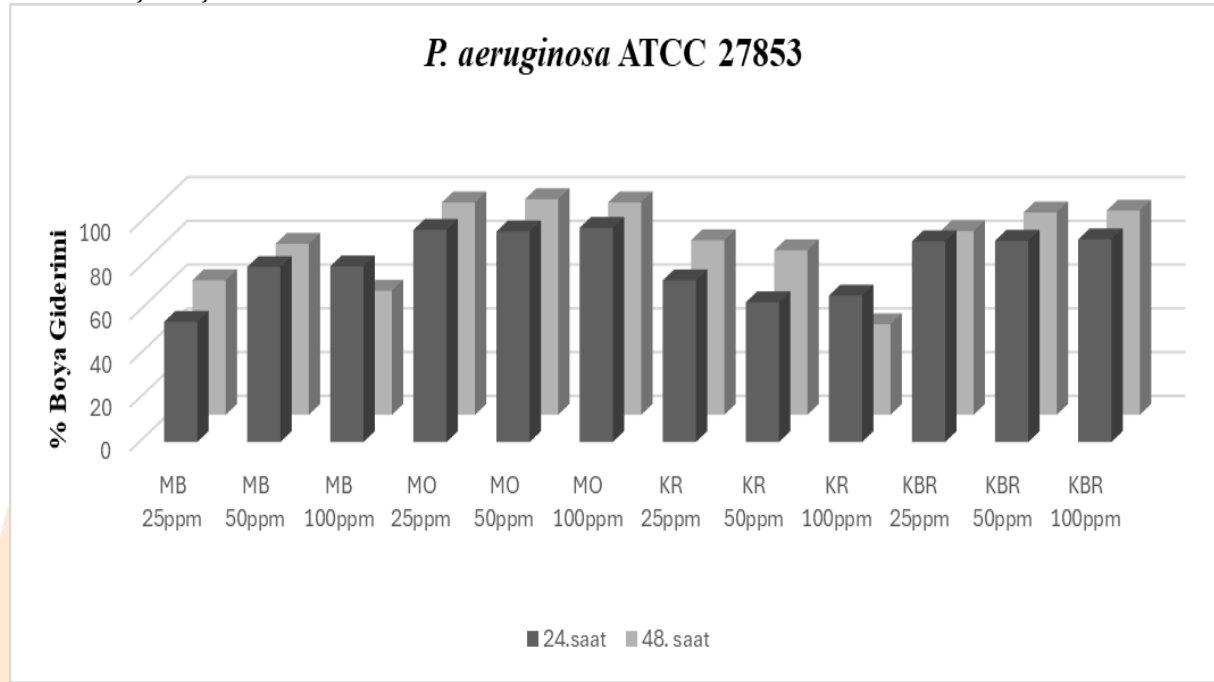
B. cereus ATCC 14579, nötr pH'da Metil Orange boyar maddesinin 25 ppm'lik ve Syonozol Blue KBR boyar maddesinin 50 ppm'lik konsantrasyonlarında en yüksek boya giderim aktivitesi gösterdiği için pH optimizasyonu çalışmalarında kullanılmak üzere bu seriler seçilmiştir.



Şekil 3 – *E. coli* ATCC 8739 boya giderim aktivitesi grafiği (%)

E. coli ATCC 8739, pH 7’de boyalara karşı daha değişken performans sergilemiştir. Metilen Blue’da %88-92, Metil Orange’de %80’e yakın, Kongo Red’de %60-65, Syonozol Blue KBR’de ise %70-75’e ulaşan giderim sağlanmıştır. Özellikle Metilen Blue gideriminde %92’ye ulaşan yüksek değer dikkat çekicidir.

E. coli ATCC 8739, nötr pH’da Metilen Blue boyar maddesinin 100 ppm’lik ve Syonozol Blue KBR boyar maddesinin 50 ppm’lik konsantrasyonlarında en yüksek boya giderim aktivitesini gösterdiği için pH optimizasyon çalışmalarında kullanılmak üzere bu serileri seçilmiştir.



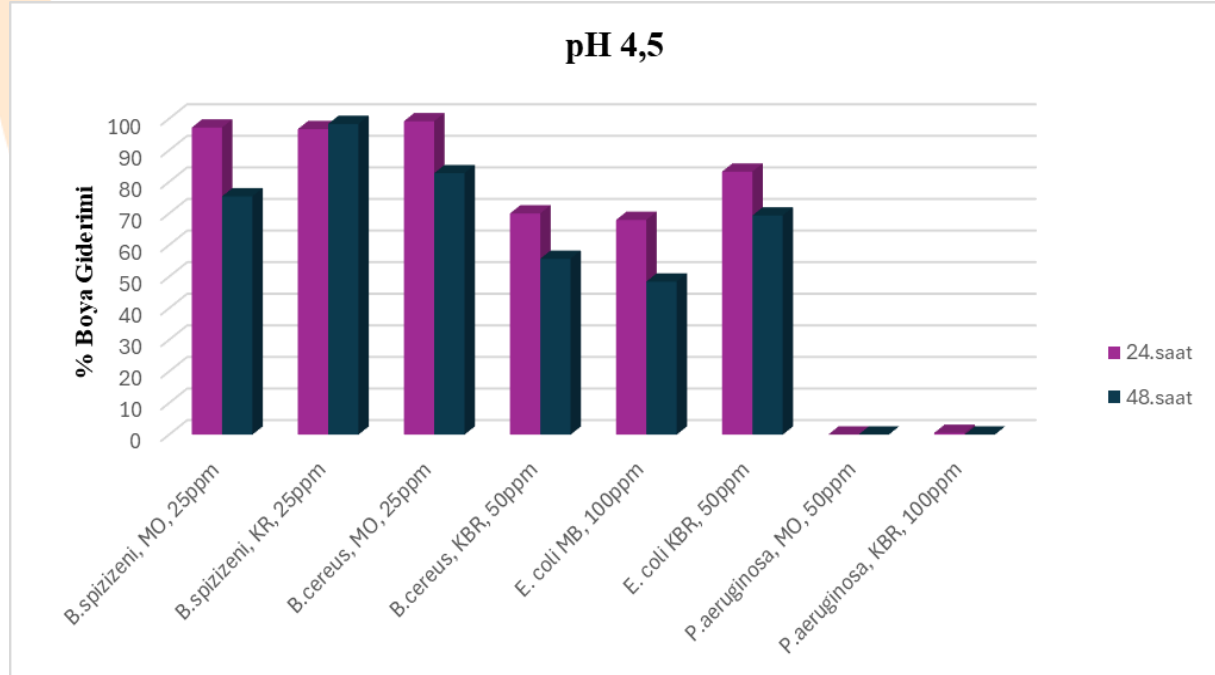
Şekil 4 – *P. aeruginosa* ATCC 27853 boya giderim aktivitesi grafiği (%)

Nötr pH’da *P. aeruginosa* ATCC 27853, diğer bakterilerle karşılaştırıldığında sınırlı etkinlik göstermiştir. Metilen Blue’da %55-60, Metil Orange’de %50’nin altında, Kongo Red’de %30-35, Syonozol Blue KBR’de ise %40-45 civarında giderim sağlanmıştır.

P. aeruginosa ATCC 27853, nötr pH’da Metil Orange boyar maddesinin 50 ppm’lik ve Syonozol Blue KBR boyar maddesinin 100 ppm’lik konsantrasyonlarında en yüksek boya giderim aktivitesini gösterdiğinden pH optimizasyonu çalışmalarında kullanılmak üzere seçilmiştir.

Tablo 3 – Bakterilerin Boya Giderim Aktiviteleri (%)

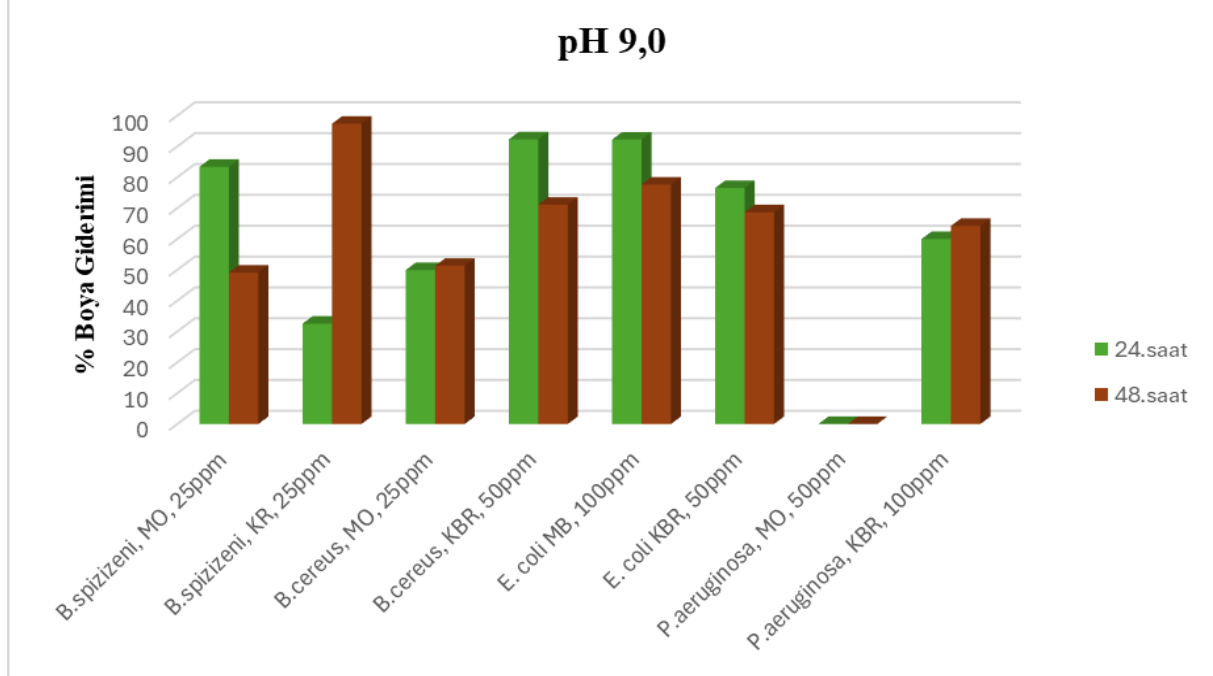
Bakteri türü	Boyar madde	Konsantrasyon	pH	24. saat boya giderimi	48. saat boya giderimi
<i>B. subtilis</i> sp.	Metil Orange	25 ppm	4,5	%97,20	%75,42
			7,0	%87,16	%87,94
			9,0	%83,39	%49,06
<i>B. spizizenii</i> ATCC 6633	Kongo Red	25 ppm	4,5	%96,70	%98,35
			7,0	%91,41	%94,99
			9,0	%32,54	%97,47
<i>B. cereus</i> ATCC 14579	Metil Orange	25 ppm	4,5	%99,21	%82,76
			7,0	%77,37	%93,97
			9,0	%49,93	%51,31
<i>E. coli</i> ATCC 8739	Synozol Blue KBR	50 ppm	4,5	%70,02	%55,66
			7,0	%92,06	%95,01
			9,0	%92,29	%71,10
<i>E. coli</i> ATCC 8739	Metilen Blue	100 ppm	4,5	%67,96	%48,45
			7,0	%91,85	%90,48
			9,0	%92,21	%77,64
<i>P. aeruginosa</i> ATCC 27853	Synozol Blue KBR	50 ppm	4,5	%83,25	%69,36
			7,0	%91,60	%90,47
			9,0	%76,53	%68,65
<i>P. aeruginosa</i> ATCC 27853	Metil Orange	50 ppm	4,5	%0	%0
			7,0	%96,29	%98,58
			9,0	%0	%0
<i>P. aeruginosa</i> ATCC 27853	Synozol Blue KBR	100 ppm	4,5	%0,56	%0
			7,0	%92,66	%93,38
			9,0	%59,97	%64,23



Şekil 5 – Bakterilerin pH 4,5'te boya giderim oranları (%)

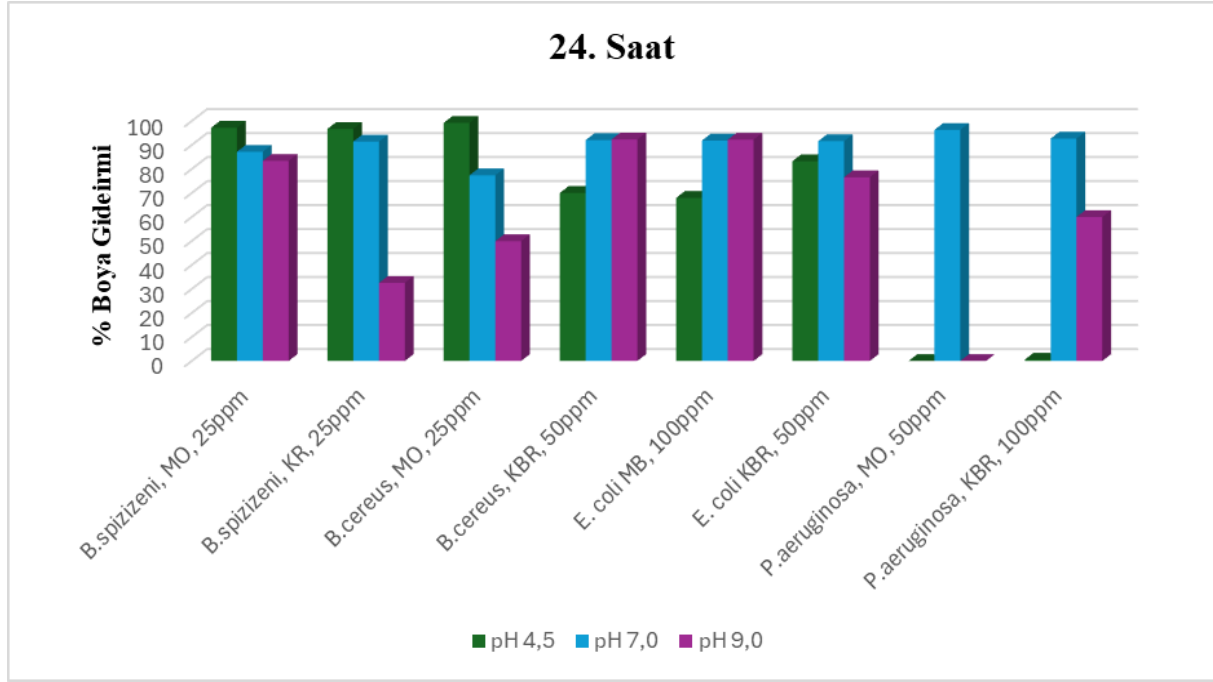
Asidik pH'da *B. subtilis* sp. *spizizenii* ATCC 6633, Kongo Red ve Metil Oranj için %95'in üzerinde boya giderim etkinliği göstermiştir. *B. cereus* ATCC 14579, özellikle Metil

Oranj'da %99'a ulaşan çok yüksek giderim göstermiştir. *E. coli* ATCC 8739, düşük düzeyde etkinlik gösterirken *P. aeruginosa* ATCC 27853 ise hiç etkinlik gösterememiştir.



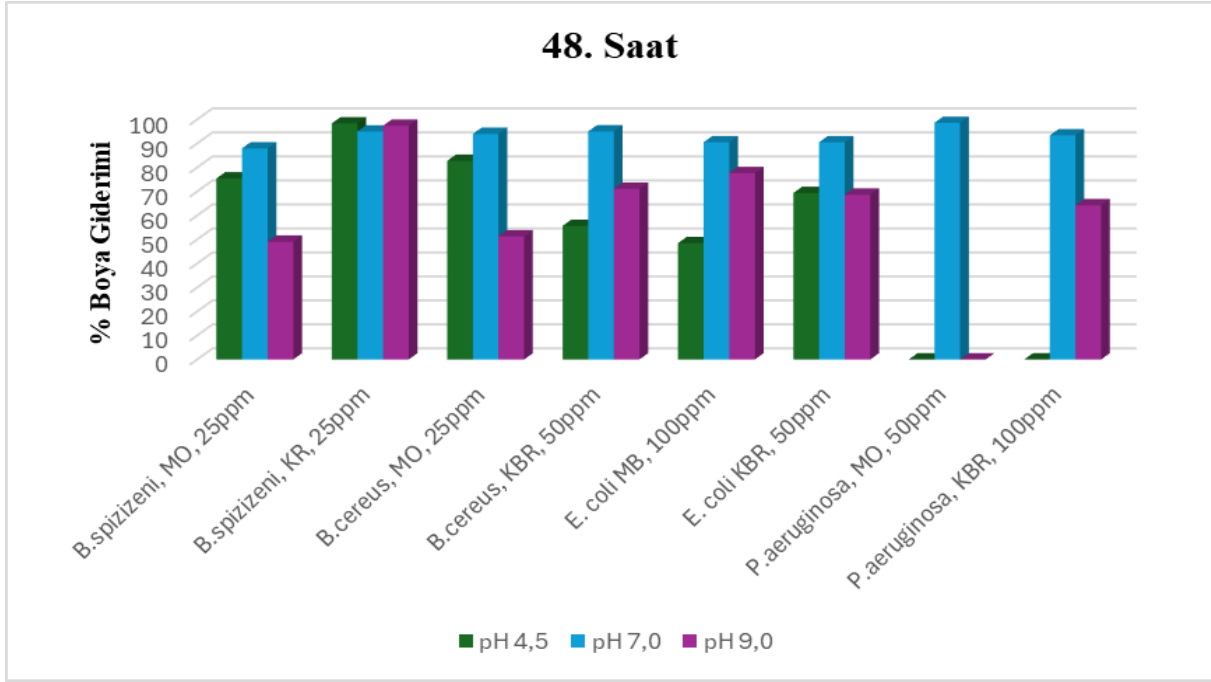
Şekil 6 – Bakterilerin pH 9,0'da boya giderimi oranları (%)

Bazik pH'da *B. subtilis sp. spizizenii* ATCC 6633, özellikle Kongo Red boyasını 48. saatte %97 oranında gidermiştir. *B. cereus* ATCC 14579, özellikle Synozol Blue KBR boyasını 24. saatte %92 oranında giderirken Metil Oranj boyasındaki giderim etkinliği oldukça düşmüştür. *E. coli* ATCC 8739, özellikle Metilen Blue'de %92'ye ulaşarak yüksek performansını sergilemiştir ancak Synozol Blue KBR giderimindeki aktivitesi düşmüştür. *P. aeruginosa* ATCC 27853 ise bazik ortamda yalnızca Synozol Blue KBR gideriminde sınırlı düzeyde (%50 civarı) etkinlik göstermiştir.



Şekil 7 – Bakterilerin pH 4,5; pH 7,0 ve pH 9,0'daki % boya giderim oranları (24. saat)

İlk 24 saatteki boya giderim aktiviteleri asidik ve bazik ortam şartlarında genel olarak düşmüştür. *B. subtilis sp. spizizenii* ATCC 6633 en yüksek boya giderim aktivitelerini asidik ortamda göstermiştir ve Kongro Red boyasının giderimindeki etkinliği bazik ortamda ciddi oranda düşmüştür. *B. cereus* ATCC 14579'un Metil Oranj giderimindeki aktivitesi pH'ın düşmesiyle artarken Synozol Blue KBR giderimindeki aktivitesi düşmüştür. *E. coli* ATCC 8739'un düşük ve yüksek pH'lardaki aktivitesi boyar madde cinsine göre değişkenlik göstermiştir. *P. aeruginosa* ATCC 27853 ise düşük pH'da giderim etkinliği gösterememiş olup bazik pH'da yalnızca Synozol Blue KBR boyasını nötre göre düşen oranda giderebilmiştir.



Şekil 8 – Bakterilerin pH 4,5; pH 7,0 ve pH 9,0'daki % boya giderim oranları (48. saat)

48. saatteki boya giderim aktiviteleri incelendiğinde, *B. subtilis sp. spizizenii* ATCC 6633 Kongo Red giderimi aktivitesinde asidik ve bazik pH'da az da olsa artış olduğu gözlenmiş olup diğer bakterilerin tamamının asidik ve bazik pH'daki giderim etkinliklerinde düşüş olduğu gözlenmiştir.

TARTIŞMA

Bu çalışmada dört farklı bakteri türünün tekstil boyar maddelerinin giderimindeki performansları, pH ve zaman parametreleri dikkate alınarak incelenmiştir. Bulgular, literatürdeki çalışma sonuçlarına paralel olarak, boya giderim etkinliğinin yalnızca mikroorganizma türüne değil, aynı zamanda ortam pH'sına ve inkübasyon süresine de güçlü şekilde bağlı olduğunu göstermektedir (Bera & Tank, 2021: 2).

B. subtilis subsp. spizizenii ATCC 6633, özellikle Kongo Red ve Metil Oranj boyalarında asidik ve nötr koşullarda yüksek giderim sağlamıştır. pH 4,5'te 24. saatte %96,70 olan Kongo Red giderimi 48. saatte %98,35'e ulaşmıştır. Nötr pH'da da benzer şekilde yüksek etkinlik sürdürülmüştür. Bu bulgu, Fareed ve arkadaşları (2022) tarafından raporlanan, *Bacillus* türlerinin nötr ve hafif asidik koşullarda %90'ın üzerinde boya giderim kapasiteleri olduğu bilgileriyle uyumludur. İlginç olarak, bazik pH'da Kongo Red gideriminin 24. saatte düşük kalması (%32,54), ancak 48. saatte %97,47'ye yükselmesi, bu türün bazik ortamda zaman gecikmeli bir adaptasyon gösterebildiğini ve inkübasyon süresiyle aktive olan indirgeyici enzimlerin zamanla devreye girdiğini düşündürülebilir; bu tür dinamikler daha önce bakteriyel dekolorizasyon çalışmalarında bildirilmiştir (Fareed vd., 2022: 6).

B. cereus ATCC 14579, Metil Oranj ve Synozol Blue KBR boyar maddelerinde öne çıkmıştır. Asidik pH'da Metil Oranj için %99,21 gibi çok yüksek bir değer kaydedilmiştir. Ancak bu değer 48. saatte %82,76'ya gerilemiştir. Buna karşın nötr pH'da zamanla artış gösterilmiş, 24. saatte %77,37 olan giderim 48. saatte %93,97'ye yükselmiştir. Bu sonuç, Carrascal-Hernández ve arkadaşlarının (2025)'in çalışmasında bildirilen bulgularla paralellik göstermektedir; araştırmacılar *B. cereus*'un özellikle azo boyalar üzerinde pH'ya bağlı olarak

farklı performans sergilediğini, nötr pH'da ise uzun süreli stabil bir aktivite gösterdiğini vurgulamışlardır (Carrascal-Hernández vd., 2025: 19). Ayrıca Synozol Blue KBR'de pH 7'de 48. saatte %95,01 giderim elde edilmesi, bu türün reaktif boyalar için de etkili bir biyosorban olduğunu kanıtlamaktadır. Boya gideriminin pH 9,0'da belirgin azalma göstermesi, boyar maddelerin iyonizasyonu ve mikroorganizma enzimlerinin pH-bağımlı aktivitesiyle uyumludur (Kishor, 2021: 5).

E. coli ATCC 8739, Metilen Blue ve Synozol Blue KBR boyalarında bazik ve nötr koşullarda başarılı olmuştur. Metilen Blue için nötr pH'da 24. saatte %91,85 giderim gözlenmiş, 48. saatte %90,48 olarak korunmuştur. Benzer şekilde, pH 9'da 24. saatte %92,21 gibi yüksek bir giderim kaydedilmiş, ancak 48. saatte %77,64'e gerilemiştir. Bu durum, *E. coli*'nin özellikle katyonik boyalarda bazik koşullarda hızlı ancak zamana bağlı düşüş gösteren bir aktiviteye sahip olduğunu göstermektedir. Literatürde Alhpa-22 suşunun Methyl Orange gideriminde benzer şekilde pH'ya duyarlı bir performans sergilediği, bazik ortamda ilk 24 saatte yüksek etkinlik gözlenirse de ilerleyen süreçte düşüş yaşandığı rapor edilmiştir (Maier vd., 2004: 842). Bu, *E. coli*'nin belirli koşullarda etkin olduğunu, ancak stabil ve sürekli uygulamalarda performansının türlere göre değişebileceğini işaret eder.

P. aeruginosa ATCC 27853 sonuçları daha değişkendir; asidik koşullarda genelde düşük performans, bazik ortamda Synozol Blue KBR'da makul bir verim (%64) sunmuştur. Nötr pH'da Metil Oranj gideriminde 24. saatte %96,29, 48. saatte %98,58 değerleri elde edilmiştir. Synozol Blue KBR'de de benzer şekilde yüksek giderim gözlenmiş (24. saatte %92,66, 48. saatte %93,38). *Pseudomonas* türlerinin pH'ya karşı yüksek duyarlılık gösterdiğine dair literatürdeki raporlarla uyumludur (Tripathi vd., 2023: 4). Ayrıca, bazı çalışmalar *P. aeruginosa*'nın yalnızca dar bir pH aralığında etkinliğini sürdürebildiğini ve bu nedenle saha uygulamalarında sınırlı bir biyosorban potansiyeline sahip olduğunu vurgulamaktadır (Kishor vd., 2021: 5). Bu çalışma da *P. aeruginosa* ATCC 27853'nin uygun koşullarda etkili olabileceğini, ancak genel olarak *Bacillus* türleri kadar kararlı ve yüksek verimli olmadığını göstermektedir.

Asidik pH'da *B. cereus* ATCC 14579 (%99,21 Metil Oranj) ve *B. subtilis sp. spizizenii* ATCC 6633 (%96,70 Kongo Red) öne çıkmıştır. Ancak bazı boyalarda ve türlerde asidik pH performansı düşürmüştür. Bu, boyar maddenin yapısal stabilitesi ve enzimatik aktivite değişimleriyle açıklanabilir. Literatürde, asidik pH'da bazı azo bağlarının daha kolay parçalandığı, fakat bakterilerin uzun süreli stabil büyüme göstermekte zorlandığı bildirilmiştir (Khan ve Borah, 2024: 10; Kishor vd., 2021: 5).

Nötr pH'da tüm bakteriler içinde en dengeli ve yüksek performans *B. cereus* ATCC 14579 (%95,01 Synozol Blue KBR) ve *P. aeruginosa* ATCC 27853 (%98,58 Metil Oranj) tarafından sağlanmıştır. Tripathi ve arkadaşları (2025) tarafından yürütülen çalışmada *Bacillus* türleriyle gerçekleştirilen dekolorizasyon deneylerinde farklı pH değerleri test edilmiş ve sonuçlar *Bacillus* türlerinin nötr pH koşullarında yüksek dekolorizasyon (%97) kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymuştur (Tripathi vd., 2025: 4).

Bazik pH'da kısa süreli inkübasyonda en yüksek performans *E. coli* ATCC 8739 tarafından kaydedilmiş olup, Metilen Blue'de %92,21 giderim elde edilmiştir. Bununla birlikte, *B. subtilis subsp. spizizenii* ATCC 6633 bazik ortamda 24–48 saat arasında belirgin bir artış olmuş (KR'de %32 → %97), bu da pH'a bağlı enzim aktivasyonunun zamana yayıldığını düşündürmüştür. Literatürde de bazik koşullarda azo redüktaz enzimlerinin farklı aktivite profilleri rapor edilmiştir (Maier vd., 2004: 838; Misal ve Gawai, 2018: 4).

SONUÇ

B. subtilis subsp. *spizizenii* ATCC 6633 suşunda en iyi sonuç: %98,35 giderim oranı ile Kongo Red boyar maddesinde (25 ppm konsantrasyon, pH 4,5, 48. saat) elde edilmiştir. Bu suş, Kongo Red (KR) ve Metil Oranj (MO) boyalarında asidik ve nötr koşullarda yüksek giderim sağlamıştır. Nötr pH'da ise Kongo Red ve Metil Orange'da %95-97 oranında çok yüksek giderim göstermiştir.

B. cereus ATCC 14579 suşunda en iyi sonuç: %99,21 gibi çok yüksek bir giderim oranı ile Metil Oranj boyar maddesinde (25 ppm konsantrasyon, pH 4,5, 24. saat) kaydedilmiştir. Bu sonuç, türün asidik azo boyalara karşı yüksek etkinliğini göstermektedir. Ayrıca, nötr pH'da Synozol Blue KBR boyar maddesinde (100 ppm konsantrasyon, 48. saat) %95,24 giderim elde edilmiştir.

E. coli ATCC 8739 suşunda en iyi sonuç: bazik pH'da kısa süreli inkübasyonda en yüksek performans kaydedilmiş olup, Metilen Blue boyar maddesinde (100 ppm konsantrasyon, pH 9,0, 24. saat) %92,21 giderim elde edilmiştir. Nötr pH'da da Metilen Blue'de %92'ye ulaşan yüksek değer gözlenmiştir (100 ppm, 24. saat: %91,85). Bu tür, Metilen Blue ve Synozol Blue KBR boyalarında bazik ve nötr koşullarda başarılı olmuştur.

P. aeruginosa ATCC 27853 suşunda en iyi sonuç: nötr pH'da Metil Oranj gideriminde (50 ppm konsantrasyon, pH 7,0, 48. saat) %98,58 değeri elde edilmiştir. Bu tür, nötr pH'da Synozol Blue KBR'de de benzer şekilde yüksek giderim gözlemiştir (100 ppm, 48. saat: %93,38). Ancak, *P. aeruginosa* asidik koşullarda genellikle düşük performans, bazik ortamda ise sınırlı etkinlik göstermiştir.

Çalışma sonuçları, özellikle *Bacillus* türlerinin birçok boyada %90'ın üzerinde renk giderimi sağlayarak yüksek oranlarla öne çıktığını göstermektedir. *Bacillus* türlerinin geniş pH toleransı ve güçlü enzimatik kapasitesiyle uyumludur (Fareed vd., 2022: 4; Tripathi vd., 2025: 4).

Asidik pH'da *B. cereus* ATCC 14579 (%99,21 Metil Oranj) ve *B. subtilis* sp. *spizizenii* ATCC 6633 (%96,70 Kongo Red) öne çıkarken, nötr pH'da ise *B. cereus* ATCC 14579 ve *P. aeruginosa* ATCC 27853 en dengeli ve yüksek performansı sağlamıştır. Bazik pH'da ise kısa süreli inkübasyonda *E. coli* ATCC 8739 en yüksek performansı göstermiştir.

Genel olarak, bu bulgular bakteriyel biyosorpsiyonun tekstil atıksularının arıtımında uygulanabilir bir yöntem olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, pH optimizasyonunun kritik bir parametre olduğu açıktır. Literatürde de benzer şekilde *Bacillus* türlerinin çoğunlukla nötr koşullarda, *E. coli*'nin bazik koşullarda, *Pseudomonas* türlerinin ise dar pH aralıklarında etkin oldukları vurgulanmaktadır (Fareed vd., 2022: 4; Khan ve Borah, 2024: 10).

KAYNAKÇA

Abhisek, K., Vhatkar, S. S., Mathew, H. T., Singh, P., & Oraon, R. (2025). A critical review on the challenges and techno-economic assessment of dyes removal technologies from waste water. *Discover Chemistry*, 2(1), 41.

Abubakar, A., Yasid, N. A., Othman, A. R., & Shukor, M. Y. (2023). Biosorption of Azo Dyes by Bacterial Biomass: A review. *Journal of Environmental Microbiology and Toxicology*, 11(1), 38-51.

Akter, F., & Dong, Y. (2024). Investigation of removing orange II azo dye from wastewater through an oxidation process. *Applied Water Science*, 14(11), 243.

Al-Tohamy, R., Ali, S. S., Li, F., Okasha, K. M., Mahmoud, Y. A. G., Elsamahy, T., ... & Sun, J. (2022). A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxicology and environmental safety*, 231, 113160.

Ayed, L., Mahdhi, A., Cheref, A., & Bakhrouf, A. (2011). Decolorization and degradation of azo dye Methyl Red by an isolated *Sphingomonas paucimobilis*: biotoxicity and metabolites characterization. *Desalination*, 274(1-3), 272-277.

Benkhaya, S., M'rabet, S., & El Harfi, A. (2020a). A review on classifications, recent synthesis and applications of textile dyes. *Inorganic Chemistry Communications*, 115, 107891.

Benkhaya, S., M'rabet, S., & El Harfi, A. (2020b). Classifications, properties, recent synthesis and applications of azo dyes. *Heliyon*, 6(1).

Bera, S. P., & Tank, S. K. (2021). Microbial degradation of Procion Red by *Pseudomonas stutzeri*. *Scientific Reports*, 11(1), 3075.

Carrascal-Hernández, D. C., Orozco-Beltrán, E. J., Insuasty, D., Márquez, E., & Grande-Tovar, C. D. (2025). Systematic Evaluation of Biodegradation of Azo Dyes by Microorganisms: Efficient Species, Physicochemical Factors, and Enzymatic Systems. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(16), 7973.

Chaturvedi, S. (2019). Azo dyes decolorization using white rot fungi. *Res. Rev. J. Microbiol. Biotechnol*, 8, 9-19.

Daniel-González, G. L., Nava-Galicia, S. B., Arroyo-Becerra, A., Villalobos-López, M. A., Díaz-Godínez, G., & Bibbins-Martínez, M. D. (2025). Characterization of the Enzymatic and Biosorption Processes Involved in the Decolorization of Remazol Brilliant Blue R Dye by *Pleurotus ostreatus* Pellets. *Journal of Fungi*, 11(8), 572.

Dutta, S., Gupta, B., Srivastava, S. K., & Gupta, A. K. (2021). Recent advances on the removal of dyes from wastewater using various adsorbents: A critical review. *Materials Advances*, 2(14), 4497-4531.

El Bakraoui, H., Slaoui, M., Mabrouki, J., Hmouni, D., & Laroche, C. (2022). Recent trends on domestic, agricultural and industrial wastewaters treatment using microalgae biorefinery system. *Applied Sciences*, 13(1), 68.

Fareed, A., Zaffar, H., Bilal, M., Hussain, J., Jackson, C., & Naqvi, T. A. (2022). Decolorization of azo dyes by a novel aerobic bacterial strain *Bacillus cereus* strain ROC. *PloS one*, 17(6), e0269559.

Fouda-Mbanga, B. G., Onotu, O. P., & Tywabi-Ngeva, Z. (2024). Advantages of the reuse of spent adsorbents and potential applications in environmental remediation: A review. *Green Analytical Chemistry*, 11, 100156.

Ganaie, R. J., Rafiq, S., & Sharma, A. (2023, February). Recent advances in physico-chemical methods for removal of dye from wastewater. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1110, No. 1, p. 012040). IOP Publishing.

Garajehdaghi, M., & Seyyedi, K. (2019). Removing of the Dye Pollutant Acid Red 1 from Contaminated Waters by Electrocoagulation Method Using a Recirculating Tubular Reactor with Punched Anode. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, 41(1), 191-191.

Gómez, C. A., Gómez-García, M. Á., & Dobrosz-Gómez, I. (2023). Analysis of the capacity of the Fenton process for the treatment of polluted wastewater from the leather dyeing industry. *The Scientific World Journal*, 2023(1), 4724606.

Gupta, V. K. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal—a review. *Journal of environmental management*, 90(8), 2313-2342.

Hammad, W. A., Darweesh, M. A., Zouli, N., Osman, S. M., Eweida, B., & Amr, M. H. A. (2024). Adsorption of cationic dye onto Raphanus seeds: optimization, adsorption kinetics, thermodynamic studies. *Scientific reports*, 14(1), 17827. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66761-z>

Kadhium, S. S., Al-Lamei, A. J., & Majed, N. (2021). Removal of E102 dye from aqueous solution by adsorption on the surface of polyaniline walnut husks nanocomposite. *Egyptian Journal of Chemistry*, 64(9), 4783-4790.

Katheresan, V., Kansedo, J., & Lau, S. Y. (2018). Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. *Journal of environmental chemical engineering*, 6(4), 4676-4697.

Khan, S., & Borah, D. (2024). Microbial cell factories in the degradation of azo-dye and their limiting factors: An insight. *Cleaner Water*, 2, 100034.

Kishor, R., Saratale, G. D., Saratale, R. G., Ferreira, L. F. R., Bilal, M., Iqbal, H. M., & Bharagava, R. N. (2021). Efficient degradation and detoxification of methylene blue dye by a newly isolated ligninolytic enzyme producing bacterium *Bacillus albus* MW407057. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 206, 111947.

Kumari, H., Sonia, Suman, Ranga, R., Chahal, S., Devi, S., Sharma, S., Kumar, S., Kumar, P., Kumar, S., Kumar, A., & Parmar, R. (2023). A Review on Photocatalysis Used For Wastewater Treatment: Dye Degradation. *Water, a Aragaw ir, and soil pollution*, 234(6), 349.

Lim, A. L., & Bai, R. (2003). Membrane fouling and cleaning in microfiltration of activated sludge wastewater. *Journal of membrane science*, 216(1-2), 279-290.

Maier, J., Kandelbauer, A., Erlacher, A., Cavaco-Paulo, A., & Gübitz, G. M. (2004). A new alkali-thermostable azoreductase from *Bacillus* sp. strain SF. *Applied and environmental microbiology*, 70(2), 837-844.

Misal, S. A., & Gawai, K. R. (2018). Azoreductase: a key player of xenobiotic metabolism. *Bioresources and Bioprocessing*, 5(1), 1-9.

Ngo, A. C. R., & Tischler, D. (2022). Microbial degradation of azo dyes: approaches and prospects for a hazard-free conversion by microorganisms. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(8), 4740.

Rápó, E., & Tonk, S. (2021). Factors affecting synthetic dye adsorption; desorption studies: a review of results from the last five years (2017–2021). *Molecules*, 26(17), 5419.

Samarghandi, M. R., Dargahi, A., Shabanloo, A., Nasab, H. Z., Vaziri, Y., & Ansari, A. (2020). Electrochemical degradation of methylene blue dye using a graphite doped PbO₂ anode: optimization of operational parameters, degradation pathway and improving the biodegradability of textile wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(8), 6847-6864.

Sharma, A., Ahmad, J., & Flora, S. J. S. (2018). Application of advanced oxidation processes and toxicity assessment of transformation products. *Environmental research*, 167, 223-233.

Sousa, M. R. D., Oliveira, C. J. S. D., Lopes, A. C., Rodríguez, E. R., Holanda, G. B. M., Landim, P. G. D. C., ... & Dos Santos, A. B. (2016). Technical, economical, and microbiological aspects of the microaerobic process on H₂S removal for low sulfate concentration wastewaters. *Applied biochemistry and biotechnology*, 180(7), 1386-1400.

Su, X., Li, X., Ma, L., & Fan, J. (2019). Formation and transformation of schwertmannite in the classic Fenton process. *Journal of environmental sciences (China)*, 82, 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.03.004>

Takdastan, A., Rahmani, A. R., & Almasi, H. (2019). A review of the effects of ozonation process on biological sludge reduction. *Desalination and Water Treatment*, 162, 125-133.

Tolkou, A. K., Giannoulaki, A., Chalkidi, P., Arvaniti, E., Fykari, S., Kritaki, S., & Kyzas, G. Z. (2025). Removal of Anionic and Cationic Dyes from Wastewater by Tetravalent Tin-Based Novel Coagulants. *Processes*, 13(7), 2103.

Tran, H. V., Doan, H. A., Chandler, B. D., & Grabow, L. C. (2016). Water-assisted oxygen activation during selective oxidation reactions. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 13, 100-108.

Tripathi, M., Pathak, N., Yadav, G., Pathak, S., Singh, P., Singh, P. K., & Garg, D. (2025). Effective decolorization of Direct blue-1 dye by *Bacillus cereus* isolate for its possible application in environmental sustainability. *Sustainable Processes Connect*, 1(1), 1-10.

Tripathi, M., Singh, P., Singh, R., Bala, S., Pathak, N., Singh, S., ... & Singh, P. K. (2023). Microbial biosorbent for remediation of dyes and heavy metals pollution: a green strategy for sustainable environment. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1168954.

Von Gunten, U. (2003). Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation. *Water research*, 37(7), 1443-1467

Wang, X., Jiang, J., & Gao, W. (2022). Reviewing textile wastewater produced by industries: characteristics, environmental impacts, and treatment strategies. *Water Science and Technology*, 85(7), 2076-2096.

Won, S. W., Choi, S. B., & Yun, Y. S. (2006). Performance and mechanism in binding of Reactive Orange 16 to various types of sludge. *Biochemical Engineering Journal*, 28(2), 208-214.

Kalıp Çeliklerinde Talaşlı İmalat Analizi

Yalçın Şafak ŞEN¹
Hasan DEMİRTAŞ²

ABSTRACT

The machinability of tool steels is a critical parameter in the machining industry, directly influencing production efficiency, surface quality, and tool life. In the literature, various die steels and alloys (such as Toolox 44, DIN 1.2344 – AISI H13, DIN 1.2311 – P20, DIN 1.2312, DIN 1.2738, AISI 304 stainless steel, AA2219-T851 and AA7475-T7351 aluminum alloys) have been examined under different machining conditions. These studies highlight that cutting speed, feed rate, depth of cut, tool coatings, and cooling strategies play a decisive role in machinability performance.

Experimental findings generally indicate that low feed rates combined with medium cutting speeds provide better surface quality. While higher cutting speeds improve surface finish up to a certain level, excessive values accelerate tool wear and reduce productivity. The type of tool coating is also crucial: TiAlN and AlCrN coated carbide tools have been shown to extend tool life in hard steels, whereas ZrN-coated tools enhance surface finish particularly in aluminum alloys. Additionally, CBN and ceramic inserts offer advantages when machining hardened steels such as H13 at high speeds.

Furthermore, studies comparing dry and emulsion-assisted machining report different outcomes in terms of chip morphology, surface integrity, and dimensional stability. In dry machining, chips carry a significant portion of the heat away from the cutting zone, helping preserve the machined surface, while emulsion cooling tends to reduce surface waviness. Measurement methods often include surface roughness parameters (Ra, Rz), material removal rate (MRR), cutting forces, and tool wear.

This review systematically summarizes findings from various studies, providing a comprehensive literature base for material selection and machining parameter optimization in die and mold manufacturing.

Keywords: Tool Steels, Machinability, Machining, Mold Manufacturing, Cutting Tool.

¹ Arge Mühendisi, Poelsan Plastik San.ve Tic.AŞ, Makine Mühendisi, Orcid: 0009-0002-0679-6524 , yalcinsafaksen@poelsan.com ,(544) 621 44 55

² Dr.Öğr.Üyesi, Samsun Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-6067-9674, hasan.demirtas@samsun.edu.tr , (543) 367 29 84

GİRİŞ

Kalıp imalatı, modern üretim endüstrisinin en kritik alanlarından biridir. Özellikle plastik enjeksiyon kalıpları, yüksek adetli ve hassas parçaların üretiminde temel rol oynamaktadır. Bu kalıplarda kullanılan takım çelikleri; mekanik özellikleri, aşınma dirençleri ve işlenebilirlik performansları ile üretim verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Yüksek sertlik ve tokluk gibi özellikler, kalıp ömrünü uzatırken; işlenebilirliğin düşük olması, üretim sürelerini uzatmakta ve maliyetleri artırabilmektedir. Bu nedenle kalıp çeliklerinin talaşlı imalat performansını anlamaya yönelik araştırmalar, son yıllarda önemli bir literatür birikimi oluşturmuştur. Geleneksel olarak 1.2344 gibi sıcak iş takım çelikleri, kalıp imalatında uzun yıllardır standart olarak kullanılmaktadır. 1.2344 çeliği, yüksek sıcaklık dayanımı ve termal yorulma direnci ile öne çıkmakta; ancak sertleştirilmiş halde işlenmesi oldukça güçtür. Bu nedenle, çoğu durumda tavlı halde işlenip daha sonra ısıl işleme tabi tutulması tercih edilmektedir. Buna karşın, ön sertleştirilmiş çelikler (örneğin 1.2311, 1.2312, 1.2738, Toolox 44) ek ısıl işlem gerektirmeden doğrudan kullanılabilirliği sayesinde endüstride giderek daha fazla ilgi görmektedir.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, bu malzemelerin farklı kesici takımlar, kaplamalar ve işleme parametreleri altında performanslarını kıyaslamıştır. Örneğin, Toolox 44 üzerine yürütülen araştırmalar; yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü ve talaş morfolojisi gibi kriterler açısından bu çeliğin H13'e alternatif olabileceğini göstermektedir. Benzer şekilde, 1.2344 üzerine yapılan yüksek hızlı frezeleme ve sert tornalama çalışmaları, kesme hızı ve takım kaplamalarının kritik önemini vurgulamaktadır. Ayrıca, 1.2311, 1.2738 ve D2 gibi kalıp çelikleri üzerine yürütülen Taguchi tabanlı optimizasyon çalışmaları, yüzey kalitesi ve malzeme kaldırma oranı (MİH) açısından uygun parametrelerin belirlenmesine katkı sağlamıştır. Bunun yanında, paslanmaz çelikler (AISI 304) ve alüminyum alaşımları (AA7475, AA2219) üzerinde yapılan deneyler, kaplama malzemelerinin ve soğutma koşullarının işlenebilirlik üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur.

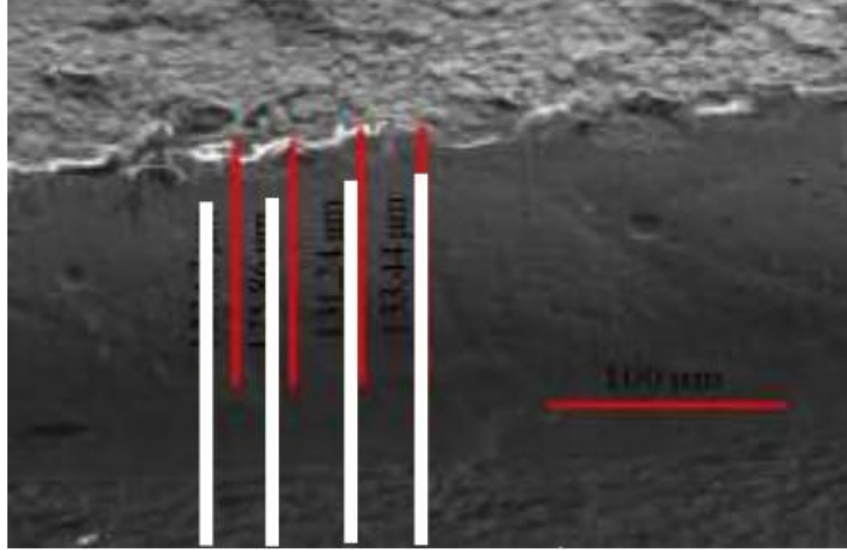
Bu derleme çalışması, literatürdeki farklı çelik türlerini ve işleme stratejilerini karşılaştırmalı olarak ele alarak; yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, talaş morfolojisi ve malzeme kaldırma oranı gibi temel kriterler çerçevesinde bulguları gruplandırmayı amaçlamaktadır. Böylece hem kalıp imalatında malzeme seçimine ışık tutulacak hem de talaşlı imalat araştırmalarına yön verecek güncel bir bakış açısı sunulacaktır.

LİTERATÜR BİLGİSİ

(Binali vd., 2018: 19-28) Toolox 44 çeliğinin kuru frezeleme koşullarındaki işlenebilirliğini incelemiştir. Çalışmalarında CNC yüzey frezeleme yöntemi kullanılmış; 150–240 m/dak kesme hızları, 0,4–1,6 mm/diş ilerleme değerleri ve 0,2–0,4 mm talaş derinlikleri uygulanmıştır. TiAlN kaplamalı karbür frezeler ile yürütülen deneylerde yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti ve takım aşınması ölçülmüştür. Bulgulara göre en düşük yüzey pürüzlülüğü orta hız (180 m/dak) ve düşük ilerleme (0,4 mm/diş) parametrelerinde elde edilmiş; ilerleme arttıkça hem yüzey kalitesi hem de kuvvetler olumsuz etkilenmiştir.

Şekil 1 de Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri üzerinden kesici takımların yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin boyutları belirlenmiş ve ölçülmüştür. Beyaz çizgiler, SEM analiziyle kesici uç üzerinde oluşan yanak aşınmalarının uzunluğunu göstermek amacıyla eklenmiştir. Çizgilerin kısa olması, takımın henüz başlangıç düzeyinde aşınma olduğunu; çizgilerin uzaması ise aşınmanın ilerlediğini ve takım ömrünün azaldığını göstermektedir. Bu

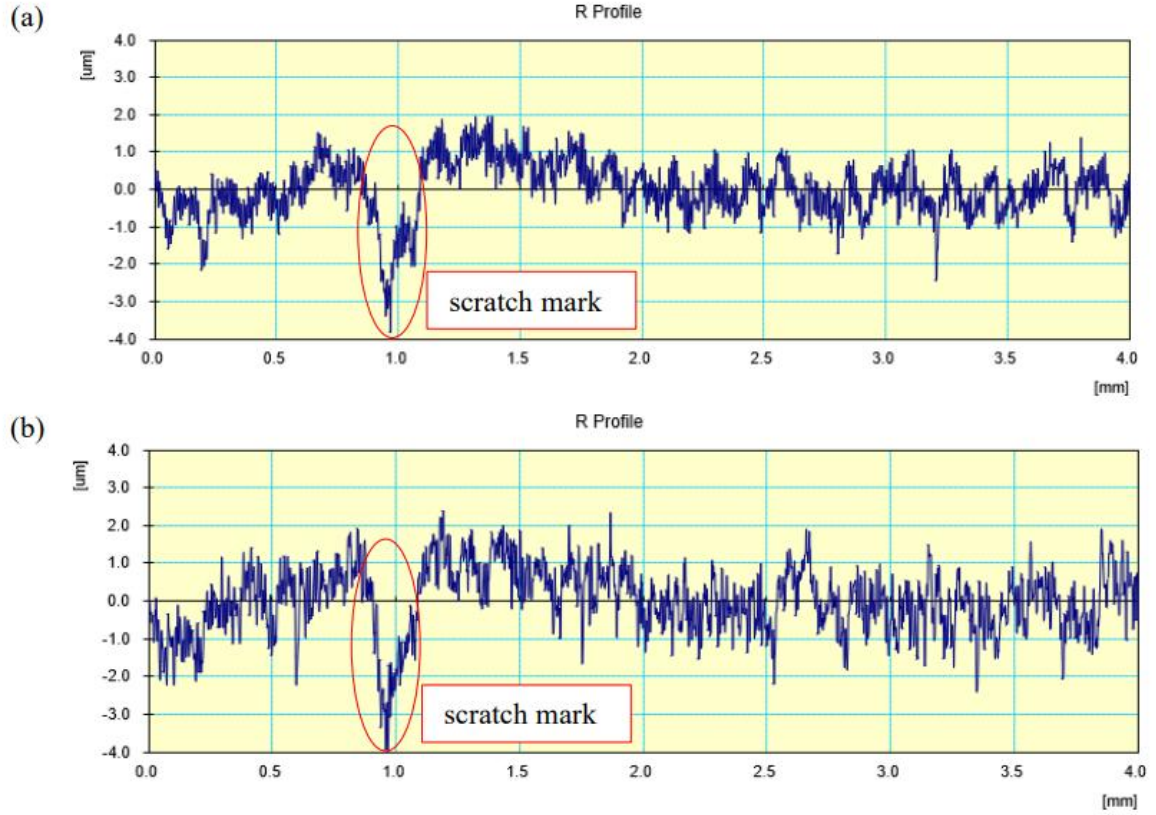
ölçüm yöntemiyle, farklı kesme parametrelerinde takım aşınmasının boyutu karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 1. Kesici Takımda Meydana Gelen Yüzey Aşınmasının Tayini (Binali vd., 2018)

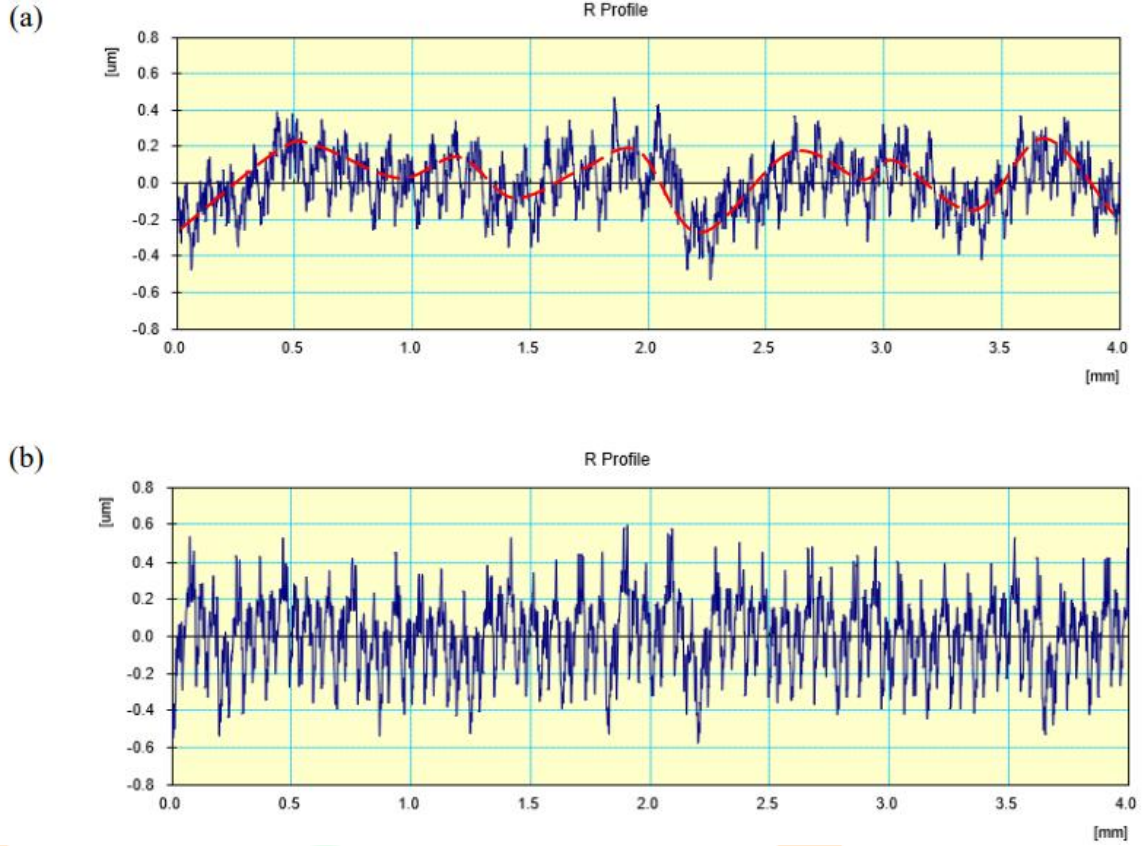
(Bayraktar vd., 2021: 1939-1947) Ön sertleştirilmiş Toolox 44 ve Nimax çeliklerini kuru koşullarda oyuk frezeleme yöntemiyle karşılaştırmışlardır. Deneylerde 50–90 m/dak kesme hızları, 0,04–0,12 mm/diş ilerleme değerleri ve 1,5 mm talaş derinliği uygulanmış; AlCrN kaplamalı karbür frezeler kullanılmıştır. Sonuçlarda Toolox 44’ün daha yüksek kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü değerleri ürettiği, Nimax çeliğinde ise yüksek hızlarda daha iyi yüzey kalitesi elde edildiği rapor edilmiştir. Toolox 44’te ilerleme izleri ve ısıdan etkilenmiş tabakanın daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. **(Ribeiro vd., 2021: Cobem2021-0118)** Toolox 44’ün yüzey frezelemesinde kuru ve emülsiyonlu koşulları Box-Behnken deney tasarımıyla analiz etmişlerdir. 60–90 m/dak kesme hızları, 0,05–0,15 mm/diş ilerleme değerleri ve 0,4–0,8 mm talaş derinlikleri uygulanmış; Ø12 mm karbür uçlar kullanılmıştır. Çalışmada yüzey pürüzlülüğü (Ra, Rz) ölçülmüş; bazı parametrelerde kuru kesimde daha düşük Ra elde edilirken, emülsiyonlu koşullarda dalgalanmanın azaldığı ancak pürüzlülük değerlerinin arttığı görülmüştür. Ayrıca talaşların mavimsi renk aldığı, ısının büyük oranda talaşla uzaklaştırıldığı rapor edilmiştir.

Şekil 2 deki profiller incelendiğinde, özellikle işleme sırasında takım ucunun yüzeyde bıraktığı çizik izleri belirgin olarak gözlenmektedir. Bu çizgiler, yüzey profilinde ani iniş-çıkışlar oluşturarak pürüzlülüğü olumsuz etkilemektedir. Kuru kesimde bu çiziklerin daha yoğun ve derin olduğu görülürken, sıvı soğutmalı kesimde çizik izleri daha sınırlı kalmıştır.



Şekil 2. a) Kuru Kesim , b) Sulu Kesim (Ribeiro vd. 2021)

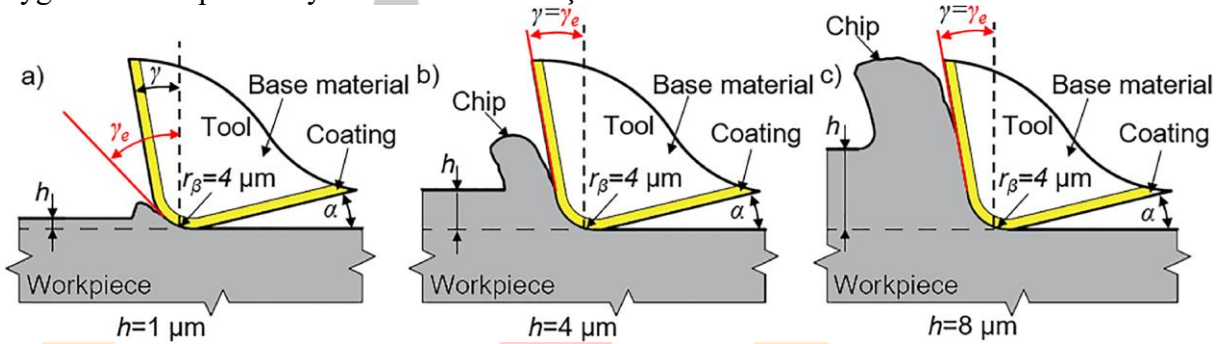
Şekil 3 te farklı parametre kombinasyonları için elde edilen profiller sunulmuştur. Burada sıvı soğutmalı koşullarda profilin genliklerinin daha düşük olduğu ve yüzeyin daha kararlı bir yapı sergilediği anlaşılmaktadır. Buna karşın kuru kesimde yüzey bozuklukları daha belirgin hale gelmiştir..Bu bulgular, soğutma sıvısının yüzey dalgalanmalarını kısmen azaltarak.İşlenmiş yüzeyin homojenliğini artırdığını göstermektedir.



Şekil 3. a) Kuru Kesim , b) Sulu Kesim (Ribeiro vd., 2021)

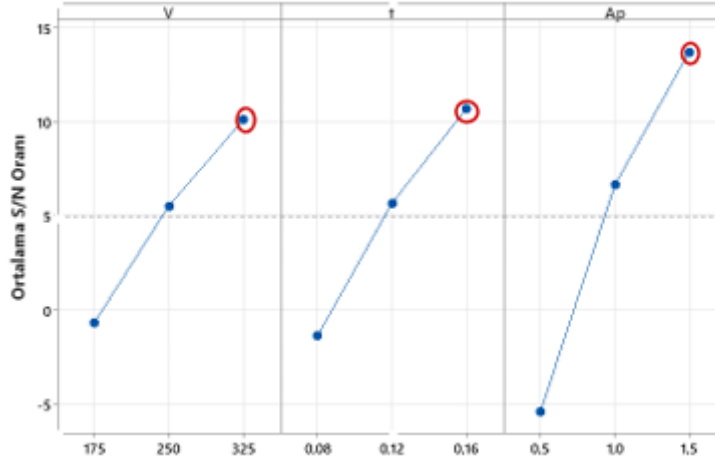
(Daniyan vd., 2019: 861-867) 1.2311 kalıp çeliğinin CNC frezeleme deneylerinde Ø16 mm Sandvik R390 serisi karbür uçlar kullanarak farklı kesme hızları (256–278 m/dak) ve ilerleme değerlerinin (510–2489 mm/dak) malzeme kaldırma oranı (MİH) üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, kuru işleme koşullarında yürütülen deneysel sonuçlar, yanıt yüzeyi metodu (RSM) ile doğrulanmış ve maksimum MİH'in ve 275 m/dak, fr 2200 mm/dak kombinasyonunda elde edildiği rapor edilmiştir. Ayrıca, artan kesme hızının ve ilerlemenin MİH'i yükselttiği, ancak takım ömrü üzerinde olumsuz etkiler yarattığı vurgulanmıştır. (Riza vd., 2016: 27-34) Sertleştirilmiş 1.2344 (48 HRC) çeliğinin yüksek hızlı alın frezeleme koşullarında kesme sıcaklığı davranışlarını incelemişlerdir. Deneyler CNC dik işleme merkezi üzerinde PVD kaplı karbür uç kullanılarak kuru şartlarda yürütülmüş, kesme hızları 150, 200 ve 250 m/min, ilerleme değerleri 0,05, 0,10 ve 0,15 mm/diş, ve talaş derinlikleri 0,1, 0,15 ve 0,2 mm olarak belirlenmiştir. Deney düzeneğinde contour-in takım yolu stratejisi kullanılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki, kesme hızı arttıkça sıcaklık önce yükselmekte, ancak çok yüksek hızda (250 m/min) Salomon hipoteziyle uyumlu biçimde sıcaklık düşüşü gözlenmektedir; ayrıca, ilerleme hızı düşükken kesme sıcaklığı daha düşük kalmakta ve ceplerin köşe bölgelerinde sıcaklık ani artış-azalış davranışları dikkat çekmektedir. Bu çalışma, yüksek hızlı frezelemede sıcaklık davranışını, takım yolu etkisini ve işlem parametrelerinin termal etkilerini net biçimde göstermesi açısından önemlidir. (Balázs vd., 2020: 5051-5065) Sertleştirilmiş sıcak iş takım çeliği (1.2344, 50 HRC) üzerinde mikro frezeleme işlemini sistematik deneylerle incelemişlerdir. Çalışmada 5 eksenli bir mikro işleme merkezinde 500 µm çapında kaplamalı karbür kesici uçlar kullanılmış ve maksimum 60.000 dev/dak iş mili hızıyla farklı kesme parametrelerinin diş başına ilerleme, talaş derinliği, frezeleme stratejisi kesme kuvvetleri,

titreşimler, yüzey pürüzlülüğü ve çapak oluşumu üzerindeki etkileri analizlerde ANOVA ve FFT yöntemleri kullanılmıştır. Bulgulara göre talaş derinliği arttıkça kuvvetlerin ve titreşimlerin arttığı, düşük talaş derinliğinde ise köşe yarıçapı etkisiyle kuvvetlerin daha az değiştiği görülmüş, ayrıca yukarı frezeleme stratejisinin aşağı frezelemeye göre daha düşük kuvvetler ve titreşimler ürettiği rapor edilmiştir. Çapak oluşumunun talaş derinliği ve ilerleme oranı ile ilişkili olduğu, özellikle köşe yarıçapına eşit talaş derinliklerinde çapak miktarının arttığı belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü sonuçları ise esasen dış başına ilerlemeden etkilenmiş, optimum parametreler v_c 90 m/dak, f_z 8.33 μm ve a_p 77 μm olarak bulunmuştur. Çalışma, mikro frezeleme sürecinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamış ve endüstride doğrudan uygulanabilir optimizasyon önerileri sunmuştur.



Şekil 4 Dış başına ilerleme değerine bağlı olarak talaş ayrılması ve takım geometrisinin şematik gösterimi. (Balázs vd., 2020)

Şekil 4 te a görselinde talaş kalınlığı çok düşük olduğu için talaş tam olarak ayrılmıyor. Bu durumda malzeme kesilmek yerine daha çok yüzeyden kazınır gibi alınıyor ve yüzeyde plastik deformasyon ile sürtünme etkisi baskın oluyor. Şekil 4 te b görselinde talaş ayrılması düzenli hale geliyor ve talaşlar daha stabil, sürekli bir form alıyor. Bu noktada kesme mekanizması dengeli çalışıyor. Şekil 4 te c görselinde talaş kalınlaştığı için talaş ayrılması kolaylaşıyor fakat kuvvetler ve titreşimler artıyor. Talaş kırılması daha keskin, yüzey kalitesi daha düşük oluyor. (Fedai, 2022: 741-747) AISI 4140 çeliğinin CNC dik işlem merkezinde frezelenmesi sırasında kesme hızı (v_c 225–325 m/dak), ilerleme (f 0,08–0,16 mm/dev) ve kesme derinliği (a_p 0,5–1,5 mm) parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü (R_a , R_z , R_q), talaş kaldırma oranı ve işleme süresi üzerindeki etkilerini incelemiş, deneyleri Taguchi L9 ortogonal tasarımına göre gerçekleştirmiş ve DEAR yöntemiyle çok yanıtlı optimizasyon yapmıştır. DEAR tekniği, farklı performans çıktılarının normalize edilerek tek bir performans indeksinde birleştirilmesini sağlamakta ve parametrelerin genel etkiye göre sıralanmasına imkân tanımaktadır. Bu yöntem sonucunda en yüksek etkiye sahip parametrenin kesme derinliği olduğu belirlenmiş; optimum koşulların v_c 325 m/dak, f 0,16 mm/dev ve a_p 1,5 mm kombinasyonu olduğu, bu şartlarda R_a 0,51 μm , R_z 2,3 μm , R_q 0,90 μm ve işleme süresi 4,11 dk elde edildiği rapor edilmiştir.



Şekil 5. Kesme parametrelerinin MRPI değerleri üzerindeki etkilerini gösteren S/N oranı grafiği (Fedai,2022)

Şekil 5 incelendiğinde, kesme derinliğinin MRPI üzerinde en belirleyici parametre olduğu, ilerleme miktarının ikinci, kesme hızının ise üçüncü sırada geldiği görülmektedir. Ayrıca üçüncü seviye değerlerinin, diğer seviyelere kıyasla daha yüksek MRPI sonuçları verdiği anlaşılmaktadır. Bu durum, optimum kesme koşullarının yüksek kesme derinliği, orta ilerleme ve yüksek hız kombinasyonlarında elde edilebileceğini ortaya koymaktadır. Maviler farklı parametre seviyelerinde (kesme hızı V, ilerleme f, talaş derinliği ap) elde edilen ortalama S/N oranlarını gösteriyor. Kırmızı daire içine alınan noktalar, her parametrede optimum seviyeyi (en yüksek S/N oranını veren değerleri) temsil ediyor. Örneğin: Kesme hızında (V) en iyi sonuç 325 m/dak, İlerleme miktarında 0,16 mm/dev, Talaş derinliğinde 1,5 mm seçilmiştir. (Silva, 2025:256) AISI 1045 çeliğinde helisel frezeleme yöntemiyle delik kalitesini incelemişlerdir. Çalışmada 23 tam faktöriyel tasarım uygulanmış ve 5–8 mm çaplarında AlCrNi kaplamalı karbür takımlar, emülsiyon soğutma altında kullanılmıştır. Deneylerde kesme hızı (Vc), eksenel talaş derinliği (ap) ve takım çapı (Dt) değiştirilmiş; yüzey pürüzlülüğü (Ra), çap doğruluğu ve çapak oluşumu ölçülmüştür. Bulgulara göre kesme hızının artışı Ra değerini %30–40 oranında iyileştirirken, talaş derinliği arttıkça Ra değerlerinin %50 yükseldiği; çap doğruluğunda en kritik parametrenin takım çapı olduğu ve çap büyüdükçe geometrik hataların azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca düşük hız ve düşük talaş derinliklerinde çapak oluşumunun daha kontrollü olduğu, helisel frezelemenin AISI 1045 çeliğinde IT7 tolerans seviyesinde yüzey kalitesi sağladığı rapor edilmiştir. (Hegde vd., 2022: 358-364) Ferrit–Beynit çift fazlı çeliğin işlenebilirlik performansını, takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu üzerinden incelemişlerdir. Çalışmada AISI 1040 düşük alaşımlı çelik numuneleri farklı sıcaklıklarda (750 °C, 770 °C, 790 °C) ısıtılma tabi tutulmuş, ardından CNC torna tezgâhında ISO 3685 standardına uygun şekilde WK20CT sınıfı kaplamasız karbür uç (VNMG12T304) ile kuru koşullarda işlenmiştir. Deneyler, 80–150 m/dak kesme hızları, 0.13–0.18 mm/diş ilerleme değerleri ve 0.2–0.6 mm talaş derinlikleri aralığında yürütülmüş ve 27 deney koşulundan oluşan Taguchi L27 ortogonal tasarımı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde takım ömrü (VB 0.3 mm'ye ulaşma süresi) ve yüzey pürüzlülüğü (Ra) dikkate alınmış, ayrıca mikro yapı ve sertlik değişimleri de incelenmiştir. Bulgular, en uzun takım ömrünün ve en düşük Ra değerlerinin 750 °C'de işlem gören numunelerde elde edildiğini, artan sıcaklığın bainit fazını artırarak sertliği yükselttiğini ve buna bağlı olarak takım ömrünü kısalttığını göstermiştir. ANOVA analizine göre, takım ömründe en etkili parametrenin talaş derinliği (%47.95), yüzey pürüzlülüğünde ise

kesme hızının (%54.29) olduğu rapor edilmiştir. Sonuç olarak, ferrit–beynit çift fazlı çeliğin en uygun işlenebilirlik koşullarının düşük sıcaklıkta (750 °C) ısıtılma işlemi, düşük kesme hızı ve orta ilerleme değerlerinde sağlandığı belirtilmiştir. (Gençalp İrizalp vd., 2024: 85-95) AA7475-T7351 ve AA2219-T851 alüminyum alaşımlarının CNC frezeleme işleminde kesme parametreleri ve kesici takım kaplamalarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneylerde Ø16 mm WC uçlu APKT 1604 PDR tipi takımlar kullanılmış, bunların hem kaplamasız WC hem de ZrN kaplamalı WC versiyonları denenmiştir. Çalışmada parametreler olarak kesme hızı 500–700 m/dak, ilerleme 0.10–0.15 mm/diş ve talaş derinliği 1–8 mm değerleri kullanılmıştır. Sonuçlarda, kesme hızının artırılmasının yüzey pürüzlülüğünü düşürdüğü, ilerleme değerindeki küçük bir azalmanın yüzey kalitesini önemli ölçüde iyileştirdiği, ayrıca ZrN kaplamalı uçların özellikle işlenmesi zor olan AA2219-T851 alaşımında daha iyi yüzey kalitesi sağladığı rapor edilmiştir.

BULGULAR

Literatürde yapılan çalışmalar, farklı kalıp çelikleri ve alaşımların işlenebilirlik performansını kapsamlı şekilde incelemiştir. Toolox 44 üzerine gerçekleştirilen araştırmalarda , bu çeliğin ön sertleştirilmiş yapısına rağmen talaş kaldırma oranı, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması açısından dengeli sonuçlar verdiği rapor edilmiştir. Özellikle düşük ilerleme değerlerinde daha düzgün yüzeyler elde edilmiş, ancak ilerlemenin artışı yüzey kalitesini olumsuz etkilemiştir. Ayrıca bazı çalışmalarda talaş renk değişimleri ve sürekli talaş oluşumu, ısının büyük oranda talaş aracılığıyla uzaklaştırıldığını göstermiştir. 1.2311 çeliği için yapılan deneysel optimizasyonlarda , talaş kaldırma oranı ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki dengeyi sağlamak için kesme parametrelerinin dikkatle seçilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Benzer şekilde, 1.2344 sıcak iş takım çeliği üzerine yapılan çalışmalarda , sertleştirilmiş halde işlenebilirliğin sınırlı olduğu, yüksek hızlarda takım aşınmasının hızlandığı ve optimum koşulların orta hız–düşük ilerleme kombinasyonlarıyla sağlandığı ortaya konmuştur. Mikro frezeleme deneyleri ise 1.2344’te kesme kuvvetleri, titreşimler ve çapak oluşumunu parametrelerle ilişkilendirmiş, uygun strateji seçiminin yüzey kalitesini iyileştirdiğini göstermiştir.

Diğer alaşımlarla yapılan araştırmalarda da benzer eğilimler görülmektedir. AISI 4140 çeliği için Taguchi-DEAR yöntemiyle yapılan optimizasyon çalışmasında , kesme derinliğinin en belirleyici parametre olduğu ve yüksek hızlarda yüzey kalitesinin iyileştiği belirtilmiştir. AISI 1045 çeliğinde helisel frezeleme yöntemiyle delik kalitesi incelenmiş, kesme hızının yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde iyileştirdiği rapor edilmiştir . Çift fazlı ferrit–beynit çeliklerde ise , düşük sıcaklıklarda ısıtılma işlemi görmüş numunelerde hem takım ömrü hem de yüzey kalitesi açısından en uygun sonuçların elde edildiği gösterilmiştir. Son olarak, alüminyum alaşımlarında yapılan frezeleme deneyleri , kaplama seçiminin ve parametre optimizasyonunun yüzey kalitesinde belirleyici rol oynadığını, özellikle zor işlenen AA2219-T851 alaşımında ZrN kaplamalı takımların daha iyi performans sağladığını ortaya koymuştur.

SONUÇ

Yapılan derleme çalışmasında, farklı kalıp çelikleri ve alaşımların talaşlı imalattaki davranışları karşılaştırılmış ve benzer eğilimler ortaya konmuştur. Toolox 44 üzerine gerçekleştirilen araştırmalar , bu malzemenin ön sertleştirilmiş halde dahi kabul edilebilir yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü sağladığını, özellikle düşük ilerleme değerlerinde taşlama kalitesine yakın yüzeyler elde edilebildiğini göstermiştir. 1.2311 çeliği için yapılan optimizasyon



5th INTERNATIONAL CONGRESS ON MULTIDISCIPLINARY NATURAL SCIENCES

çalışmaları , üretim verimliliğinin artırılması amacıyla kesme parametrelerinin çok yanıtli yöntemlerle belirlenmesi gerektiğini ortaya koymuştur. 1.2344 çeliği üzerinde gerçekleştirilen deneyler , sertleştirilmiş durumda işlenebilirliğin zorlaştığını, buna rağmen uygun kesme hızları ve stratejiler seçildiğinde yüzey kalitesinin ve takım ömrünün iyileştirilebildiğini göstermiştir. Diğer malzeme gruplarıyla yapılan çalışmalar da benzer çıkarımlar sunmaktadır. AISI 4140 çeliğinde , kesme derinliği belirleyici parametre olurken, AISI 1045 çeliğinde helisel frezeleme uygulamaları ,yüzey kalitesini artırıcı sonuçlar vermiştir. Çift fazlı ferrit–beynit çeliklerde , düşük sıcaklıkta uygulanan ısıtıl işlemin takım ömrünü uzattığı ve yüzey kalitesini geliştirdiği belirlenmiştir. Ayrıca alüminyum alaşımlarındaki çalışmalar , kaplama seçiminin özellikle zor işlenen alaşımlarda yüzey pürüzlülüğü üzerinde kritik rol oynadığını göstermiştir.

Genel olarak literatür bulguları, kalıp ve alaşım çeliklerinin işlenebilirlik performansının; malzeme özellikleri, kesici takım seçimi ve işleme parametrelerinin etkileşimiyle belirlendiğini göstermektedir. Uygun parametre optimizasyonu ve takım seçimiyle hem yüzey kalitesi hem de takım ömrü iyileştirilebilmekte, böylece üretim süresi ve maliyetler açısından önemli avantajlar elde edilebilmektedir.



KAYNAKLAR

Balázs, B., T. M. (2020). Experimental investigation and optimisation of the micro milling process of hardened hot-work tool steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107, 5051–5065.

Bayraktar, Ş., U. G. (2021). Ön sertleştirilmiş Toolox 44 ve Nimax kalıp çeliklerinin işlenebilirliği üzerine deneysel çalışma. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(4), 1939–1947.

Binali, R., U. H. B., D. H. (2018). Toolox 44 Malzemesinde Talaş Kaldırma Miktarının Yüzey Pürüzlülüğü ve Takım Aşınması Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. *Technological Applied Sciences (NWSATAS)*, 13(1), 19–28.

Daniyan, I. A., T. I., D. O. O., M. K. (2019). Design and optimization of machining parameters for effective AISI P20 removal rate during milling operation. *Procedia CIRP*, 84, 861–867.

Fedai, H. (2022). AISI 4140 çeliğinin frezelenmesinin Taguchi-DEAR yöntemiyle optimizasyonu. *European Journal of Science and Technology*, 31, 741–747.

Gençalp İrizalp, S., K. H., E. Y., A. K. S. (2024). AA7475-T7351 ve AA2219-T851 alaşımlarının frezelenmesinde kesici takım kaplamalarının ve kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin deneysel olarak incelenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 36(1), 85–95.

Hegde, A., H. J., G. B. M., S. S., K. A. (2022). Machinability study and optimization of tool life and surface roughness of ferrite–bainite dual phase steel. *Journal of Applied Engineering Science*, 20(2), 358–364.

Ribeiro, M. B. A., S. A. J., A. H. J. (2021). Investigation of surface roughness generated by end milling of Toolox 44. 26th ABCM International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2021), COBEM2021-0118.

Rıza, M., A. E. Y. T. (2016). Cutting Temperature Investigation of AISI H13 in High Speed End Milling. *International Journal of Engineering Materials and Manufacture*, 1(1), 27–34.

Silva, P. M., F. A. J. F., P. R. B. D., D. J. P. (2025). Advancements in Hole Quality for AISI 1045 Steel Using Helical Milling. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9(8), 256.

