Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi
Dergi web sayfası: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Yayın Organı
Official Journal of Zonguldak Bülent Ecevit University

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Adına Sahibi *Owner on Behalf of Zonguldak Bülent Ecevit University*	İsmail Hakkı ÖZÖLÇER Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Rektörü
Baş Editör/*Editor in Chief*	Yılmaz YILDIRIM Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Sorumlu Müdür/*Publishing Manager*	Yasin HAZER Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi
Yönetim Yeri/*Head Office*	Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dekanlığı, 67100, İncivez, Zonguldak
Redaksiyon ve Teknik Destek/ *Redaction and Technical Support*	Salih ERDEM Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Havva KARAHAN Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Fakültesi Rukiye UZUN ARSLAN Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Yazışma Adresi/*Correspondence Address*	Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Farabi Kampüsü, İncivez, 67100, Zonguldak Tel : +90 0372 291 11 00
İnternet Adresi/*Web Address*	https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen
Yayınevi/*Publishing House*	Buluş Tasarım ve Matbaacılık Hizmetleri, Mebusevleri Mah. Turgut Reis Cad. 11/1 06570 Çankaya, Ankara, Tel: +90 312 222 44 06 • +90 312 223 55 44 www.bulustasarim.com.tr
Yayın Türü/*Publication Type*	Yerel Süreli / *Periodical* Yılda üç sayı yayımlanır: Nisan, Temmuz, Kasım *Published three issues per year: April, July, November* ISSN: 2146-4987
E-posta /*Email*	havvaatar@beun.edu.tr

Bu dergideki yazıların dergi standardlarına uygunluğunun kontrolü, dizimi, derginin yayıma hazır hale getirilmesi BULUŞ Tasarım ve Matbaacılık Hizmetleri San.Tic. tarafından gerçekleştirilmiştir.

Review of the articles in the journal to make sure they conform to publishing standards, typesetting, getting the journal ready for publication and finally the publishing process has been the responsibility of Buluş Design and Printing Services Company.

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi
Dergi web sayfası: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen
Yılda üç sayı yayımlanır
Published three issues per year

Baş Editör *Editor in Chief*	Yılmaz YILDIRIM	Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi *Zonguldak Bülent Ecevit University, Faculty of Engineering*
Yardımcı Editörler *Associate Editors*	Rukiye UZUN ARSLAN	Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi *Zonguldak Bulent Ecevit University, Faculty of Engineering*
	Yasin HAZER	Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi *Zonguldak Bulent Ecevit University, Faculty of Pharmacy*
	Salih ERDEM	Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi *Zonguldak Bülent Ecevit University*
	Havva KARAHAN	Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Biyoloji Bölümü *Zonguldak Bulent Ecevit University, Department of Biology*
İngilizce Redaksiyon *English Redaction*	Özgür ZEYDAN	Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi *Zonguldak Bulent Ecevit University, Faculty of Engineering*
	Can Murat DİKMEN	Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Fakültesi *Zonguldak Bulent Ecevit University, Faculty of Science*
	Nizamettin ÖZDOĞAN	Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi *Zonguldak Bulent Ecevit University, Faculty of Engineering*
Sorumlu Müdür *Publishing Manager*	Yasin HAZER	Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi *Zonguldak Bülent Ecevit University, Faculty of Pharmacy*
Uluslararası Yayın Kurulu *International Editorial Board*	Ahmet ÖZASLAN	Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak, Türkiye
	Akira HIRAO	Tokyo Institute of Technology, Japan
	Baki HAZER	Kapadokya University, Nevşehir, Türkiye
	Boris NATALIN	İstanbul Technical University, İstanbul, Türkiye
	Claude TOUZET	University of Provence, Marseille Cedex, France
	David W. STANLEY	Agricultural Research Service-USDA, United States
	Enver DURMUŞOĞLU	Ege University, İzmir, Türkiye
	Ferhan ATICI	Western Kentucky University, United States
	Figen KAYA	Yıldız Technical University, İstanbul, Türkiye
	Haluk GÜVEN	Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak, Türkiye
	İskender YILGÖR	Koç University, İstanbul, Türkiye
	İsmail Hakkı ÖZÖLÇER	Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak, Türkiye
	Kemal BÜYÜKGÜZEL	Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak, Türkiye
	Mahmut ÖZER	Milli Eğitim Bakanlığı,Ankara, Türkiye
	Martin BOHNER	Missouri University of Science and Technology, United States
	Mehmet KARATAŞ	Necmettin Erbakan University, Konya, Türkiye
	Mehmet YAMAN	Bolu İzzet Baysal University, Bolu, Türkiye
	Melih GENİŞ	Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak, Türkiye
	Mustafa SÖZEN	Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak, Türkiye
	Münevver PINAR	Ankara University, Ankara, Türkiye
	Neil CUMBERLIDGE	Northern Michigan University, Michigan, United States
	Nursel GÜL	Ankara University, Ankara, Türkiye
	Per Nicolai MARTENS	RWTH Aachen University, Germany
	Rafat SIDDIQUE	Civil Engineering Thapar University, Paitala (Punjab), India
	Remzi KARAGÜZEL	İstanbul Technical University, İstanbul, Türkiye
	Suna CEBESOY	Ankara University, Ankara, Türkiye
	Şahnaz BOLKENT	İstanbul University, İstanbul, Türkiye
	Ten FEIZI	Imperial College London, United Kingdom
	Türkan KOPAÇ	Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak, Türkiye
	Umut TOPRAK	Ankara University, Ankara, Türkiye
	Yılmaz YILDIRIM	Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak, Türkiye

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi / Karaelmas Science and Engineering Journal
Dergi web sayfası / Journal home page: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen

AMAÇ ve KAPSAM

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi (https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen), Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi'nin resmi yayın organıdır.

Derginin amacı, Fen Bilimleri, Temel Sağlık Bilimleri ve Mühendislik Bilimleri alanlarında yapılan özgün araştırma makaleleri, derlemeler, kısa makaleler, teknik not, kitap eleştirileri ve bilimsel nitelikli editöre mektupları yayınlayan uluslar arası ve saygın bilimsel bir dergi olmaktır.

Bu dergide yayınlanan makaleler, bağımsız ve önyargısız çift-körleme hakemlik (peer-review) ilkeleri doğrultusunda bir danışma kurulu tarafından değerlendirilir. Makaleler başlıca altı kategoride yayımlanır: (1) "Araştırma Makaleleri", (2) "Derleme Makaleler", (3) "Kısa Makaleler", (4) "Teknik Not ve Vaka Takdimleri", (5) "Editöre Mektuplar", (6) "Kitap ve Yazılım Programı Eleştirileri". Makaleler Türkçe veya İngilizce dillerinde yazılabilir; İngilizce veya Türkçe Özetler ile anahtar sözcükler içermelidir.

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, Nisan, Temmuz ve Kasım aylarında olmak üzere yılda üç kez yayınlanmaktadır ve https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen internet adresi üzerinden takip edilebilir.

Yayım İzni

Bireysel kullanım dışında, Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi'nde yayımlanan makaleler, şekiller ve çizelgeler yazılı izni olmaksızın çoğaltılamaz, bir sistemde arşivlenemez veya reklam ya da tanıtım amaçlı materyallerde kullanılamaz.

Bilimsel makalelerde, uygun şekilde kaynak gösterilerek alıntı yapılabilir.

Abone İşlemleri

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, Üniversite Kütüphanelerine ve bilim insanlarına düzenli olarak ulaştırılmaktadır. Yayımlanan makalelerin tam metnine, çizelgelerine ve özetlerine çevrim-içi olarak https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen adresinden ücretsiz olarak erişilebilmektedir.

Yazıların Bilimsel ve Hukuki Sorumluluğu

Yayımlanan yazıların bilimsel ve hukuki sorumluluğu yazarlarına aittir. Yazıların içeriğinden ve kaynakların doğruluğundan yazarlar sorumludur. Editör, Yardımcı Editörler, Yayın ve Danışma Kurulu üyeleri ve Yayımcı, dergideki hatalardan veya bilgilerin kullanımından doğacak olan sonuçlardan dolayı sorumluluk kabul etmez.

Yazarlarımızın etik ihlalleri ile ilgili tüm iddia ve kesinleşmiş süreçler kendi sorumluluklarında olup, kesinleşen etik ihlalleri durumunda makale otomatik iptal edilir.

AIMS and SCOPE

Karaelmas Science and Engineering Journal (https://dergipark.org.tr/en/pub/karaelmasfen), is the official journal of Zonguldak Bülent Ecevit University.

The journal's aim is to be scientific journal publishing original papers, reviews, short communications, technical book reviews and scientific editorial letters of science in the following areas: basic sciences, basic medicine science and engineering fields.

Articles submitted to this journal are evaluated in a double blinded peer-reviewed fashion by an advisory committee. Articles are published mainly in six categories: (1) "Research articles", (2) "Review Articles", (3) "Short Communications", (4) "Technical Notes and Case Reports", (5) "Letters to the Editor" and (6) "Book/Software Reviews". All articles may be written in Turkish or English, and should include English and Turkish abstracts and key words.

Karaelmas Science and Engineering Journal is published three issues per year in April, July and November.

The journal has also been available on-line by a website: https://dergipark.org.tr/en/pub/karaelmasfen

Permission Requests

Manuscripts, figures and tables published in the Karaelmas Science and Engineering Journal cannot be reproduced, archived in a retrieval system, or used for advertising purposes, except personal use.

Citations may be used in scientific articles with proper referral.

Subscriptions

Karaelmas Science and Engineering Journal is delivered complimentarily to University Library and scientists Tables of contents, abstracts and full texts of all articles published are accessible free of charge through the web site https://dergipark.org.tr/en/pub/karaelmasfen

Scientific and Legal Responsibilities

Scientific and legal responsibilities pertaining to the papers belong to the authors. Contents of the manuscripts and accuracy of references are also at the authors' responsibility. Editor, Associate Editors, Editorial and Advisory Board members and the Publisher decline responsibility for errors or any consequences arising from the use of information contained in this journal.

All claims and finalized processes regarding violations of ethics by our authors are under their own responsibility, and in case of ethical violations, the article is automatically canceled.

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi / Karaelmas Science and Engineering Journal
Dergi web sayfası / Journal home page: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen

YAZARLARA BİLGİLER

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, Fen Bilimleri, Temel Sağlık Bilimleri ve Mühendislik Bilimleri alanlarında yapılan özgün araştırma makaleleri, derlemeler, kısa makaleler, teknik not, kitap eleştirileri ve bilimsel nitelikli editöre mektupları yayınlayan uluslararası bir dergidir. Nisan, Temmuz ve Kasım aylarında olmak üzere yılda üç kez yayınlanır. Dergi, https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfeninternet adresi üzerinden takip edilebilir.

Dergide yayınlanacak makale türleri aşağıdaki gibidir.

Araştırma makalesi: Makale mutlaka orijinal ve daha önce hiç bir dergide basılmamış veya sunulmamış olmalı, makale yayınlamada sayfa sınırı kaynaklar dahil 30 sayfayı geçmemelidir.

Derlemeler: Herhangi bir araştırma alanındaki son yıllarda yaşanan gelişmeleri ve bu konuda son yıllarda yapılmış çalışmaların bir araya getirildiği makale türüdür. 15 sayfayı geçmemelidir.

Kısa makaleler: Küçük çapta yapılan çalışmalar, orijinal araştırma deneylerinin ön sonuçlarından, yeni buluşlar ve klinik deneylerden oluşmalı ve 5 sayfayı geçmemelidir.

Teknik notlar, Olgu sunumları: Bilimsel olarak önemli katkı sunan raporlardan oluşmalı ve 3 sayfayı geçmemelidir.

Editöre mektuplar: Herhangi bir araştırma konusuna ait fikirler, haberleri, önerileri kapsamalıdır ve 2 sayfayı geçmemelidir.

Kitap veya yazılım programlarına ait eleştiriler: Kitap veya yazılım programı hakkındaki kısa ve özet bilgileri içermelidir ve 1 sayfayı geçmemelidir.

YAYIN KURALLARI

Dergide yayınlanacak makalelerin yazım dili Türkçe veya İngilizcedir. Yazım kurallarına uymayan makaleler, hakemlere gönderilmeden düzeltilmek üzere yazara geri gönderilir. Bu nedenle derginin yazım kuralları dikkate alınmalıdır. Makaleler şekiller ve çizelgeler dahil 20 sayfayı geçmemelidir. Dergiye yayın için gönderilen makaleler iki uzman hakem tarafından değerlendirilir ve yayınlanmasına editör tarafından karar verilir. Dergiye gönderilen yazılar başka bir yerde yayınlanmamış veya yayınlamak üzere gönderilmemiş olmalıdır. Dergide yayınlanmak üzere kabul edilmiş olan yazıların yayın hakları Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisine aittir. Düzeltilmiş yazılar 3 ay içerisinde editöre gönderilecektir.

DEĞERLENDİRME SÜRECİ

Dergi yönergelerine uymayan yazılar, bilimsel değerlendirme yapılmadan yazarlara iade edilecektir. Dergi yönergelerine uygun olarak gönderilen makaleler, onları hakemlere atayacak olan Baş Editör veya Yardımcı Editör tarafından incelenir. İnceleme süreci tek kördür. Hakem önerileri, alan editörlerinin görüşleri ve yayının literatüre katkısı doğrultusunda Editör karar mektubunu yazar. İncelenmemiş tüm yazılar 10 gün içinde geri gönderilir ve yazıların karar mektupları 3-6 ay içinde gönderilir.

Makalelerdeki tüm değişiklikler yazarları tarafından yapılır. Son şekli verilen ve yayına hazırlanan makaleler üzerinde yazarlarca bir değişiklik yapılamaz. Her ne nedenle olursa olsun makalesinin yayınlanmasından vazgeçen bir yazar, makalesini dergiye sunum tarihinden itibaren en fazla iki ay içerisinde çekebilir. Hayvan deneylerinde etik kurul izin belgesi gereklidir.

MAKALE SUNUMU

Makaleler elektronik ortamda sunulacaktır.

YAZIM KURALLARI

- Makale A4 boyutlu kağıda, tek yüze, tüm kenarlardan 2.5 cm boşluk bırakılarak bir buçuk (1.5) satır aralıklı ve iki yana yaslı yazılmalıdır. Dergimizin yazım kurallarına ulaşmak için lütfen linke tıklayınız.

  https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen/writing-rules
- Yazım biçimi tüm metin için **Times New Roman yazı tipi** ve **12 punto** Microsoft Word kullanılarak hazırlanmalıdır. Metnin tamamı siyah-beyaz renkte olmalıdır.
- Satır başları ilk sayfadan itibaren sürekli olarak (şekiller, çizelgeler ve kaynaklar dahil olmak üzere) numaralandırılmalıdır. Sayfa numaraları, sayfaların alt orta bölümlerine konmalıdır.
- Eserin sisteme yüklenen Tam Metin dosyasında kör hakemlikten dolayı yazara ait bilgiler verilmemelidir. Yazara ait bilgiler Kapak Sayfasında yer almalıdır.
- Makalenin ana bölümleri, Türkçe Öz, İngilizce Öz (Abstract), Giriş, Gereç ve yöntem(ler) (Saha tanımlamaları, çalışılan malzeme vd. Yöntemler kısmının altında alt başlık olarak verilmelidir), Bulgular ve tartışma, Sonuç ve Öneriler ve Kaynaklardan oluşur.
- Latince isimler italik olarak yazılmalıdır.
- Makale yayınlamada SAYFA SINIRI kaynaklar dahil 30 sayfayı geçmemelidir.

Kapak Sayfası: Kapak Sayfası ayrı Microsoft Word dosyası olmalıdır. Kapak Sayfasında başlık, tüm yazarın tam adı, kurumlar ve ORCID'ler; sorumlu yazarın iletişim adresi ve e-posta adresi verilmelidir.

Kapak Yazısı Planı:

- Makale türü
- Türkçe ve İngilizce başlık
- Yazar adları ve adresleri
- Sorumlu yazarın adı, adresi ve e-posta adresi
- Kısa başlık
- Tüm yazarların ORCID'leri
- Etik gerektiren tüm çalışmaların Etik Kurul Kararı eklenmelidir.

Tam Metin Sayfasının Planı

İlk sayfa Özet Sayfasıdır. Özet Sayfasının planı aşağıdaki gibi olmalıdır:

1. Türkçe makalelerde

a) Türkçe Başlık (12 Punto)
b) İngilizce Başlık (İtalik, 12 Punto)
c) Öz (12 Punto)
d) Anahtar Kelimeler (12 Punto)*
e) Abstract (12 Punto)
f) Keywords (12 Punto)

2. İngilizce makalelerde

a) English Title (12 punto)
b) Türkçe Başlık (İtalik 12 punto)
c) Abstract (12 punto)
d) Keywords (12 punto)*
e) Öz (12 punto)
f) Anahtar Kelimeler (12 punto)

**Anahtar kelimelerden sadece ilk anahtar kelimenin ilk harfi büyük diğerlerinin ilk harfleri küçük olmalıdır.*

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi / Karaelmas Science and Engineering Journal
Dergi web sayfası / Journal home page: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen

Başlık: Metin ile uyumlu, kısa ve anlaşılır olmalıdır. Ortalanmış olarak, sadece İlk harfi büyük sonrakiler küçük, 12 punto ve koyu olmalıdır.

Yazar adları ve adresleri: Başlığın altındaki yazar isimleri kısaltmasız (Akademik unvan kullanılmamalıdır), adı ve soyadı (varsa ikinci ismi veya soy ismi) küçük harf ile ortalanmış olarak 12 punto ve koyu yazı karakteri ile yazılmalıdır. Yazar isimlerinden sonra adres belirtmek için üst simge olarak rakam kullanılmalıdır ([1] [2] [3] gibi). Sorumlu yazar isminde yıldız sembolü olmalıdır (*). Yazarların tam adresleri küçük harfle, ortalı ve 12 punto olarak yazılmalı, sırasıyla Üniversite, Fakülte, Bölüm, Şehir ve Ülke belirtilmelidir. Sorumlu yazarın e-posta adresi, adresinin sonunda mutlaka verilmelidir.

Öz ve Anahtar Kelimeler: Özetler 12 punto ile yazılmalı, maksimum 250 kelime olmalıdır. Özetler makaleden elde edilen sonuçları ortaya koymalıdır. Türkçe ve İngilizce özetin altında makale başlığında geçmeyen 3-5 kelimeden oluşan Anahtar kelimeler yazılmalıdır. Anahtar kelimeler alfabetik sıraya göre verilmelidir. Anahtar kelimelerden sadece ilk anahtar kelimenin ilk harfi büyük diğerlerinin ilk harfleri küçük olmalıdır. Anahtar kelimeler virgül ile ayrılmalı ve sonra bir karakter boşluk bırakılmalıdır.

Anahtar kelimelerden sonra arada bir satır bırakılarak Giriş bölümü başlatılmalıdır. Tam metinlerde makaledeki ana başlıklar ve varsa alt başlıklar anlaşılır olmalıdır. Ana metin başlıkları sola hizalı, sadece ilk kelimenin ilk harfi büyük ve koyu renkli olmalıdır. Alt başlıklar küçük ve italik yazılmalıdır. Ana ve alt başlıklara numara verilmelidir.

Giriş: Araştırmanın amacı, önemi ve konusunda yapılmış yayınlar arasındaki yeri belirtilmelidir.

Gereç ve Yöntem(ler): Uygulanan yöntemler ve teknikler anlaşılır bir şeklide verilmelidir. Daha önce yapılmış referanslar ile desteklenmelidir. İstatiksel modeller ve analiz yöntemleri açıkça belirtilmelidir.

Bulgular ve Tartışma: Bu bölümde elde edilen bulgulara yer verilmeli, bulgular gerekirse şekil ve çizelgelerle de desteklenmelidir. Elde edilen bulgular ilgili literatürlerle karşılaştırılmalıdır. Bulguların benzer ve farklılıkları yorumlanarak, çalışmadan elde edilen bulgular özetlenmelidir.

Sonuç ve Öneriler: Sonuçlar özetlenmeli ve öneriler yapılmalıdır.

Teşekkür: Araştırmaya destek olan kişi ve kuruluşlara yapılan teşekkürleri içermelidir.

Her türlü çıkar çatışması, finansal destek, yazarların katkı beyanı, bağış ve diğer editoryal (istatistik analiz, İngilizce/Türkçe değerlendirme) ve/veya teknik yardım var ise metnin sonunda sunulmalıdır.

Yazar Katkısı: Yazar A: çalışmayı planlamış ve tasarlamıştır, Yazar B: Çalışma hakkında verileri toplamış ve analiz etmiştir, Yazar C: Çalışmanın analizlerini yaparak makaleyi yazmıştır.

Etik Kurul Onayı: Eğer varsa etik kurul onayı eklenmelidir. Üzerinde etik kurul onayını veren kurum, onay numarası ve tarih yazılmalıdır.

Kaynaklar: Gönderilen makalelerin kaynakça kısmı hariç genel benzerlik oranı %20'yi geçmemelidir. Her türlü intihal içeren makale otomatik olarak reddedilecektir. amış bilgiler kaynak olarak verilmemelidir. Ancak, tamamlanmış ve jüriden geçmiş tezler kaynak olarak verilebilir. Kaynaklar, makale sonunda alfabetik sırada (yazar soyadlarına göre) verilmeli, yazar adı ve soyadları, makalenin basım tarihi koyu olarak yazılmalıdır.

İntihal Raporu: Gönderilen makalelerin kaynakça kısmı hariç genel benzerlik oranı %20'yi geçmemelidir. Her türlü intihal içeren makale otomatik olarak reddedilecektir.

Telif Hakkı Devir Sözleşmesi: Sayfada yer alan "Copyright Transfer Form" bağlantısına tıklayarak açılan form doldurulmalıdır, imzalı yüklenmelidir. Dergimizin telif hakkı devir sözleşmesine ulaşmak için lütfen linke tıklayınız.

https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen/page/10931

Kaynakların metin içerisindeki kullanımı aşağıda verilmiştir:

(Örnekler APA 7 stili esas alınarak hazırlanmıştır.)

1. Türkçe Makalelerde:

- Tek yazarlı çalışma (Aliskan, 2021). İki yazarlı çalışma (Yıldırım & Topaloğlu 2018) şeklinde belirtilmelidir.
- Üç ve daha fazla yazar söz konusu ise (Yılmaz vd., 2007, Erdem vd., 2022) şeklinde, aynı yazarın birden fazla makalesi kullanılacaksa (Erdem vd., 2022a; Erdem vd., 2022b) şeklinde olmalıdır.
- Herhangi bir kaynaktan alıntı yapılmışsa: Karahan & Çölgeçen (2021)'e göre.....şeklinde olmuştur; Yılmaz vd. (2007)'e göre; diye yazılmalıdır.

2. İngilizce Makalelerde:

- Tek yazarlı çalışma (Aliskan, 2021). İki yazarlı çalışma (Yıldırım & Topaloğlu 2018). Herhangi bir kaynaktan alıntı yapılmışsa ….according to Ünlü & Gerçek (2023)… şeklindedir diye belirtilmelidir.
- Üç ve daha fazla yazardan oluşan çalışmalar (Evans et al., 2023; Landen et al., 2021) şeklinde olmalıdır. Alıntı yapılacaksa ….according to Landen et al. (2021)…diye yazılmalıdır.
- Kaynak gösterilecek yayında kaç isim varsa, kaynaklar bölümünde tümü belirtilmeli, kısaltma yapılmamalıdır.
- Türkçe ve İngilizce makalelerde, yazılım programları metin içerisinde ismi ve yılı belirtilerek (IBM SPSS Statistics 2016) şeklinde verilmelidir.

Kaynakların metin sonunda verilişi aşağıdaki gibidir:

Kaynaklar alfabetik sıraya göre yazılmalıdır.

Makale:

Tek yazarlı

- Işınkaralar, K. (2022). Theoretical removal study of gas BTEX onto activated carbon produced from *Digitalis purpurea* L. biomass. *Biomass Convers. Biorefin.*, *12*(9): 4171-4181. https://doi.org/10.1007/s13399-022-02558-2

İki yazarlı

- Eker Şanli, G., & Tasdemir, Y. (2022). Accumulations and temporal trends of polychlorinated biphenyls (PCBs) in olive tree components. *Environmental Geochemistry and Health*, *44*. https://doi.org/10.1007/s10653-021-01046-2
- Yaralı, O., & Duru, H. (2016). Investigation into effect of scratch length and surface condition on Cerchar abrasivity index. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *60*, 111–120. https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.08.005

Üç ve daha fazla yazarlı

- Erdem, S., Gonca, E., Başoğlu, G., & Aydemir, E. (2022). İskemi sonrası verilen kannabidiol reperfüzyon ile uyarılan aritmilere karşı koruyucu etkilidir. *Medical Journal of Western Black Sea*, *6*(1), Article 1. https://doi.org/10.29058/mjwbs.1016783
- Erkaymaz, O., Senyer Yapici, Í., & Uzun Arslan, R. (2021). Effects of obesity on time-frequency components of electroretinogram signal using continuous wavelet transform. *Biomedical Signal Processing and Control*, *66*, 102398. https://doi.org/10.1016/j.bspc.2020.102398
- Öztürk, Ş., Hazer Y., Kaşkatepe, B., Çölgeçen, H., & Kulak, M. (2023). Kırmızı kantaron (*Hypericum capitatum*) bitkisi: fenolik içeriklerinin, antioksidan aktivitesinin belirlenmesi ve klinik izolatlar üzerinde antimikrobiyal etkinliğinin araştırılması. *Batı Karadeniz Tıp Dergisi*, *7*(1), 57-65. https://doi.org/10.29058/mjwbs.1251370

Aynı yazarın iki veya daha fazla çalışması kullanılmışsa kaynaklar tarih sırasına göre dizilmelidir.

- Berndt, T.J. (2022).
- Berndt, T.J. (2023).

Yedi yazardan fazla ise ilk altı yazarın adı listelendikten sonra üç nokta koyup son yazarın adı eklenir. Yedi isimden fazlası yer almamalıdır.

- Miller, F.H., Choi, M.J., Angeli, L.L., Harland, A.A., Stamos, J.A., Thomas, S.T., . . . & Rubin, L.H. (2009). Web site usability for the blind and low-vision user. *Technical Communication*, *57*: 323-335. https://doi.org/10.1080/10447310701771472

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi / Karaelmas Science and Engineering Journal
Dergi web sayfası / Journal home page: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen

Kitap:

- Reşat, U. (2001). Uygulamalı jeoteknik bilgiler. 4. Basım, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Nitelik Matbaacılık, Ankara, 385 s.
- Sanford, R.J. (2003). Principles of fracture mechanics, Prentice Hall, Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, USA, 404 pp.

Kitapta Bölüm:

- Atar, H., & Çölgeçen, H. (2020). Chapter 7-Bioactive compounds of oregano seeds. In V. R. Preedy & R. R. Watson (Eds.), *Nuts and Seeds in Health and Disease Prevention (Second Edition)* (pp. 73–77). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818553-7.00007-3

Rapor:

- Makarewicz, J.C., Lewis, T., & Bertram, P. (1995). Epilimnetic phytoplankton and zooplankton biomass and species composition in Lake Michigan, 1983-1992. U.S. EPA Great Lakes National Program, Chicago, IL. EPA 905-R-95-009.

Kongre, Sempozyum:

- Karahan, H., & Çölgeçen, H. (2021). Uptake of silver nanoparticles in natural tetraploid *Trifolium pratense* L. calli. 10th International Molecular Biology and Biotechnology Congress, s. 56, Turkey.

İnternet:

Eğer bir bilgi herhangi bir internet sayfasından alınmış ise (internetten alınan ve dergilerde yayınlanan makaleler hariç), kaynaklar bölümüne internet sitesinin ismi ve konu başlığı tam olarak yazılmalıdır.

Web sayfası:

- TÜİK 2023. https://www.tuik.gov.tr/

Yazarlı web sayfası:

- Dawson, J., Smith, L., & Deubert, K. 31 Ekim 2002. http://studytrekk.lis.curtin.edu.au/ şeklinde belirtilmelidir.

Baskıda olan makale:

- Evans, M.A. (2023). Makale başlığı. Dergi. (DOI).

Tezler:

- Duru, H. (2020). Geliştirilen cerchar aşındırıcılık deney aletiyle kayaçların spesifik çizme enerjisinin araştırılması. Doktora Tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, 175 s.

Yazılım:

- SPSS Statistics 24.0. Software, IBM, United States.

Çizelgeler ve Şekiller:

Tüm şekil ve çizelgeler makale içerisinde sırayla numaralandırılmalı (Çizelge 1, Şekil 1, Çizelge 2 ve 3, Şekil 2 ve 3, Şekil 4, Çizelge 2) (şekil ve çizelgeler metin içerisinde verilmelidir.), şekillerin sıra numaraları ve başlıkları altta, çizelgelerinki ise üstlerine iki yana yaslı yazılmalıdır, metin içinde atıfları Çizelge 1, Şekil 1 şeklinde olmalıdır. Grafik ve şekiller sayfa boyutları dikkate alınarak çizilmelidir. Grafikler, çizimler ve fotoğraflar JPEG, PNG ya da TIFF formatında (en az 300 dpi çözünürlükte) siyah-beyaz veya renkli olarak sunulmalıdır. Fotoğraflarda büyütmeyi göstermek için mutlaka bar kullanılmalıdır.

Çizelgede verilecek olan verilerde standart sapma veya standart hatalar (1.42 ± 1.36) şeklinde, istatistiksel analiz yapılmışsa (731.2ab) şeklinde, bunların başlık olarak yazılış şekilleri de (ort ± SE; ort ± SD, vb.) gibi olmalıdır.

Denklemler:

Matematiksel ifadeler Cambria Math yazı stili ile "Equation Editör" (word ortamında) kullanılarak 12 punto ve alt ve üst indisler 12 punto yazılmalıdır. Metin içerisinde geçen eşitlikler normal parantez ( ) içerisinde numaralandırılmalıdır. Denklem sıra numarası ile birlikte (parantez içerisinde) yazılmalıdır.

$$V_t = \frac{d_p^2(\rho_p - \rho_g)V_i^2}{18\,\mu R} \quad (1)$$

Ekler:

Tüm ekler ayrı sayfaya yazılmalı ve Romen rakamları ile numaralandırılmalıdır. Matematik dalında yayın gönderecek yazarların konu sınıflandırma numarasını (AMS-Mathematical Subject Classification Number) belirtmeleri gerekir.

Semboller ve Birimler:

Metrik sistem veya SI birimleri (kPa, kN/m^3, g/cm^2, m/sn, g/m^3, vb.) kullanılmalıdır. Gerek metin içinde ve çizelgelerde, gerekse şekillerde rakamların ondalık bölümlerinin belirtilmesi için nokta kullanılmalıdır (10.25 gibi). Yüzdelik birimler (%50) şeklinde belirtilmelidir.

Kısaltmalar:

Zamanla ilgili olan kısaltmalar: sn (saniye), dk (dakika), sa (saat), hf (hafta), y (yıl) olarak belirtilmelidir. Tarihler verilirken gün ay ve yıl kısaltma yapmadan tam olarak yazılmalıdır (19 Mayıs 2023).

Sayılar:

Sayılar cümle başlarında yazı ile verilmelidir. Birden dokuza kadar olan sayılar yazı ile, 10 ve daha büyük sayılar rakamla belirtilmelidir. Birden küçük olan sayılar (0.05, 0.56, 0.50, $p<0.05$, vb.) olarak belirtilmelidir.

Dipnotlar:

Çizelgede kullanılacak olan dipnotlar istatistiksel analiz yapıldığı durumlarda (*$p<0.05$; ** $p<0.01$; *** $p<0.001$; NS, istatistiksel olarak önemsizdir, vb.) şeklinde olmalıdır. Derginin bir sayısında, ilk isim olarak bir yazarın üçten fazla eseri basılamaz. Dönemler içerisinde üçten fazla eser gönderilmişse, ilk üçü dışında kalanlar daha sonraki sayılara aktarılır.

MAKALE YAZIM KONTROL LİSTESİ

Makale dergiye sunulmadan önce makalenin yazım kurallarına uygun olup olmadığından emin olmak için aşağıda belirtilen kontrolleri yapınız.

- Kapak sayfası, Tam metin sayfası, Telif hakkı bildirim formu ve İntihal raporu eklendi mi?
- İmla ve dilbilgisi kontrolü yapıldı mı?
- Tüm sayfa düzeni 1.5 satır aralıklı yazıldı mı?
- Köşelerden 2.5 cm boşluk bırakıldı mı?
- Yazı tipi Times New Roman ve büyüklüğü 12 punto mu?
- Metin içerisindeki başlıklar sola hizalı, 12 punto ve koyu renkli yazıldı mı?
- Tüm yazarların adları ve soyadları kısaltma yapılmadan belirtildi mi?
- Adresler belirtildi mi?
- Başlık 12 punto koyu yazı karakteri ile ortalanarak yazıldı mı?
- Öz (Abstract) ve Anahtar kelimeler (Keywords) yazıldı mı?
- Kaynaklar yazım kurallarına göre ve alfabetik sırayla yazıldı mı?
- Ondalık dilimler nokta ile belirtildi mi? (10.25 gibi)
- Yüzdelik gösterimler (%63, %10 gibi) şeklinde yapıldı mı?
- Çizelgelerin maksimum boyutu 16x20 cm; minimum 8 cm mi?
- Çizelgelerin numaraları (Çizelge 1, Çizelge 2, Çizelge 3 vs.) makale içerisinde sırayla verildi mi?
- Orijinal şekiller eklendi mi?
- Şekiller yazım kurallarına uygun olarak düzenlendi mi?
- Şekillerin maksimum boyutu 16x20 cm; minimum 8 cm, minimum 300 dpi mi?
- Şekillerin numaraları (Şekil 1, Şekil 2, Şekil 3 vs.) makale içerisinde sırayla verildi mi?
- Tüm sayfa ve satırlara numara verildi mi?

Dergimizin yazım kurallarına göre yazılmış makale örneğine ulaşmak için lütfen linke tıklayınız.

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi / Karaelmas Science and Engineering Journal
Dergi web sayfası / Journal home page: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen

ETİK KURALLAR

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesinin yayın organı olan Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi ulusal ve uluslararası tüm kurum ve kişilere ücretsiz olarak ulaşmayı hedefleyen hakemli bir dergidir.

Dergimize gönderilen bilimsel yazılarda, ICMJE (International Committee of Medical Journal Editors) tavsiyeleri ile COPE (Committee on Publication Ethics)'un Editör ve Yazarlar için Uluslararası Standartları dikkate alınmaktadır.

Yazarlarımızın etik ihlalleri ile ilgili tüm iddia ve kesinleşmiş süreçler kendi sorumluluklarında olup, kesinleşen etik ihlalleri durumunda makale otomatik iptal edilir.

Hakemler İçin Etik Kurallar

Hakemler;

- Değerlendirdiği yazıların gizliliğine saygı gösterir ve makaleyi tartışmaz veya yazı hakkında başka herhangi bir kişiyle iletişim kurmaz.
- Olası bir çıkar çatışması olduğunda editörü konu hakkında bilgilendirir.
- Önerileri için nesnel ve yapıcı bir açıklama sağlar.
- Makaleye ilişkin kararlarının konudan veya yazarlık biçiminden etkilenmesine izin vermez.
- Güçlü bir bilimsel gerekçe olmadıkça yazarın kendi makalelerini belirtmesini istemez.
- Yazarlar tarafından yayınlanmadan önce kendi çalışmalarının hiçbirinde incelenen makalenin herhangi bir bölümünü veya bilgiyi çoğaltmaz.
- Hakem değerlendirmelerini sadece uzmanlıkları dahilinde ve makul bir süre içinde kabul eder.
- Yazının yayına çıkmasını geciktirecek ertelemeler yapmaz.
- Hakaret, düşmanca veya küçük düşürücü bir dil kullanmaz.
- Gönderilen makaleleri ve ilgili tüm materyalleri inceledikten sonra imha eder.

https://publicationethics.org/files/Ethical_guidelines_for_peer_reviewers_0.pdf

Yazarlar İçin Etik Kurallar

Yazarlar ve yardımcı yazarlar;

- International Committee of Medical Journal Editors (ICMJE) tarafından belirtilen yazar kriterlerine uygunluk sağlanır;
  a. Eserin tasarımına veya tasarımına önemli katkılar sağlayan verilerin elde edilmesi, analizi veya yorumlanması
  b. Çalışmanın hazırlanması veya literatürün içerik için eleştirel olarak gözden geçirilmesi
  c. Yayınlanacak versiyonun nihai onayı
  d. Çalışmanın herhangi bir bölümünün doğruluğu veya bütünlüğü ile ilgili soruların uygun şekilde soruşturulup çözülmesini sağlamada, çalışmanın tüm yönlerinden sorumlu olacak anlaşma.
- Gönderilen makaleler yazar(lar)ın özgün çalışması olmalıdır ve eşzamanlı olarak farklı yayıncılara gönderilmemelidir
- Yazar(lar) araştırma önerisinde, icrasında ya da araştırma sonuçlarını raporlarken araştırma suistimali olarak tanımlanan uydurma, tahrifat ya da intihalden sorumludur.
- Gönderilen makalelerde çıkar çatışması varsa editöre bilgi verilmelidir
- Gönderilen makalelerde ön kontrol, değerlendirme süreci ya da yayınlanmış olan sürümünde yazar veya yardımcı yazarlar tarafından hata fark edilirse bilgi vermek, düzeltmek ya da geri çekmek için editörü bilgilendirmelidir.
- Makale gönderildikten sonra yazar sıralamaları ve yazar ekleme-çıkartmaları önerilmemelidir
- Yazar(lar), etik kurul kararı gerektiren araştırmalar için etik kurul onayı aldığını; etik kurul adı, karar tarihi ve sayısı aday makalenin ilk-son sayfasında ve yöntem bölümünde belirtmeli, etik kurul kararını gösteren belgeyi makalenin başvurusuyla birlikte sisteme yüklemelidir.
- Yazarlar olgu sunumlarında olur/onam formunun alındığına ilişkin bilgiye makalede yer vermelidir.
- Kullanılan fikir ve sanat eserleri için telif hakları düzenlemelerine riayet edilmesi gerekmektedir.
- Makale sonunda; Araştırmacıların Katkı Oranı beyanı, varsa Destek ve Teşekkür Beyanı, Çatışma Beyanı verilmelidir.

http://www.icmje.org/icmje-recommendations.pdf

https://www.ease.org.uk/wp-content/uploads/2018/11/doi.10.20316.ESE_.2018.44.e1.tr_.pdf

Editörler İçin Etik Kurallar

Editörler:

- Okuyucular, araştırmayı veya diğer bilimsel çalışmaları kimin finanse ettiği ve fon verenlerin araştırmada ve yayınlanmasında herhangi bir rolü olup olmadığı ve eğer öyleyse bunun ne olduğu konusunda bilgilendirilmelidir.
- Editörlerin yayın için bir makaleyi kabul etme veya reddetme kararları, makalenin önemi, özgünlüğü ve netliği ile çalışmanın geçerliliği ve derginin görev alanına uygunluğuna dayanmalıdır.
- Editörler, gönderimle ilgili ciddi sorunlar tespit edilmedikçe, gönderimleri kabul etme kararlarını tersine çevirmemelidir.
- Ciddi sorunlar tespit edilmedikçe yeni editörler, bir önceki editör tarafından yapılan başvuruları yayınlama kararlarını bozmamalıdır.
- Hakem değerlendirmesi süreçlerinin bir açıklaması yapılmalı ve editörler açıklanan süreçlerden önemli sapmaları ortaya çıkarmalıdır.
- Yazarların editoryal kararlara itiraz edebilmeleri için beyan edilmiş bir mekanizmaya sahiptir.
- Editörler, kendilerinden beklenen her şey hakkında yazarlara rehberlik etmelidir. Bu rehberlik düzenli olarak güncellenmeli ve bu koda atıfta bulunmalı veya bu koda bağlantı vermelidir.
- Editörler, International Committee of Medical Journal Editors (ICMJE) önerdiği yazarlık kriterlerini belirtmelidir.
- Editörler, kabul etmeden önce gözden geçirenlerin rekabet edebilecek potansiyel çıkarları ifşa etmelerini istemelidir bir sunumu gözden geçirin.

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi / Karaelmas Science and Engineering Journal
Dergi web sayfası / Journal home page: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen

- Editörler, hakemlerin kimliklerinin korunmasını sağlayacak sistemlere sahip olmalıdır. Yazarlara ve hakemlere bildirilen açık bir inceleme sistemi kullanır.
- Editörler, yeni yayın kurulu üyelerine kendilerinden beklenen her şey hakkında kılavuzlar sunmalı ve mevcut üyeleri yeni politikalar ve gelişmeler hakkında güncel tutmalıdır.
- Editörler, derginin kalitesine ve uygunluğuna göre ve dergi sahibinin / yayıncının müdahalesi olmadan hangi makalelerin yayınlanacağına karar vermelidir.
- Editörlerin derginin sahibi ve / veya yayıncı ile ilişkilerini belirleyen yazılı bir sözleşmesi olmalıdır. Bu sözleşmenin şartları Dergi Editörleri için COPE Davranış Kuralları ile uyumlu olmalıdır.
- Editörler dergilerindeki hakem değerlendirmelerinin adil, tarafsız ve zamanında yapılmasını sağlamak için çaba göstermelidir.
- Editörler, dergilerine gönderilen materyallerin incelenirken gizli kalmasını sağlayacak sistemlere sahip olmalıdır.
- Editörler, dergilerdeki bölümlerin farklı amaç ve standartlara sahip olacağını kabul ederek, yayınladıkları materyalin kalitesini sağlamak için tüm makul adımları atmalıdır.

https://publicationethics.org/files/Code%20of%20Conduct.pdf

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi / Karaelmas Science and Engineering Journal
Dergi web sayfası / Journal home page: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen

YAYIN ETİĞİ

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisinin yayın etiği beyanı, www.publicationethics.org adresinde bulunan Yayın Etiği Komitesi'nin (COPE) Davranış Kuralları kılavuzuna dayanmaktadır.

Editörlerin Görevleri

Adil ve editoryal bağımsızlık

Editörler sunulan makaleleri, yazarların ırkı, cinsiyeti, cinsel tercihi, etnik kökeni, vatandaşlığı, dini inancı, siyasi felsefesi veya kurumsal eğilimleri ne olursa olsun, sadece akademik yararları (önemi, özgünlük, çalışmanın geçerliliği, netliği) ve derginin kapsamıyla olan ilgisine göre değerlendirirler. Düzenleme ve yayınlama kararları, hükümetlerin veya derginin dışındaki diğer kurumların politikaları tarafından belirlenmez. Genel Yayın Yönetmeni, derginin tüm editoryal içeriği ve bu içeriğin yayınlanma zamanlaması üzerinde tam yetkiye sahiptir.

Gizlilik

Editörler, gönderilen bir makaleyle ilgili hiçbir bilgiyi ilgili yazar, gözden geçirenler, potansiyel gözden geçirenler, diğer yayın danışmanları ve yayıncı dışında kimseye açıklamaz.

Açıklama ve çıkar çatışmaları

Editörler ve yayın kurulu üyeleri, gönderilen bir makalede açıklanan yayınlanmamış bilgileri, yazarların açık yazılı izni olmadan kendi araştırma amaçları doğrultusunda kullanmayacaktır. Yazının işlenmesi sonucunda editörler tarafından elde edilen ayrıcalıklı bilgi veya fikirler gizli tutulacak ve kişisel avantajları için kullanılmayacaktır. Editörler, makalelere bağlı herhangi bir yazar, şirket veya kurumla rekabet, işbirlikçi veya diğer ilişkilerden/bağlantılardan kaynaklanan çıkar çatışmaları olan yazılarını dikkate almaktan geri çekilecekler; bunun yerine, yayın kurulunun başka bir üyesinden yazıyı işlemesini isteyecekler.

Yayın kararları

Editörler, yayınlanmak üzere değerlendirilen tüm makalelerin, alanında uzman en az iki gözden geçiren tarafından hakem incelemesinden geçmesini sağlar. Sorumlu müdür, söz konusu çalışmanın doğrulanmasına, araştırmacılar ve okuyucular için önemine, eleştirmenlerin yorumlarına ve iftira, telif hakkı ihlali ve intihal ile ilgili şu anda yürürlükte olan yasal gerekliliklere dayanarak, dergiye gönderilen yazılardan hangisinin yayınlanacağına karar vermekten sorumludur. Sorumlu müdür bu kararı verirken diğer editörler veya yorumcularla görüşebilir.

Soruşturmalara katılım ve işbirliği

Editörler (yayıncı ve/veya kurulla birlikte) gönderilen bir makale veya yayınlanmış makaleyle ilgili etik kaygılar ortaya çıktığında duyarlı önlemler alacaktır. Etik olmayan yayıncılık davranışlarının rapor edildiği her eylem, yayımlandıktan yıllar sonra keşfedilmiş olsa bile incelenecektir. Editörler, suistimal şüphesiyle uğraşırken COPE Akış Şemalarını takip eder. Eğer, soruşturma üzerine, etik kaygı iyi kurulmuşsa, bir düzeltme, geri çekme, endişenin ifade edilmesi veya ilgili olabilecek diğer notlar dergide yayınlanacaktır.

Gözden Geçirenlerin Görevleri

Editoryal kararlara katkı

Akran incelemesi editörlerin editoryal kararlar almalarına yardımcı olur ve yazarlarla editoryal iletişim yoluyla yazarların makalelerini geliştirmelerine yardımcı olabilir. Akran incelemesi resmi bilimsel iletişimin önemli bir bileşenidir ve bilimsel çabanın merkezinde yer alır.

İstem

Bir makalede bildirilen araştırmayı gözden geçirmek için niteliksiz hisseden veya derhal gözden geçirilmesinin imkansız olacağını bilen davet edilen her hakem, editörleri derhal bilgilendirmeli ve alternatif hakemlerle iletişime geçilebilmesi için inceleme davetini reddetmelidir.

Gizlilik

İncelenmek için alınan tüm yazılar gizli belgelerdir ve bu şekilde ele alınmalıdır; Genel Yayın Yönetmeni tarafından izin verilmedikleri sürece (istisnai ve özel durumlarda bunu yapacak olanlar) başkalarıyla gösterilmemeli veya tartışılmamalıdır. Bu, inceleme davetini reddeden, davet edilen, gözden geçirenler için de geçerlidir.

Nesnellik standartları

İncelemeler objektif olarak yapılmalı ve gözlemler, yazarların makalenin iyileştirilmesi için kullanabilmeleri amacıyla destekleyici argümanlarla net bir şekilde formüle edilmelidir. Yazarların kişisel eleştirisi uygunsuzdur.

Kaynakların kabulü

Hakemler, yazarlar tarafından atıfta bulunulmamış ilgili yayınlanmış çalışmaları belirlemelidir. Önceki yayınlarda rapor edilmiş bir gözlem, türetme veya argüman olan herhangi bir ifadeye ilgili alıntı eşlik etmelidir. Bir hakem ayrıca, incelenmekte olan makale ile hakkında kişisel bilgi sahibi oldukları (yayınlanmış veya yayınlanmamış) herhangi bir diğer makale arasındaki herhangi bir önemli benzerlik veya örtüşmeyi editörlere bildirmelidir.

Açıklama ve çıkar çatışmaları

Makaleye bağlı yazarlar, şirketler veya kurumlarla rekabet, işbirlikçi veya diğer ilişkilerden kaynaklanan çıkar çatışmaları olan davet edilen hakemler, editörleri derhal çıkar çatışmalarını beyan etmeleri ve alternatif hakemlerle iletişime geçebilmeleri için inceleme davetini reddetmeleri konusunda bilgilendirmelidir.

Gönderilen bir yazıda açıklanan yayınlanmamış materyaller, yazarların açık yazılı izni olmadan bir eleştirmenin kendi araştırmasında kullanılmamalıdır. Akran incelemesi yoluyla elde edilen ayrıcalıklı bilgiler veya fikirler gizli tutulmalı ve gözden geçirenin kişisel avantajı için kullanılmamalıdır. Bu, inceleme davetini reddeden, davet edilen, gözden geçirenler için de geçerlidir.

Yazarların Görevleri

Raporlama standartları

Orijinal araştırmanın yazarları, yapılan eserin ve sonuçların doğru bir açıklamasını sunmalı ve ardından çalışmanın öneminin objektif bir tartışmasını sunmalıdır. Yazı, başkalarının eseri çoğaltmasına izin verecek yeterli ayrıntı ve referanslar içermelidir. İnceleme makaleleri doğru, objektif ve kapsamlı olmalı, editoryal 'görüş' veya perspektif parçaları açıkça bu şekilde tanımlanmalıdır. Hileli veya bilerek yanlış ifadeler etik olmayan davranışlar teşkil eder ve kabul edilemez.

Veri erişimi ve saklama

Yazarlardan, çalışmalarının ham verilerini editoryal inceleme için yazı ile birlikte sağlamaları istenebilir ve uygulanabilirse verileri kamuya açık

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi / Karaelmas Science and Engineering Journal
Dergi web sayfası / Journal home page: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen

hale getirmeye hazır olmalıdır. Her halükarda, yazarlar, katılımcıların gizliliğinin korunması ve özel verilerle ilgili yasal hakların serbest bırakılmasını engellememesi koşuluyla, bu verilerin yayımlandıktan sonra en az 10 yıl süreyle (tercihen kurumsal veya konu tabanlı veri deposu veya diğer veri merkezi aracılığıyla) diğer yetkili profesyonellere erişilebilirliğini sağlamalıdır.

Özgünlük ve intihal

Yazarlar sadece tamamen orijinal eserler yazdıklarından ve sunduklarından ve başkalarının çalışmalarını ve/veya sözlerini kullanmışlarsa, bunun uygun şekilde atıfta bulunulduğunu sağlamalıdır. Yazıda bildirilen eserin niteliğinin belirlenmesinde etkili olan yayınlar da belirtilmelidir. İntihal, başka bir makalenin "yazarın kendi makalesi" olarak "aktarılmasından", başka bir makalenin önemli bölümlerini kopyalamaya veya paraphrasinge (atıf yapmadan), başkaları tarafından yapılan araştırmadan elde edilen sonuçların iddiasına kadar pek çok biçim alır. Tüm biçimlerinde intihal etik olmayan yayıncılık davranışı teşkil eder ve kabul edilemez.

Çoklu, yinelenen, gereksiz veya eşzamanlı gönderim/yayın

Temelde aynı araştırmayı açıklayan bildiriler birden fazla dergide veya birincil yayında yayınlanmamalıdır. Bu nedenle, yazarlar daha önce başka bir dergide yayınlanmış bir makaleyi değerlendirilmek üzere göndermemelidir. Bir makalenin aynı anda birden fazla dergiye gönderilmesi etik dışı bir yayın davranışıdır ve kabul edilemez.

Bazı makale türlerinin (klinik kılavuzlar, çeviriler gibi) birden fazla dergide yayınlanması, belirli şartların karşılanması koşuluyla bazen haklı görülebilir. İlgili dergilerin yazarları ve editörleri, birincil belgenin aynı verilerini ve yorumunu yansıtması gereken ikincil yayını kabul etmelidir. Birincil referans, ikincil yayında belirtilmelidir.

Makalenin yazarlığı

Sadece bu yazarlık kriterlerini karşılayan kişiler, içeriğin kamuya açık sorumluluğunu üstlenebilmeleri için makalede yazar olarak listelenmelidir: (i) çalışmanın anlaşılmasına, tasarımına, yürütülmesine, veri edinilmesine veya analizine/yorumlanmasına önemli katkılarda bulunmuştur; ve (ii) yazının hazırlanması veya önemli entelektüel içerik için eleştirel olarak revize edilmesi; ve (iii) gazetenin son halini görmüş ve onaylamış ve yayımlanmak üzere sunulmasını kabul etmiş ve kabul etmiş. Yazıda bildirilen eserin önemli katkıları olan (teknik yardım, yazma ve düzenleme yardımı, genel destek gibi) ancak yazarlık kriterlerini karşılamayan kişilerin yazar olarak listelenmemesi, yazılı izin alındıktan sonra "Bildirimler" bölümünde kabul edilmesi gerekmektedir. İlgili yazar, tüm uygun ortak yazarların (yukarıdaki tanıma göre) ve uygunsuz ortak yazarların yazar listesine dahil edilmemesini sağlamalı ve tüm ortak yazarların makalenin son halini görüp onayladığını ve yayına sunulmasını kabul ettiğini doğrulamalıdır.

Açıklama ve çıkar çatışmaları

Yazarlar mümkün olan en erken aşamada (genellikle gönderim sırasında bir açıklama formu göndererek ve makaleye bir ifade de dahil olmak üzere), sonuçları veya makaledeki yorumlarını etkilemek için yorumlanabilecek çıkar çatışmalarını ifşa etmelidir. Açıklanması gereken potansiyel çıkar çatışmalarına örnek olarak, fahri, eğitim hibeleri veya diğer finansman, konuşmacı bürolarına katılım, üyelik, istihdam, danışmanlık, hisse senedi sahipliği veya diğer hisse senedi çıkarları ile ücretli uzman ifadeleri veya patent lisanslama düzenlemeleri ile kişisel veya mesleki ilişkiler, ilgili kişiler, bilgi veya inançlar gibi finansal olmayan konular veya makalede tartışılan materyaller verilebilir. Çalışma için tüm finansal destek kaynakları açıklanmalıdır (hibe numarası veya varsa diğer referans numarası da dahil olmak üzere).

Kaynakların kabulü

Yazarlar, başkalarının çalışmalarını doğru bir şekilde kabul ettiklerinden emin olmalı ve bildirilen eserin niteliğini belirlemede etkili olan yayınlara da atıfta bulunulmalıdır. Özel olarak elde edilen bilgiler (üçüncü şahıslarla konuşma, yazışma veya tartışma) kaynaktan açık, yazılı izin alınmadan kullanılmamalı veya rapor edilmemelidir. Yazarlar, bu hizmetlerde yer alan eserin yazarının açık yazılı iznini almamışsa, yazılara hakemlik veya hibe başvuruları gibi gizli hizmetlerin sağlanmasında elde edilen bilgileri kullanmamalıdır.

Tehlikeler ve insan veya hayvan denekleri

Çalışma, kullanımlarında olağandışı tehlikeler etüt eden kimyasallar, prosedürler veya ekipmanlar içeriyorsa, yazarlar bunları yazıda açıkça tanımlamalıdır. Eğer çalışma hayvanların veya insan katılımcıların kullanımını içeriyorsa, yazarlar tüm prosedürlerin ilgili yasalara ve kurumsal yönergelere uygun olarak gerçekleştirildiğinden ve ilgili kurumsal komitenin bunları onayladığından emin olmalıdır; yazı bu yönde bir ifade içermelidir. Yazarlar ayrıca, insan katılımcılarla deneyler için bilgilendirilmiş onam alındığına dair bir ifadeyi de makaleye eklemelidir. İnsan katılımcıların gizlilik haklarına her zaman uyulmalıdır.

Akran incelemesi

Yazarlar, editörlerin ham veri, açıklama ve etik onayı, hasta onayları ve telif hakkı izinleri için isteklerine derhal yanıt vererek akran değerlendirme sürecine katılmak ve tam işbirliği yapmak zorundadırlar. İlk olarak "revizyon gerekli" kararı verilmesi durumunda yazarlar, hakemlerin yorumlarına sistematik olarak, her noktasına zamanında yanıt vererek, makalelerini verilen son tarihe kadar gözden geçirip dergiye yeniden göndermelidir.

Yayınlanan çalışmalardaki temel hatalar

Yazarlar kendi yayınlanmış çalışmalarında önemli hatalar veya yanlışlıklar bulduklarında, derginin editörlerini veya yayımcısını derhal bilgilendirmek ve çalışmayı bir hata biçiminde düzeltmek veya geri çekmek için onlarla işbirliği yapmak onların yükümlülüğüdür. Editörler veya yayıncı, yayınlanmış bir çalışmanın önemli bir hata veya yanlışlık içerdiğini üçüncü bir taraftan öğrenirse, makalenin doğruluğunu dergi editörlerine derhal düzeltmek veya geri çekmek veya dergi editörlerine kanıt sunmak yazarların yükümlülüğüdür.

Karaelmas Science and Engineering Journal / Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi
Journal home page / Dergi web sayfası: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen

INSTRUCTIONS to AUTHORS

Karaelmas Science and Engineering Journal is the international scientific journal publishing original papers in English or Turkish, reviews, short communications, technical notes and scientific editorial letters of science in the following areas: basic sciences, basic medicine science and engineering fields. This journal publishes three times a year (April, July and November). Manuscripts should be submitted online by a website: https://dergipark.org.tr/en/pub/karaelmasfen

Manuscript Categories:

Research articles: Manuscripts should report original information which have not been published or submitted previously. Full text should not exceed 30 pages including references.

Review articles: Reviews of recent developments in a research fields and ideas will be accepted. Manuscripts should not exceed 15 papers of printed text. The use of tables and figures to summarize critical points is encouraged.

Short communications: These include small-scale investigations, innovative methods, perspectives on existing laboratory techniques and new methodologies, clinical trials and epidemiological studies. It should no exceed 5 printed pages.

Technical notes or Case Reports: Scientific reports providing important contributions their area will be considered in this category. It should not be exceed 3 pages.

Letters to editor: These include opinions, news and suggestions. Letters should not exceed 2 pages.

Book/Software Reviews: Short but concise description of the book/software, not exceeding a page. These types are not peer reviewed.

CONDITIONS FOR PUBLICATION

Journal articles are published in Turkish or English. Manuscript should be suitable to the formal criteria of Instructions to Authors, otherwise, the manuscript will be sent back to the authors. Manuscripts should not exceed 20 papers of printed text, including tables, figures and references. Manuscripts that are found suitable for peer review will be assigned to two expert reviewers. The final decision to accept or reject a manuscript will be made by the Editor-in-Chief. After review process, the Editor-in-Chief will inform the authors of acceptance, rejection or necessity of revision of the manuscript. The paper has not already been published elsewhere and it is not currently being considered for publication elsewhere. If accepted, Karaelmas Science and Engineering Journal have exclusive license to publish. Review process is three months.

THE REFEREE PROCESS

Manuscripts that do not comply with the journal's guidelines will be returned to the authors without scientific evaluation. Articles submitted in accordance with the journal's guidelines are reviewed by the Editor-in-Chief or Assistant Editor, who will appoint them to referees. The review process is one-blind. The Editor writes the decision letter in line with the recommendations of the referees, the opinions of the field editors and the contribution of the publication to the literature. All unexamined manuscripts are returned within 10 days, and the decision letters of the manuscripts are sent within 3-6 months.

PRESENTATION

Papers should be submitted online.

The submitted articles should consist of four separate files: **"Cover Page", "Blind Article-Full Text", "Plagiarism Report"** and **"Copyright Transfer Form"**. Articles should be sent to Karaelmas Science and Engineering Journal via https://dergipark.org.tr/tr/login

WRITING RULES

Manuscripts should be written double space on A4 sized typing paper with 2.5 cm all margins, with 1.5 line spacing and justified on both sides. Please click on the link to access the writing rules of our journal.

https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen/writing-rules

- Text should be prepared using Microsoft Word with Times New Roman font and 12 point size. All text should be in black and white.
- All lines should be numbered continuously (including figures, tables and references). Page numbers should be placed in the bottom middle of the pages.
- The author's information should not be given due to blind refereeing, in the Full Text. Author's information should be on the Cover Page.
- Full text should be consist of Turkish Abstract, English Abstract, Introduction, Materials and method(s) (Area descriptions, Study materials, e.g. should be cited as subheadings), Results and Discussion, Conclusion and Suggestions, and References.
- Latin expression should be typed in italics.
- Full text should not exceed 30 pages including references.

Cover Page

The Cover Page should be a separate Microsoft Word file. Title, full name of all author, institutions and ORCIDs on Cover Page; Contact address and e-mail address of the responsible author should be given.

The Plan of Cover Page

- The article type should be write (Research article, review article, technical note, etc.). The article type should be centered at the top of the page.
- Turkish and English title
- Author's names and addresses: All Authors full names must be written as lower case with bold 12 font size in the middle. After authors name and surnames, authors addresses should be stated with superscript numbers (e.g. 1 2 3). Corresponding author's full name should be marked with an asteriks (*). All authors addresses must be typed with lower case 12 font in the center. The corresponding author's contact address and e-mail address should be given, and University, Faculty, Department, City and Country should be specified, respectively. Names of institutions and cities each authors also must be stated.
- Corresponding author's name, address and e-mail address
- Short title
- ORCIDs of all authors (Authors' ORCIDs should be added as footnotes.)
- Ethics Committee Decision should be attached to all studies that require ethics.

  https://trdizin.gov.tr/wp-content/uploads/2022/04/TRDizin_etik_ilkeleri_akis_semasi.pdf

The Plan of the Full Text Page

The first page is the Summary Page. The plan of the Summary Page should be as follows (Table 1):

Karaelmas Science and Engineering Journal / Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi
Journal home page / Dergi web sayfası: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen

Table 1: The Plan of Full Text Page

The Plan of the Full Text Page	
English Title (12 punto)	*Turkısh Title (İtalik 12 punto)*
Abstract (12 punto)	Öz (12 punto)
Keywords (12 punto)*	Anahtar Kelimeler (12 punto)

**Of the keywords, only the first letter of the first keyword should be capitalized and the first letters of the others should be lowercase.*

The title: The title should be as short as possible, but give adequate information regarding the contents. Title must be written on the center with bold 12 font size. The first letter must be capital and the others must be written as lower case.

Abstract and Keywords: A brief, informative English and Turkish abstract, not exceeding 250 words, should be typed in 12 font size. Immediately following the abstract, authors should provide 3-5 English and Turkish keywords or phrases that reflect content of the article. Keywords should be given in alphabetical order. Only the first letter of the first keyword should be capitalized, the first letters of the others should be lowercase. Keywords must be separated by commas and followed by a space of one character.

The Introduction section should be started by leaving a line in between after the keywords. In full texts, the main headings in the article and subheadings, if any, should be understandable. Main text headings should be left aligned, only the first letter of the first word should be capitalized and bold. Subheadings should be written in 12 points and italic. Main and sub-headings should be numbered.

Introduction: This section should include the topic and importance of the article and prior works.

Material and Methods: The methods and techniques applied should be understandable. It should be supported by previous references. Statistical models and methods of analysis should be clearly stated.

Results and Discussion: The results contain only findings, no writing comment, and the results should be supported by figures and tables if necessary. The results should be compared with the relevant literatüre, and compare with other studies and discuss similarity and distinction.

Conclusion and Suggestions: Results should be summarized and recommendations made.

Acknowledgments: It should include thanks to the people and organizations supported the research.

Any conflict of interest, financial support, author's statement of contribution, donation and other editorial (statistical analysis, English/Turkish evaluation) and/or technical assistance should be presented at the end of the text.

Author contribution: Author A: Planned and designed the study, Author B: Gathered and analyzed data about the study, Author C: Wrote the article by analyzing the study.

Ethics committee approval: If available, ethics committee approval should be added. The institution giving the ethics committee approval, approval number and date should be written on it.

References: Unpublished information should not be given as a source. However, the theses that have been completed and passed the jury can be given as a source. References should be given at the end of the article in alphabetical order (according to the surnames of the authors), author's names and surnames, and the publication date of the article should be written in bold.

Plagiarism report: The general similarity rate of the submitted articles **should not exceed 20%**, excluding the bibliography. Any plagiarizing article will be automatically rejected.

Copyright transfer agreement: The form opened by clicking on the "Copyright Transfer Form" link on the page should be filled, signed and uploaded. Please click on the link to access the copyright transfer agreement of our journal.
https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen/page/10931

The use of sources in the text is given below:

(The examples have been prepared based on the APA 7th edition style.)

1. In Turkish Paper:

- One author (Aliskan, 2021). Two authors (Yıldırım & Topaloğlu 2018).
- In the case of multiple authors, they should be cited as (Yılmaz et al., 2007, Erdem et al., 2022), multiple publications by same author(s) should be written as (Erdem et al., 2022a; Erdem et al., 2022b).
- If any source is cited: According to Karahan & Çölgeçen (2021), it was as.....; according to Yilmaz et al. (2007); it should be written.

2. In English Paper:

- One author (Aliskan, 2021). Two authors (Yıldırım & Topaloğlu 2018). If any source is cited: According to Ünlü & Gerçek (2023), it should be written.
- In the case of multiple authors they should be cited as (Evans et al., 2023; Landen et al., 2021). If any source is cited: According to Landen et al. (2021)… it should be written.
- References should be given at the end of the text according to alphabetical order of the first authors surname.
- In Turkish and English articles, software programs should be given as (IBM SPSS Statistics 2016) by specifying the name and year in the text.

The references at the end of the text are as follows:

References should be given at the end of the text according to alphabetical order.

Article:

One author

- Işınkaralar, K. (2022). Theoretical removal study of gas BTEX onto activated carbon produced from *Digitalis purpurea* L. biomass. *Biomass Convers. Biorefin.*, *12*(9): 4171-4181. https://doi.org/10.1007/s13399-022-02558-2

Two authors

- Eker Şanli, G., & Tasdemir, Y. (2022). Accumulations and temporal trends of polychlorinated biphenyls (PCBs) in olive tree components. *Environmental Geochemistry and Health*, *44*. https://doi.org/10.1007/s10653-021-01046-2
- Yaralı, O., & Duru, H. (2016). Investigation into effect of scratch length and surface condition on Cerchar abrasivity index. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *60*, 111–120. https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.08.005

Multiple authors

- Erdem, S., Gonca, E., Başoğlu, G., & Aydemir, E. (2022). İskemi sonrası verilen kannabidiol reperfüzyon ile uyarılan aritmilere karşı koruyucu etkilidir. *Medical Journal of Western Black Sea*, *6*(1), Article 1. https://doi.org/10.29058/mjwbs.1016783
- Erkaymaz, O., Senyer Yapici, Í., & Uzun Arslan, R. (2021). Effects of obesity on time-frequency components of electroretinogram signal using continuous wavelet transform. *Biomedical Signal Processing and Control*, *66*, 102398. https://doi.org/10.1016/j.bspc.2020.102398
- Öztürk, Ş., Hazer Y., Kaşkatepe, B., Çölgeçen, H., & Kulak, M. (2023). Kırmızı kantaron (*Hypericum capitatum*) bitkisi: fenolik içeriklerinin, antioksidan aktivitesinin belirlenmesi ve klinik izolatlar üzerinde antimikrobiyal etkinliğinin araştırılması. *Batı Karadeniz Tıp Dergisi*, *7*(1), 57-65. https://doi.org/10.29058/mjwbs.1251370

If two or more works by the same author are used, references should be listed in chronological order.

- Berndt, T. J. (2022).
- Berndt, T. J. (2023).

If there are more than seven authors, the names of the first six authors are listed, followed by three dots and the name of the last author is added. No more than seven names should be included.

- Miller, F.H., Choi, M.J., Angeli, L.L., Harland, A.A., Stamos, J.A., Thomas, S.T., . . . & Rubin, L.H. (2009). Web site usability for the blind and low-vision user. *Technical Communication*, *57*: 323-335. https://doi.org/10.1080/10447310701771472

Karaelmas Science and Engineering Journal / Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi
Journal home page / Dergi web sayfası: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen

Book:

- Reşat, U. (2001). Uygulamalı jeoteknik bilgiler. 4. Basım, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Nitelik Matbaacılık, Ankara, 385 s.
- Sanford, R.J. (2003). Principles of fracture mechanics, Prentice Hall, Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, USA, 404 pp.

Chapter:

- Atar, H., & Çölgeçen, H. (2020). Chapter 7-Bioactive compounds of oregano seeds. In V. R. Preedy & R. R. Watson (Eds.), *Nuts and Seeds in Health and Disease Prevention (Second Edition)* (pp. 73–77). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818553-7.00007-3

Report:

- Makarewicz, J.C., Lewis, T., & Bertram, P. (1995). Epilimnetic phytoplankton and zooplankton biomass and species composition in Lake Michigan, 1983-1992. U.S. EPA Great Lakes National Program, Chicago, IL. EPA 905-R-95-009.

Conference, Symposium:

- Karahan, H., & Çölgeçen, H. (2021). Uptake of silver nanoparticles in natural tetraploid *Trifolium pratense* L. calli. 10th International Molecular Biology and Biotechnology Congress, s. 56, Turkey.

Internet:

If any information is taken from any website (except for articles taken from the internet and published in journals), the name of the website and the title of the website should be written in the references section.

Web page:

- TÜIK 2023. https://www.tuik.gov.tr/

Web document with author:

- Dawson, J., Smith, L., & Deubert, K. 31 Ekim 2002. http://studytrekk.lis.curtin.edu.au/

In press:

- Evans, M.A. (2023). Article Title. Journal. (DOI).

A Thesis:

- Duru, H. (2020). Geliştirilen cerchar aşındırıcılık deney aletiyle kayaçların spesifik çizme enerjisinin araştırılması. Doktora Tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, 175 s.

Software:

- SPSS Statistics 24.0. Software, IBM, United States.

Tables and Figures:

All tables and figures should be embedded in the text and must be numbered consecutively throughout the paper (Table 1, Table 2 and 3, Figure 1, Figure 2 and 3, Figure 4). The numbers and headings of figures must be written below the figure. The numbers and headings of tables should be written the top of the table. References in the text should be in Table 1, Figure 1. Graphs, Figures and photos must be given in the text as JPEG, PNG or TIFF(min. 300 dpi). Bars must be used to show magnification in photos.

Standard errors or deviations should be cited as (e.g., 1.42 ± 1.36), statistically data should data must be given as (e.g., 731.2ab) in the table. The column title of standard errors or deviations must be cited as (means ± SD, or means ± SE).

Equations:

Mathematical expressions should be written by an "Equation Editor" (Word format) in 12 point size, and Cambria Math. Indices font should be 12 point size. Each equation in text should be numbered in parenthesis ( ).

Mathematical equations should be written as below:

$$V_t = \frac{d_p^2(\rho_p - \rho_g)V_i^2}{18\,\mu R} \quad (1)$$

Attachments:

All appendices should be written on a separate page and numbered with Roman numerals. Authors who will submit publications in the area of mathematics should specify the subject classification number (AMS-Mathematical Subject Classification Number).

Symbols and Units:

Metric systems or SI units should be used (kPa, kN/m^3, g/cm^2, m/sn, g/m^3, e.g.). Current abbreviations can be used without explanation; others must be explained. Use " % " only with numerals and in tables and figures. Close up space to numerals (e.g. 60%). Use the dot for decimal units (e.g. 10.26).

Abbreviations:

Use the following abbreviations for time: s (second), min (minute), h (hour), wk (week), yr (year), mo (month), add "s" to create plurals (e.g. wks). The day, month and year should be written in full without any abbreviations (19 May 2023).

Numbers:

Spell out numbers at the beginning of sentence. Spell out the numbers one through nine. 10 and up are always cited as Arabic numerals. All numbers <1 must be preceded by a zero (e.g. P<0.05).

Footnotes:

In case of statistical data in tables, use footnotes to define or clarify column headings or specific datum with in data field (*P<0.05; ** P<0.01; *** P<0.001; NS, not significant). For submitting first namely author's manuscripts should not exceed three folds in the same issue. Authors when submit the four folds manuscripts, they will be publish in another issues.

CHECKLIST OF THE MANUSCRIPT

Before submitting of your paper (and other writings as applicable), please make sure that the following requirements have all been made:

- "Cover Page", "Blind Article-Full Text", "Plagiarism Report" and "Copyright Transfer Form" are enclosed
- Spell check and grammar check have been performed
- Entire paper is 1.5-spaced including abstract, tables, captions, references
- Margins are 2.5 cm each margin
- Font type is Times new roman and Font size is 12 point
- The headings in the text is left aligned, 12 point and bold
- Names of all authors are written in full (not abbreviated)
- Address is given
- Title is in title case 12 point and bold
- Abstract and keywords are given
- References are typed according to the instructions, and listed alphabetically
- Decimals are shown by a full stop (e.g., 10.25)
- Percent signs appear without a space after the number (e.g., 63%, %10)
- Figures are maximum 16x20 cm; minimum 8 cm wide
- The numbers of the tables (Table 1, Table 2, Table 3 etc.) are given in order in the text.
- Original figures are enclosed
- Figures are prepared according to the instructions
- Figures are maximum 16x20 cm; minimum 8 cm wide, min 300 dpi
- The numbers of the tables (Figure 1, Figure 2, Figure 3 etc.) are given in order in the text.
- All pages and line are numbered

Please click on the link to access a sample of the article written according to the spelling rules of our journal.

Karaelmas Science and Engineering Journal / Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi
Journal home page / Dergi web sayfası: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen

ETHICAL PRINCIPLES

Official journal of Zonguldak Bülent Ecevit University, Karaelmas Science and Engineering Journalis a peer-reviewed journal which aims to reach all national and international institutions and individuals free of charge.

In the scientific articles sent to our journal, the recommendations of ICMJE (International Committee of Medical Journal Editors) and the International Standards of COPE (Committee on Publication Ethics) for Editors and Authors are taken into consideration.

All claims and finalized processes regarding ethical violations of our authors are under their own responsibility, and in case of ethical violations, the article is automatically canceled.

Ethical Guidelines for Peer Reviewers

Peer Reviewers,

- respect the confidentiality of the manuscript, do not discuss it and do not reveal any details of it.
- inform the editor about any conflict of interest.
- provide objective and constructive explanations for their suggestions.
- do not allow the decisions related to the article to be influenced by the subject of the manuscript or the way of writing.
- do not contact the authors directly and request their previous articles unless there is a strong scientific reason.
- do not duplicate any part of the article or information reviewed in any of their own work before it is published by the authors.
- agree to accept the reviews only within their expertise and finish the review process within a reasonable time.
- do not intentionally prolong the review process which leads to a delay for the publication of the article.
- use a language refrained from being hostile and avoids making derogatory personal comments.
- destroy the manuscript and associated material after reviewing.

https://publicationethics.org/files/Ethical_guidelines_for_peer_reviewers_0.pdf

Ethical Guidelines for Authors

Authors and co-authors,

- meet the following criteria for authorship defined by International Committee of Medical Journal Editors (ICMJE);
  a. Substantial contributions to the conception or design of the work; or the acquisition, analysis, or interpretation of data for the work;
  b. Drafting the work or revising it critically for important intellectual content;
  c. Final approval of the version to be published;
  d. Agreement to be accountable for all aspects of the work in ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.
- ensure that submitted articles are original and are not sent to different publishers.
- are responsible for any falsification, alteration or plagiarism which are defined as abusing research before or during the research or while reporting the findings of it.
- inform the editor if there is any conflict of interest in the submitted articles.
- inform the editor for correction or withdrawal if any mistake is noticed after publication or during the process of pre-control or evaluation.
- do not suggest reordering, adding or dropping author names after article submission.
- state, if the research requires the decision of the ethics committee, that they have the ethics committee approval with the name of the ethics committee and the date and number of the decision in the first and last page of the article and the methods section, also upload the ethics committee approval document to the system along with the application of the article.
- state in the article that they have the consent form for the case reports.
- comply with the copyright regulations for the ideas and works of art used in the article.
- provide statements for Author Contribution, Conflict of Interest, Disclosure and if necessary, Acknowledgements.

http://www.icmje.org/icmje-recommendations.pdf

https://www.ease.org.uk/wp-content/uploads/2018/11/doi.10.20316.ESE_.2018.44.e1.tr_.pdf

Ethical Guidelines for Editors

Editors:

- The readers should be informed about who provides financial support to the study or other scientific studies and whether there is any role of sponsors in the study or publication, and if there is any, what the contribution is.
- Editors should base their decisions of acceptance or rejection on the importance, originality and clarity of the article, validity of study and its relevance to the remit of the journal.
- Editors should not reverse decisions to accept submissions unless serious problems are identified with the submission.
- New editors should not overturn decisions to publish submissions made by the previous editor unless serious problems are identified.
- A description of peer review processes should be published, and editors should be ready to justify any important deviation from the described processes.
- Journals should have a declared mechanism for authors to appeal against editorial decisions.
- Editors should publish guidance to authors on everything that is expected of them. This guidance should be regularly updated and should refer or link to this code.
- Editors should state the authorship criteria suggested by International Committee of Medical Journal Editors (ICMJE).

Karaelmas Science and Engineering Journal / Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi
Journal home page / Dergi web sayfası: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen

- Editors should provide guidance to reviewers on everything that is expected of them including the need to handle submitted material in confidence. This guidance should be regularly updated and should refer or link to this code
- Editors should require reviewers to disclose any potential competing interests before agreeing to review a submission.
- Editors should have systems to ensure that peer reviewers' identities are protected unless they use an open review system that is declared to authors and reviewers.
- Editors should provide new editorial board members with guidelines on everything that is expected of them and should keep existing members updated on new policies and developments.
- Editors should make decisions on which articles to publish based on quality and suitability for the journal and without interference from the journal owner/publisher.
- Editors should have a written contract(s) setting out their relationship with the journal's owner and/or publisher. The terms of this contract should be in line with the COPE Code of Conduct for Journal Editors.
- Editors should strive to ensure that peer review at their journal is fair, unbiased and timely.
- Editors should have systems to ensure that material submitted to their journal remains confidential while under review.
- Editors should take all reasonable steps to ensure the quality of the material they publish, recognizing that journals and sections within journals will have different aims and standards.

https://publicationethics.org/files/Code%20of%20Conduct.pdf

Karaelmas Science and Engineering Journal / Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi
Journal home page / Dergi web sayfası: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen

PUBLICATION ETHICS

The ethics statement of the Karaelmas Science and Engineering Journalis is based on the Code of Conduct guidelines of the Committee on Publication Ethics (COPE), available at www.publicationethics.org.

This journal follows the COPE Code of Conduct and Best Practice Guidelines for Journal Editors and the Code of Conduct for Journal Publishers.

Duties of Editors

Fair play and editorial independence

Editors evaluate submitted manuscripts exclusively on the basis of their academic merit (importance, originality, study's validity, clarity) and its relevance to the journal's scope, without regard to the authors' race, gender, sexual orientation, ethnic origin, citizenship, religious belief, political philosophy or institutional affiliation. Decisions to edit and publish are not determined by the policies of governments or any other agencies outside of the journal itself. The Editor-in-Chief has full authority over the entire editorial content of the journal and the timing of publication of that content.

Confidentiality

Editors and editorial staff will not disclose any information about a submitted manuscript to anyone other than the corresponding author, reviewers, potential reviewers, other editorial advisers, and the publisher, as appropriate.

Disclosure and conflicts of interest

Editors and editorial board members will not use unpublished information disclosed in a submitted manuscript for their own research purposes without the authors' explicit written consent. Privileged information or ideas obtained by editors as a result of handling the manuscript will be kept confidential and not used for their personal advantage. Editors will recuse themselves from considering manuscripts in which they have conflicts of interest resulting from competitive, collaborative, or other relationships/ connections with any of the authors, companies or institutions connected to the papers; instead, they will ask another member of the editorial board to handle the manuscript.

Publication decisions

The editors ensure that all submitted manuscripts being considered for publication undergo peer-review by at least two reviewers who are expert in the field. The Editor-in-Chief is responsible for deciding which of the manuscripts submitted to the journal will be published, based on the validation of the work in question, its importance to researchers and readers, the reviewers' comments, and such legal requirements as are currently in force regarding libel, copyright infringement and plagiarism. The Editor-in-Chief may confer with other editors or reviewers in making this decision.

Involvement and cooperation in investigations

Editors (in conjunction with the publisher and/or society) will take responsive measures when ethical concerns are raised with regard to a submitted manuscript or published paper. Every reported act of unethical publishing behaviour will be looked into, even if it is discovered years after publication. Editors follow the COPE Flowcharts when dealing with cases of suspected misconduct. If, on investigation, the ethical concern is well-founded, a correction, retraction, expression of concern or other note as may be relevant, will be published in the journal.

Duties of Reviewers

Contribution to editorial decisions

Peer review assists editors in making editorial decisions and, through editorial communications with authors, may assist authors in improving their manuscripts. Peer review is an essential component of formal scholarly communication and lies at the heart of scientific endeavour.

Promptness

Any invited referee who feels unqualified to review the research reported in a manuscript or knows that its prompt review will be impossible should immediately notify the editors and decline the invitation to review so that alternative reviewers can be contacted.

Confidentiality

Any manuscripts received for review are confidential documents and must be treated as such; they must not be shown to or discussed with others except if authorized by the Editor-in-Chief (who would only do so under exceptional and specific circumstances). This applies also to invited reviewers who decline the review invitation.

Standards of objectivity

Reviews should be conducted objectively and observations formulated clearly with supporting arguments so that authors can use them for improving the manuscript. Personal criticism of the authors is inappropriate.

Acknowledgement of sources

Reviewers should identify relevant published work that has not been cited by the authors. Any statement that is an observation, derivation or argument that has been reported in previous publications should be accompanied by the relevant citation. A reviewer should also notify the editors of any substantial similarity or overlap between the manuscript under consideration and any other manuscript (published or unpublished) of which they have personal knowledge.

Disclosure and conflicts of interest

Any invited referee who has conflicts of interest resulting from competitive, collaborative, or other relationships or connections with any of the authors, companies or institutions connected to the manuscript and the work described therein should immediately notify the editors to declare their conflicts of interest and decline the invitation to review so that alternative reviewers can be contacted.

Unpublished material disclosed in a submitted manuscript must not be used in a reviewer's own research without the express written consent of the authors. Privileged information or ideas obtained through peer review must be kept confidential and not used for the reviewer's personal advantage. This applies also to invited reviewers who decline the review invitation.

Duties of Authors

Reporting standards

Authors of original research should present an accurate account of the

Karaelmas Science and Engineering Journal / Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi
Journal home page / Dergi web sayfası: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen

work performed and the results, followed by an objective discussion of the significance of the work. The manuscript should contain sufficient detail and references to permit others to replicate the work. Review articles should be accurate, objective and comprehensive, while editorial 'opinion' or perspective pieces should be clearly identified as such. Fraudulent or knowingly inaccurate statements constitute unethical behaviour and are unacceptable.

Data access and retention

Authors may be asked to provide the raw data of their study together with the manuscript for editorial review and should be prepared to make the data publicly available if practicable. In any event, authors should ensure accessibility of such data to other competent professionals for at least 10 years after publication (preferably via an institutional or subject-based data repository or other data centre), provided that the confidentiality of the participants can be protected and legal rights concerning proprietary data do not preclude their release.

Originality and plagiarism

Authors should ensure that they have written and submit only entirely original works, and if they have used the work and/or words of others, that this has been appropriately cited. Publications that have been influential in determining the nature of the work reported in the manuscript should also be cited. Plagiarism takes many forms, from "passing off" another's paper as the author's own, to copying or paraphrasing substantial parts of another's paper (without attribution), to claiming results from research conducted by others. Plagiarism in all its forms constitutes unethical publishing behaviour and is unacceptable.

Multiple, duplicate, redundant or concurrent submission/publication

Papers describing essentially the same research should not be published in more than one journal or primary publication. Hence, authors should not submit for consideration a manuscript that has already been published in another journal. Submission of a manuscript concurrently to more than one journal is unethical publishing behaviour and unacceptable.

The publication of some kinds of articles (such as clinical guidelines, translations) in more than one journal is sometimes justifiable, provided that certain conditions are met. The authors and editors of the journals concerned must agree to the secondary publication, which must reflect the same data and interpretation of the primary document. The primary reference must be cited in the secondary publication.

Authorship of the manuscript

Only persons who meet these authorship criteria should be listed as authors in the manuscript as they must be able to take public responsibility for the content: (i) made significant contributions to the conception, design, execution, data acquisition, or analysis/interpretation of the study; and (ii) drafted the manuscript or revised it critically for important intellectual content; and (iii) have seen and approved the final version of the paper and agreed to its submission for publication. All persons who made substantial contributions to the work reported in the manuscript (such as technical help, writing and editing assistance, general support) but who do not meet the criteria for authorship must not be listed as an author, but should be acknowledged in the "Acknowledgements" section after their written permission to be named as been obtained. The corresponding author should ensure that all appropriate coauthors (according to the above definition) and no inappropriate coauthors are included in the author list and verify that all coauthors have seen and approved the final version of the manuscript and agreed to its submission for publication.

Disclosure and conflicts of interest

Authors should—at the earliest stage possible (generally by submitting a disclosure form at the time of submission and including a statement in the manuscript)—disclose any conflicts of interest that might be construed to influence the results or their interpretation in the manuscript. Examples of potential conflicts of interest that should be disclosed include financial ones such as honoraria, educational grants or other funding, participation in speakers' bureaus, membership, employment, consultancies, stock ownership, or other equity interest, and paid expert testimony or patent-licensing arrangements, as well as non-financial ones such as personal or professional relationships, affiliations, knowledge or beliefs in the subject matter or materials discussed in the manuscript. All sources of financial support for the work should be disclosed (including the grant number or other reference number if any).

Acknowledgement of sources

Authors should ensure that they have properly acknowledged the work of others, and should also cite publications that have been influential in determining the nature of the reported work. Information obtained privately (from conversation, correspondence or discussion with third parties) must not be used or reported without explicit, written permission from the source. Authors should not use information obtained in the course of providing confidential services, such as refereeing manuscripts or grant applications, unless they have obtained the explicit written permission of the author(s) of the work involved in these services.

Hazards and human or animal subjects

If the work involves chemicals, procedures or equipment that have any unusual hazards inherent in their use, the authors must clearly identify these in the manuscript. If the work involves the use of animals or human participants, the authors should ensure that all procedures were performed in compliance with relevant laws and institutional guidelines and that the appropriate institutional committee(s) has approved them; the manuscript should contain a statement to this effect. Authors should also include a statement in the manuscript that informed consent was obtained for experimentation with human participants. The privacy rights of human participants must always be observed.

Peer review

Authors are obliged to participate in the peer review process and cooperate fully by responding promptly to editors' requests for raw data, clarifications, and proof of ethics approval, patient consents and copyright permissions. In the case of a first decision of "revisions necessary", authors should respond to the reviewers' comments systematically, point by point, and in a timely manner, revising and re-submitting their manuscript to the journal by the deadline given.

Fundamental errors in published works

When authors discover significant errors or inaccuracies in their own published work, it is their obligation to promptly notify the journal's editors or publisher and cooperate with them to either correct the paper in the form of an erratum or to retract the paper. If the editors or publisher learns from a third party that a published work contains a significant error or inaccuracy, then it is the authors' obligation to promptly correct or retract the paper or provide evidence to the journal editors of the correctness of the paper.

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi / Karaelmas Science and Engineering Journal
Dergi web sayfası / Journal home page: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen

İÇİNDEKİLER

Araştırma Makaleleri

Sabulina mesogitana subsp. flaccida Endemiğinin Tohum ve Polen Mikromorfolojisi **1**
Havva Karahan, Yasin Hazer, Gamze Erikci, Tuğçe Koç, Hatice Çölgeçen

Ölü Son Duvarının Dairesel Su Alma Ağzı Membasındaki Hız Dağılımına Etki Ettiği Limit Mesafenin İncelenmesi **8**
Efe Barbaros, Kerem Taştan

Yapay Zeka Benimsenmesi, Ticaretin Kolaylaştırılması ve Tahmini Ticaret Maliyeti Azaltma Potansiyeli Arasındaki İlişki: Bölgesel Bir Keşif Analizi **21**
Hakan Kaya

Karbonat Kökenli Doğal Taşların Fizikomekanik Özellikleri ile Katrak Makinelerinde Kesilebilirlik Performansı Arasındaki İlişkinin Analizi **34**
Aydin Shaterpour-Mamaghani, Deniz Tumaç

Piretroid İnsektisit Deltametrinin Doza Bağlı Akut Toksisitesinin Allium cepa Test Modeli Kullanılarak Değerlendirilmesi **47**
Dilek Çavuşoğlu, Kürşat Çavuşoğlu

Elektrikli Araçların Enerji Tüketimi için Modelleme ve Tahmin Yöntemleri **61**
Pınar Kıramanlıoğlu, Begüm Erol, Mehmet Mutlu Yenisey

Zonguldak Kömüründen Üretilen Aktif Karbonların Yüzey Alanı ve Gözenek Boyutunun H_2 Adsorpsiyonu İle İlişkisinin Araştırılması **78**
Atakan Toprak

İki Aşamalı Transfer Learning Yaklaşımıyla Yüz İfadelerinden Duygu Analizi: Derin Öğrenme Modellerinin Karşılaştırmalı İncelenmesi **88**
Mustafa Furkan Keskenler

Gecikmeli Diferansiyel Denklemin Nümerik Çözümü İçin Etkili Bir Yaklaşım **106**
Erkan Çimen, Neslişah Tekin

Jordania cherlerioides (Bornm.) Rabeler & Madhani' nin Ekstraksiyon Yöntemine Bağlı Fenolik Profili ve Antioksidan Aktivitesi **117**
Derya Altay, Murat Koç

Akıllı Şehir Uygulamaları İçin Çok Katmanlı Algılayıcı ve SHAP Analizi ile Bölgesel Yeşil Hidrojen Üretim Potansiyelinin Değerlendirilmesi **129**
Abdulsamed Güneş, Orhan Yaman, Elif Feyza Sarı, Hasan Yetiş

Türkiye'nin Karasu Bölgesinde Erozyon Kaynaklı Kıyı Değişiklikleri: GNSS ve Uzaktan Algılama Verilerinden Elde Edilen Yeni Kanıtlar **140**
Kurtuluş Sedar Görmüş

Mikrodenetleyici ile Yazılım Kontrollü İndüksiyon Isıtma Sistemi Tasarımı **155**
Kenan Altun, Didem Altun

Karacaören II Baraj Gölü (Türkiye)'nde Fizikokimyasal Parametrelerin ve Su Kalite İndeksinin (WQI) Mevsimsel Değişimi **166**
Selda Tekin-Özan

Karaelmas Science and Engineering Journal / Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi
Journal home page / Dergi web sayfası: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen

CONTENTS

Research Articles

The Seed and Pollen Micromorphology of the Endemic Sabulina mesogitana subsp. flaccida 1
Havva Karahan, Yasin Hazer, Gamze Erikci, Tuğçe Koç, Hatice Çölgeçen

Effect of a Dead-End Wall on Velocity Distribution Upstream of a Circular Intake: Investigation of the Limiting Distance 8
Efe Barbaros, Kerem Taştan

The Association Between Artificial Intelligence Adoption, Trade Facilitation, and Estimated Trade Cost Reduction Potential: A Regional Qualitative-Quantitative Exploratory Analysis 21
Hakan Kaya

Analysis of the Relationship Between the Physicomechanical Properties of Carbonate-Based Natural Stones and their Sawability Performance in Gangsaws 34
Aydin Shaterpour-Mamaghani, Deniz Tumaç

Evaluation of Dose-Dependent Acute Toxicity of the Pyrethroid Insecticide Deltamethrin Using the Allium cepa Test Model 47
Dilek Çavuşoğlu, Kürşat Çavuşoğlu

Modeling and Prediction Methods for Energy Consumption of Electric Vehicles 61
Pınar Kıramanlıoğlu, Begüm Erol, Mehmet Mutlu Yenisey

Investigation of The Relationship Between Surface Area and Pore Size Of Activated Carbons Produced From Zonguldak Coal And H_2 Adsorption 78
Atakan Toprak

Emotion Analysis from Facial Expressions Using a Two-Stage Transfer Learning Approach: A Comparative Study of Deep Learning Models 88
Mustafa Furkan Keskenler

An Efficient Approach for Numerical Solution of Delay Differential Equation 106
Erkan Çimen, Neslişah Tekin

Extraction-Dependent Phenolic Profile and Antioxidant Activity of Jordania cherlerioides (Bornm.) Rabeler & Madhani 117
Derya Altay, Murat Koç

Assessment of Regional Green Hydrogen Production Potential Using Multilayer Sensor and SHAP Analysis for Smart City Applications 129
Abdulsamed Güneş, Orhan Yaman, Elif Feyza Sarı, Hasan Yetiş

Erosion-Induced Coastal Changes in Karasu, Türkiye: New Evidence from GNSS and Remote Sensing Data 140
Kurtuluş Sedar Görmüş

Design of Software Controlled Induction Heating System with Microcontroller 155
Kenan Altun, Didem Altun

Seasonal Variations of Physicochemical Parameters and Water Quality Index (WQI) in Karacaören II Dam Lake (Türkiye) 166
Selda Tekin-Özan

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi
Dergi web sayfası: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen
DOI: 10.7212/karaelmasfen.1772665

Araştırma Makalesi
Geliş tarihi / Received : 26.08.2025
Kabul tarihi / Accepted : 01.10.2025

Sabulina mesogitana subsp. *flaccida* Endemiğinin Tohum ve Polen Mikromorfolojisi

The Seed and Pollen Micromorphology of the Endemic Sabulina mesogitana subsp. flaccida

Havva Karahan[1*], Yasin Hazer[2], Gamze Erikci[1], Tuğçe Koç[1], Hatice Çölgeçen[1]

[1]Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Zonguldak, Türkiye
[2]Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi, Farmasotik Botanik Bölümü, Zonguldak, Türkiye

Öz

Bu çalışmada Türkiye'de doğal olarak yetişen *Sabulina mesogitana* subsp. *flaccida* endemik türünün tohum ve polen morfolojisi ışık ve elektron mikroskobu ile incelenmiş; tohum ve polenlerinin in vitro koşullarda çimlendirilmesi, polen canlılığının belirlenmesi, polen tüpü oluşumunun gözlemlenmesi ve tohum ile polen mikromorfolojisinin araştırılması amaçlanmıştır. Türkiye'de korunması öncelikli 9 orman sıcak noktadan biri olarak nitelendirilen Küre Dağları Milli Parkı ve onun tampon bölgesini de içine alan Batı Küre Dağlarından toplanan *S. mesogitana* subsp. *flaccida*'nın tohumlarının in vitro koşullarda çimlendirilmesi amacıyla farklı sükroz konsantrasyonları ve pH değerlerinde Murashige ve Skoog (MS) besin ortamları hazırlanmıştır. In vitro tohum çimlendirme denemelerinde en yüksek çimlenme oranı 20 g/L sükroz içeren ve pH 5.8 olan ortamda %34.3 olarak belirlenmiştir. Canlı polen sayısı, polen tüpü oluşumu ve polen tüpü uzunluğunu belirlemek amacıyla farklı sükroz konsantrasyonları denenmiş sonuç olarak en yüksek çimlenme oranı %30 ile 20 g/L sükroz içeren ortamda gerçekleşmiştir. Çalışmada ayrıca türün polen fertilitesi ortalama %88 olarak tespit edilmiştir. Tohum ve polen yüzey morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile değerlendirilmiş; tohumların ventral ve dorsal yüzeylerinin papilli ve tuberküllü yapıda, renklerinin koyu kahverengi-siyah; polenlerin ise sferoidal formda ve polen ornamentasyonlarının mikroekinat-mikroperforat özellikte olduğu belirlenmiştir. Morfolojik karakterler, bitki taksonomisinde sınıflandırmaya katkı sağlayan önemli veriler sunduğundan, endemik *S. mesogitana* subsp. *flaccida* türüne ait tohum ve polen çimlenme verileri bu çalışma ile ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Endemik tür, in vitro polen çimlendirme, mikromorfoloji, *Sabulina mesogitana* subsp. *flaccida*, tohum

Abstract

In this study, seed and pollen morphology of the endemic *Sabulina mesogitana* subsp. *flaccida*, which naturally occurs in Turkey, was examined by light and electron microscopy. The objectives included in vitro germination of seeds, assessment of pollen viability, observation of pollen tube formation, and investigation of seed and pollen micromorphology. Seeds of *S. mesogitana* subsp. *flaccida*, collected from the Western Taurus Mountains, including the Küre Mountains National Park, one of the nine forest priority hotspots for conservation in Turkey, along with its buffer zone, were germinated in vitro using Murashige and Skoog (MS) media prepared with different sucrose concentrations and pH. The highest germination rate was observed at 34.3% in the medium containing 20 g/L sucrose and pH 5.8. To determine pollen viability, pollen tube formation, and pollen tube length, different sucrose concentrations were tested; the highest germination rate achieved was 30% in the medium containing 20 g/L sucrose. Additionally, the pollen fertility rate of the species was determined to be approximately 88%. Seed and pollen surface morphology was evaluated by scanning electron microscopy (SEM); seed surfaces on ventral and dorsal sides were found to be papillate and tuberculate, with dark brown to black coloration, while pollen grains exhibited a spherical shape with micro-echinate and micro-perforate ornamentation. Since morphological characteristics provide important data for taxonomic classification, this study presents seed and pollen germination data for the endemic *S. mesogitana* subsp. *flaccida* species.

Keywords: Endemic species, in vitro pollen germination, micromorphology, *Sabulina mesogitana* subsp. *flaccida*, seed

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: havva01030@gmail.com

Havva Karahan orcid.org/0000-0003-0518-6265
Yasin Hazer orcid.org/0000-0001-8870-0017
Gamze Erikci orcid.org/0009-0008-0188-8941
Tuğçe Koç orcid.org/0009-0000-7124-6735
Hatice Çölgeçen orcid.org/0000-0001-8246-4279

Bu eser "Creative Commons Alıntı-GayriTicari-4.0 Uluslararası Lisansı" ile lisanslanmıştır.

1. Giriş

Caryophyllaceae familyası karanfilgiller familyası olarak da bilinir ve yaklaşık 100 cins, 3000 türden oluşur (Ulukuş, 2018; Koç vd., 2019). Ülkemizde ise 35 cins ve 540'tan fazla tür ile temsil edilen familya, takson sayısı bakımından Türkiye florasında 3. sırada yer almakta olup familyanın tür çeşitliliği özellikle Akdeniz havzası ve İran–Turan fitocoğrafik bölgelerinde yoğunlaşmaktadır (Davis, 1967; Bittrich, 1993; Hernandez-Ledesma vd., 2015; Xu & Deng, 2017). Genellikle ılıman ya da sıcak-ılıman bölgelerde yayılış göstermekte, tek yıllık ya da çok yıllık, genellikle otsu nadiren küçük ağaçsı ya da çalımsı türlerden oluşmakta, çok soğuk ve kurak ortamlarda yetişebilme özelliğinden dolayı oldukça kozmopolit türler içerir (Hernandez-Ledesma vd., 2015). Bu türler süs bitkisi olarak, bununla birlikte bitkisel ilaçların hazırlanmasında ve baharat yapımında da kullanılmaktadır (Cowie, 2011).

Yapılan filogenetik araştırmalar sonucunda familya taksonları arasındaki evrimsel ilişkiler ortaya çıkarılmıştır. Dillenberger ve Kadereit (2014) bu grubun birkaç örneğini *Minuartia* s.l.'nin filogenetik analizine dahil etmiş ve plastid DNA varyasyonunu incelemiş olsalar da taksonlar arasındaki evrimsel tarih ve ilişkiler hala büyük ölçüde çözümsüz kalmaktadır (Lipánová vd., 2023). Bitki çeşitlenmesinde bir diğer güç, çevresel şartların çeşitli zorluklarına uyum sağlamasında üreme engellerinin artması olarak tanımlanan edafik izolasyona bağlı türleşmedir. Ağır kimyasal (ağır metaller, besin maddeleri veya pH) veya fiziksel koşullar (toprak nemi, sıcaklık) gibi aşırı edafik strese uyum sağlama, bitkilerde en güçlü adaptif tepkilere örnek olup bazen üreme izolasyonuyla da ilişkilidir. Kireçli topraklara, ağır metallerle kirlenmiş topraklara, tuzlu veya serpantinli topraklara hızlı adaptasyon örnekleri çeşitli bitki ailelerinde gösterilmiştir (Preite vd., 2019; Konecna vd., 2020; Cao vd., 2023). Sonuç olarak, *Caryophylloideae* Arn., *Alsinoideae* Burnett ve *Paronychioideae* A.St. alt ailelerine Eremogoneae Rabeler & WLWagner adlı yeni bir alt aile eklenmiştir (Harbaugh vd., 2010). *Minuartia* cinsi, morfolojik olarak diğer cinslerden üç stilus ve kapsül dişleri ile ayırt edilse de moleküler çalışmalar bu cinsin polifiletik olduğunu göstermiştir (Greenberg & Donoghue, 2011; Dillenberger & Kadereit, 2014; Mosyakin & Fedoronchuk, 2015). Dillenberger ve Kadereit (2014) tarafından yapılan cpDNA ve nrDNA analizleri, *Minuartia mesogitana* subsp. *flaccida*'nın *Sabulina* cinsinide kapsayan bir klad ile yakın ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Bu filogenetik bulgulara dayanarak, taksonun *Minuartia*'dan *Sabulina* cinsine aktarılması uygun görülmüş ve türün adı *Sabulina mesogitana* subsp. *flaccida* (McNeill) Koç & Hamzaoğlu olarak değiştirilmiştir.

Ülkemize endemik bir tür olan S. mesogitana subsp. *flaccida* Zoni yaylası ve çevre florasında, Küre dağları üzerinde ve Bartın ile Kastamonu-Sinop il sınırlarında yayılış göstermektedir (Tekebaş, 2017). Kayalık yamaçlar gibi taşlık ve az topraklı habitatlarda doğal yayılış gösteren tür mart ve nisan aylarında çiçeklenir. Beyaz renkli çiçekler genellikle gövde üzerinde veya taban kısmından gelişmektedir. Bitki salgı (glandüler) tüylerle kaplıdır ve bu morfolojik özellik alt türün tanımlanmasında ayırt edici bir karakterdir. Ayrıca bu salgı tüyleri bitkinin çevresel stres koşullarına karşı korunmasında ve bazı böcek türlerine karşı savunmada rol oynar. Ülkemize endemik bu türün habitatının tahrip edilmeden korunması ve canlılığının sürdürülebilir biçimde yönetilmesi çok önemlidir. Caryophyllaceae familyasına ait çeşitli türlerin tohum ve polen morfolojileri bilim insanları tarafından incelenmiş ve kapsamlı bir çalışma yapılmış olmasına rağmen (McNeill & Bassett, 1974; Yıldız, 2001; Yıldız, 2002; Perveen & Qaiser, 2003; Sahreen vd., 2008b), literatürde *S. mesogitana* subsp. *flaccida* endemik türü ile ilgili herhangi bir tohum ve polen mikromorfolojisi çalışması bulunmamaktadır. Bu gerekçelerle bu çalışma, türün tohum ve polen mikromorfolojisi hakkında tutarlı, kapsamlı, ayrıntılı ve doğru veriler sağlamak amacıyla ışık mikroskopisi ve taramalı elektron mikroskopisi ile *S. mesogitana* subsp. *flaccida* endemik türünü analiz etmeye odaklanmıştır. Bu çalışmanın sonucunda mikroskobik yöntemler kullanılarak elde edilen veriler taksonomik araştırmaların doğrulanmasında yardımcı olacaktır.

2. Gereç ve Yöntemler

2.1. Bitki Materyali

Sabulina mesogitana subsp. *flaccida* polenleri mart-nisan 2025, tohumları ise temmuz 2025 Türkiye'de korunması öncelikli noktadan biri olan Küre Dağları Milli Parkı ve onun tampon bölgesini de içine alan Batı Küre Dağları 41°40'18.4"N 32°45'49.5"E lokalizasyondan toplanmıştır. Örnekler BEUN Eczacılık Fakültesi koleksiyonunda kayıt altına alınmıştır. Ortamlar farklı pH değerleri ve farklı sükroz konsantrasyonları içeren %0.7 g/L agar (w/v) Murashige ve Skoog (MS) modifiye edilerek hazırlanmıştır (Çizelge 1). Hazırlanan besi ortamları otoklavlandıktan sonra steril cam kavanozlara (100 mm x 100 mm x 200 mm) aktarılmıştır. Türün tohumları %10'luk sodyum hipoklorit çözeltisi ile 10 dakika muamele edilmiş, sonra üç kez steril distile su ile durulanmıştır. Sterilizasyonu yapılan 100 adet tohum MS

Çizelge 1. Tohum çimlendirmek için hazırlanan farklı Murashige ve Skoog (MS) ortamları.

Deneme	Sükroz (g/L)	pH	Sıcaklık (°C)
A1	30	5.8	25±2
A2	20	5.8	25±2
A3	20	7.2	25±2
A4	30	7.2	25±2

besiyerlerine ekilerek 24±2°C sıcaklıkta, 24 saat karanlık periyotta bitki büyütme odasında çimlenmesi için inkübe edilmiştir.

2.2. Polen Canlılığının Belirlenmesi

Polen canlılığını belirlemek için 15, 20, 25 ve 30 g/L sükroz içeren ortamlar hazırlanmış, polenler lam üzerine alınmış ve ışık mikroskobunda gözlemlenmiştir. Toplam 100 adet polende fertil ve steril polenler sayılarak, toplam polen sayısına oranla canlılık yüzdesi hesaplanmıştır. Fertilite ve sterilite (Denklem 1) yüzdesi için aşağıdaki formül kullanılmıştır (Ullah vd., 2018):

Fertilite= (F/F+S)×100

Sterilite=(S/S+F)×100 (1)

F: okülerdeki fertil polen sayısı ve S: aynı okülerdeki steril polen sayısıdır.

Polen şeklini belirlemek için polenlerin P/E oranı (Denklem 2), aynı polenin polar ve ekvator çapına göre aşağıdaki formül kullanılarak ifade edilmiştir (Ullah vd., 2018):

P/E=(P/E) (2)

P: polenin uzun ekseni ve E: aynı polenin ekvatoriyal (kısa ekseni) çapıdır.

2.3. Tohum ve Polen Mikroskopisi

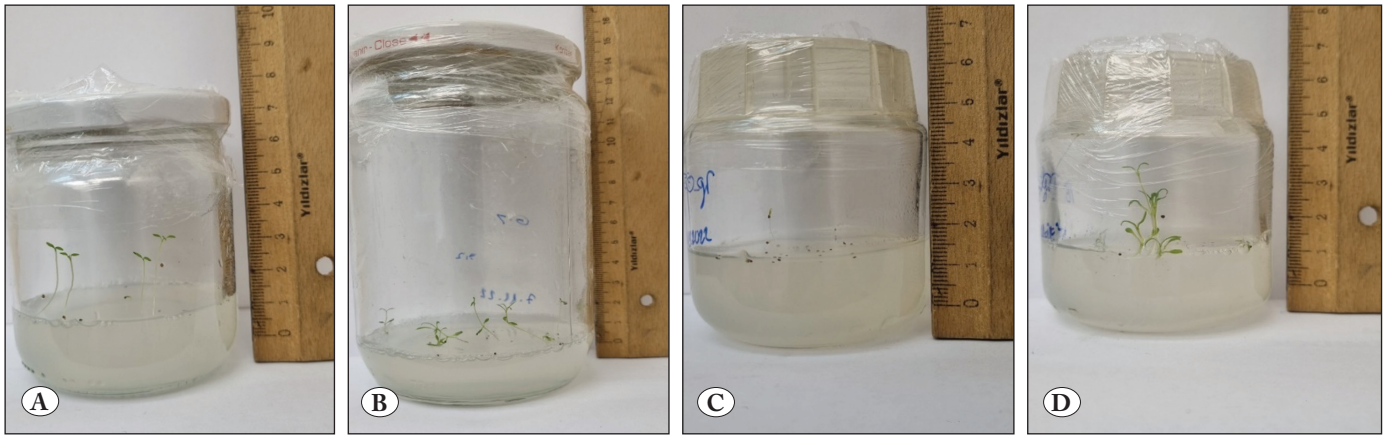
Tohum ve polenin mikromorfolojik özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analiz edilmiştir. Daha sonra tüm örnekler, yan ve dorsal yüzeyleri görünecek şekilde çift taraflı yapışkan karbon iletken diskler kullanılarak taplara yapıştırılmıştır. Örnekler, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi (ARTMER) bünyesindeki QUANTA 450 Field Emission Gun (FEG) cihazında incelenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Tohum Çimlendirme

Bu çalışmada *Sabulina mesogitana* subsp. *flaccida*' nın tohum ve polenleri *in vitro* koşullarda çimlendirilmiş, polen canlılığı belirlenmiş, polen tüpü oluşumu gözlemlenmiş, tohum ve polen mikromorfolojisi incelenmiştir. Tohum çimlendirme denemelerinde A1 ortamında ilk çimlenme 16.gün, A2 ortamında 7.gün, A3 ortamında 11.gün, A4 ortamında 7.gün gerçekleşmiştir (Şekil 1).

Denemelere göre 20 g/L sükroz ve 5.8 pH ortamının (A2) diğer ortamlara göre daha fazla oranda çimlenme yüzdesine sahip olduğu belirlenmiştir (Çizelge 2).

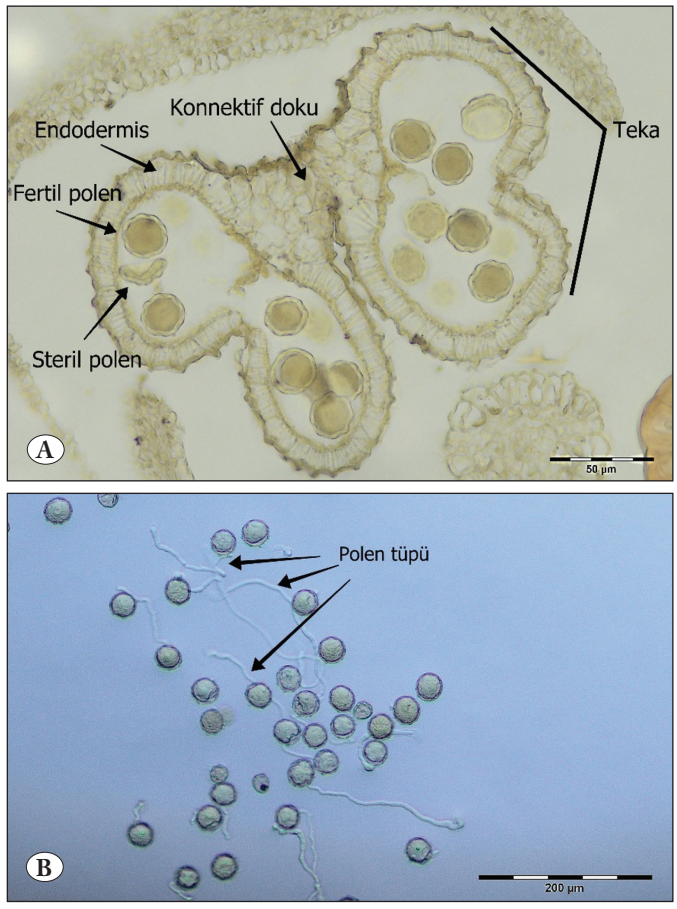


Şekil 1. *Sabulina mesogitana* subsp. flaccida 30 günlük aseptik fideleri a. A1 b. A2 c. A3. d. A4.

Çizelge 2. *Sabulina mesogitana* subsp. flaccida'ya ait tohumların çimlenme yüzdesi.

	Sükroz(g/L)	pH	Çimlenme yüzdesi(%)
A1	30	5.8	20.9
A2	20	5.8	34.3
A3	20	7.2	10.1
A4	30	7.2	18.1

Erdoğan (2010) Caryophyllaceae familyasına ait *Silene sangaria* türünde in vitro tohum çimlendirme denemeleri yapmıştır. Denemelerde MS ortamı, sükroz (30 g/L), agar (7g/L) ve giberellik asit kullanılmıştır. Giberellik asit uygulaması MS ortamlarında çimlenmeyi az miktarda uyarmıştır. Kum kontrol grubu olarak kullanılmış ve kontrol grubunda çimlenme oranı %37.5 iken MS ortamında sırasıyla bitki büyüme düzenleyicisi içermeyen MS için %35, %1 için %40, %3 için %42.5, %5 için %40'tır (Erdoğan, 2010). Üstüner vd. (2021) yaptığı çalışmada Caryophyllaceae familyasına ait *Silene sangaria* türünde *in vitro* tohum çimlendirmiştir. Çimlendirme denemelerinde GA3 bitki büyüme düzenleyicisinin çimlenme ve gelişime etkisini gözlemlemek amacıyla farklı GA3 konsantrasyonlarına sahip besi yerleri hazırlanmıştır. Bu amaçla bitki büyüme düzenleyicisi içermeyen MS, 1, 3 ve 5 mg/L GA3 konsantrasyonlarında farklı MS besi yerleri ve steril olmayan kum kullanılmıştır. (Üstüner vd., 2021).



Şekil 2. *Sabulina mesogitana* subsp. *flaccida*. a. Olgun bir anterin enine kesitinde fertil ve steril polenler. b. 20 g sükroz besin ortamında gelişen polen tüpleri.

3.2. Polen Çimlendirme ve Canlılık

S. mesogitana subsp. *flaccida*'nın polenlerinde ilk çimlenme 15 ve 30 g/L sükroz ortamlarında 2 saat, 20 ve 25 g/L sükroz ortamlarında 20 dk, 35 g/L sükroz ortamında 25 dk sonra gözlemlenmiş polen tüpü gelişimi (Şekil 2b) yüzdesi Çizelge 3'te gösterilmiştir. Fertil ve steril polenler sayılarak toplam polen sayısına oranla canlılık yüzdesi hesaplanmış; %88 fertil, %22 steril polen tespit edilmiştir (Şekil 2a).

Polenlerin P ve E eksenleri 28.20 ± 0.01 µm'dir. Polenlerin P/E oranı, aynı polenin polar ve ekvator çaplarının bölünmesiyle belirlenmiş, çıkan sonuç polenin şeklinin sferoidal olduğunu doğrulamıştır. Birçok araştırmacı Caryophyllaceae familyasının polen morfolojisi üzerine yaptıkları çalışmalarda, bu familyanın polenlerinin 25 ile 50 µm arasında değişen orta büyüklükte olduğunu göstermişlerdir (Sahreen vd., 2008a; Sahreen vd., 2008b; Ullah vd., 2018; Eröz Poyraz & Ataşlar, 2019). Sonuçlar yukarıda incelenenlerle örtüşmektedir.

3.3. Tohum ve Polen Mikroskopisi

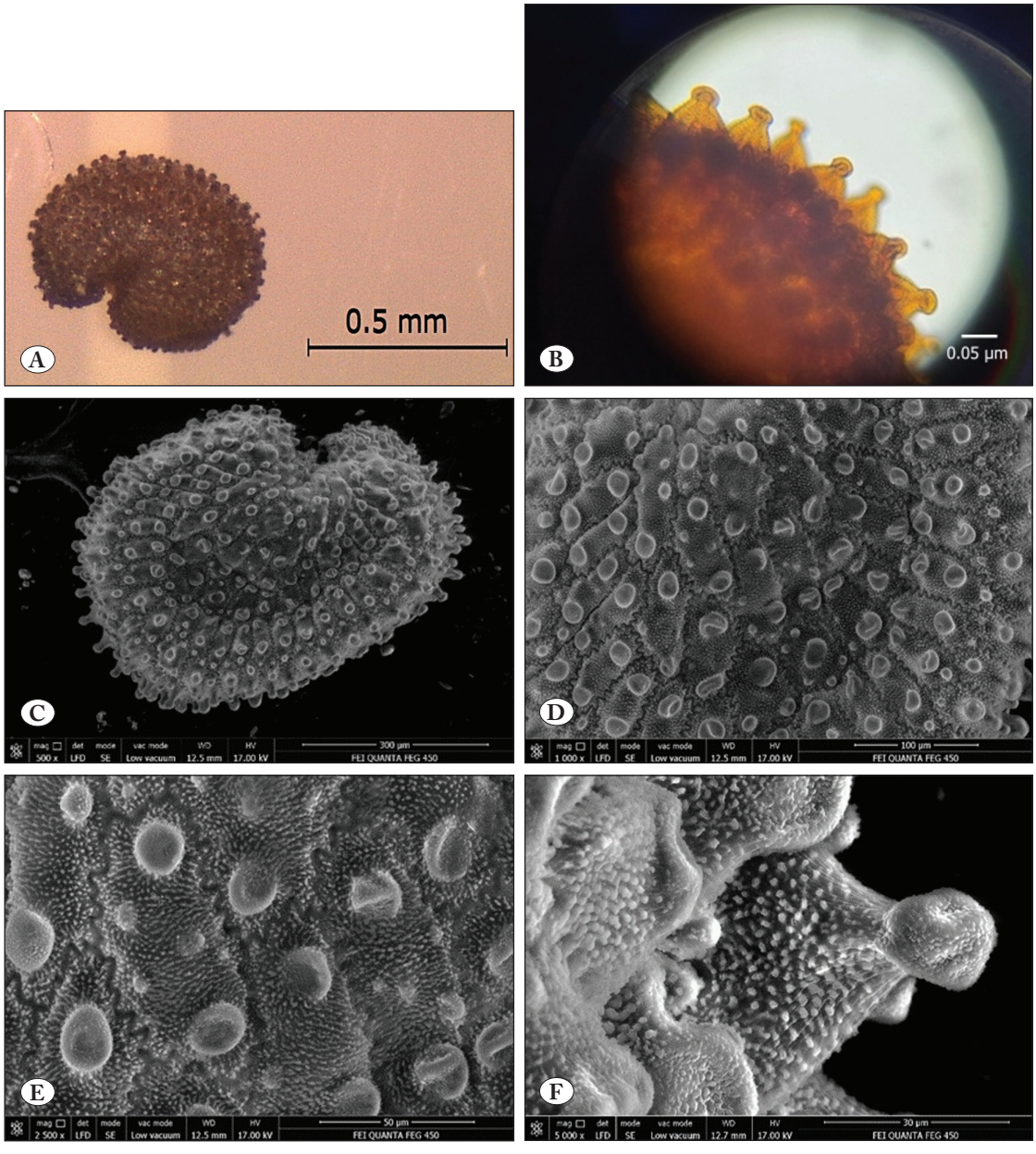
Tohum mikromorfolojisinin bitki taksonomisindeki belirsizliklerin giderilmesinde oldukça bilgilendirici bir kriter olduğu gösterilmiştir. Ancak *Sabulina* cinsi üzerine yapılan

Çizelge 3. *Sabulina mesogitana* subsp. *flaccida*'da polen tüpü gelişimi yüzdesi.

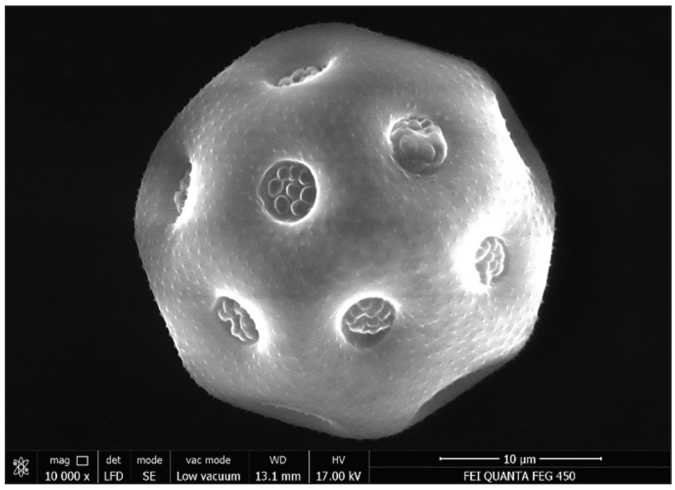
Polen tüpü oluşumu	15 g/L sükroz	20 g/L sükroz	25 g/L sükroz	30 g/L sükroz	35 g/L sükroz
	%4	%30	%18	%15	%1

çalışmalar sınırlı olup, mevcut araştırmalar yalnızca bir veya birkaç türe odaklanmıştır (Koç vd., 2019; Özbek, 2023). Bu çalışma ise *S. mesogitana* subsp. *flaccida*'nın tohum ve polen mikromorfolojisine ilişkin verileri içeren ilk araştırma olma özelliğini taşımaktadır. *S. mesogitana* subsp. *flaccida* tohumlarının ortalama boyutu 0.5 ± 0.2 cm olup, böbrek şeklinde ve koyu kahverengi-siyah renklidir (Şekil 3a,c). Tohumların ventral ve dorsal yüzeyleri papilli ve tuberküllü yapıdadır (Şekil 3b,d,e,f). Caryophyllaceae familyasının diğer türleriyle karşılaştırıldığında ise papillerin baskın olması dikkat çekici bir özellik olarak öne çıkmaktadır (Gücel, 2013; Aktürk & Yılmaz, 2020).

S. mesogitana subsp. *flaccida* polenlerinin yüzeyinde homojen dağılımlı porlar bulunmaktadır (Şekil 4). Polen tipi pantoporat olup por sayısı 15-19 arasında değişmektedir. Polen ornementasyonu mikroekinat-mikroperforat karakterdedir ve por açıklıklarının boyutu 3.00 ± 0.01 µm olarak ölçülmüştür. Caryophylloideae alt familyasının polenleri genellikle yarı küresel veya uzun formdadır; por sayısı ise türler arasında farklılık göstermektedir. Örneğin, *Silene conoidea*'da por sayısı 19–35 arasında değişmektedir (Sahreen vd., 2008a). *S. mesogitana* subsp. *flaccida* polenleri, pantoporat yapıları ve yüzeyinde görülen ekinatlarla literatürde diğer türler için bildirilen özelliklerle uyum göstermektedir (Ullah vd,. 2018).



Şekil 3. *Sabulina mesogitana* subsp. *flaccida* tohumlarının mikroskopik görüntüleri. a-tohum- ışık mikroskobu, b. papiller-ışık mikroskobu, c.tohum-SEM, d-e-f. farklı büyütmelerde papiller-SEM.



Şekil 4. *Sabulina mesogitana* subsp. *flaccida* poleninin SEM görüntüsü.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma, Caryophyllaceae familyasına ait endemik bir tür olan *S. mesogitana* subsp. *flaccida*'nın tohum ve polen morfolojisini inceleyerek, türün doğru teşhisinde ve taksonomik ayrımında ışık mikroskobu ve taramalı elektron mikroskopisinin önemini ortaya koymaktadır. Türkiye ve dünya literatüründe bu türün tohum ve polen morfolojisine yönelik gerçekleştirilen ilk çalışma olma özelliğini taşımaktadır. Araştırmanın temel amacı, palinomorfolojik verileri genişleterek *S. mesogitana* subsp. *flaccida*'ya ilişkin taksonomik, evrimsel ve ekolojik bilgilerin yanı sıra gelecekte yapılacak çalışmalara katkı sağlamaktır. Ayrıca, tohum yüzey morfolojisinin dağılım stratejileri ve çevresel adaptasyon ile ilişkili olduğu, testa ornementasyonunun ise türün çevresel koşullara uyumunda rol oynayabileceği düşünülmektedir.

Teşekkür: Bu çalışma, TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı tarafından desteklenmiştir.

Yazar Katkısı: Havva KARAHAN: araştırma ve hipotez oluşturma, yöntem planlama, veri toplama ve analizi, makale yazma, danışmanlık. Yasin HAZER: veri toplama ve analizi, makale yazma. Gamze ERİKCİ: yöntem planlama, veri toplama, makale yazma. Tuğçe KOÇ: yöntem planlama, veri toplama, makale yazma. Hatice ÇÖLGEÇEN: araştırma ve hipotez oluşturma, yöntem planlama, danışmanlık.

Etik Kurul Onayı: Çalışmanın, etik kurul izni gerektirmeyen çalışmalar arasında yer aldığını beyan ederiz.

Kaynaklar

Aktürk, C., & Yılmaz, Ö. (2020). Endemik *Gypsophila olympica* Boiss. (Caryophyllaceae) türünün morfolojik, anatomik, palinolojik ve karyolojik özellikleri. *Bağbahçe Bilim Dergisi, 8(1),* 111-120. https://doi.org/10.35163/bagbahce.806589

Bittrich, V. (1993). Families and genera of flowering plants. Kubitzki, K., Rohwer, J.G., Bittrich, V. (eds). II.Volume, Berlin. Heidelberg New York: Springer, pp. 521–522.

Cao. Y., Almeida-Silva, F., Zhang, W. P., Ding, Y. M., Bai, D., Bai, W. N., Zhang, B. W., Van de Peer, Y., & Zhang, D. Y. (2023). Genomic ınsights into adaptation to karst limestone and incipient speciation in east asian *Platycarya* spp. (Juglandaceae). *Mol. Biol. Evol., 40(6*), msad121. https://doi.org/10.1093/molbev/msad121

Cowie, I. D. (2011). Flora of the Darwin Region I.Volume. Sidney: National library of Australia.

Davis, P. H. (1967). Flora of Turkey. II.Volume Edinburg, Edinburg University Press, pp. 99-131.

Dillenberger, M. S., & Kadereit, J. W. (2014). Maximum polyphyly: multiple origins and delimitation with plesiomorphic characters require a new circumscription of *Minuartia* (Caryophyllaceae). *Taxon, 63*, 64–88. https://doi.org/10.12705/631.5

Erdoğan, U. (2010). Tehlike altındaki *Silene sangaria* Coode & Cullen'nin mikroçoğaltımı. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, 90 s.

Eröz Poyraz, İ., & Ataşlar, E. (2019). Pollen micromorphology of *Petrorhagia* (Ser.) Link taxa. *Biological Diversity and Conservation, 12(3),* 70-77.

Gücel, S. (2013). Morphology, anatomy and cytology of critically endangered endemic *Minuartia nifensis* from West Anatolia. *Sains Malaysiana, 42(10),* 1449-1453.

Greenberg, A. K., & Donoghue, M. J. (2011). Molecular systematics and character evolution in Caryophyllaceae. Taxon, 60:1637-52. https://doi.org/10.1002/tax.606009

Harbaugh, D. T., Nepokroeff, M., Rabeler, R. K., McNeill, J., Zimmer, E. A., & Wagner, W. L. (2010). A new lineage- based tribal classification of the family Caryophyllaceae. Int J Pl Sci, 171: 185-98. https://www.jstor.org/stable/10.1086/648993

Hernandez-Ledesma, P., Berendsohn, W. G., Borsch, T., Mering, V. S., Akhani, H., & Arias, S. (2015). A taxonomic backbone fort he global synthesis of species diversity in the Angiosperm order Caryophyllales. *Willdenowia, 45*, 281-3. https://doi.org/10.3372/wi.45.45301

Koç, M., Hamzaoğlu, E., & Aksoy, A. A. (2019). New species and five new combinations of *Sabulina* (Caryophyllaceae) from Turkey. *Folia Geobot, 54*, 279-289. https://doi.org/10.1007/s12224-019-09348-1

Konecna, V., Yant, L., & Kolár, F. (2020). The evolutionary genomics of serpentine adaptation. *Front. Plant Sci., 11*, 574616. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.574616

Lipánová, V., Kabátová, KN., Zeisek, V., Kolář, F., & Chrtek, J. (2023). Evolution of the *Sabulina verna* group (Caryophyllaceae) in Europe: A deep split, followed by secondary contacts, multiple allopolyploidization and colonization of challenging substrates. *Molecular Phylogenetics and Evolution, 189*. https://doi.org/10.1016/j.ympev.2023.107940

McNeill, J., & Bassett, I. J. (1974). Pollen morphology and the infrageneric classification of *Minuartia* (Caryophyllaceae). Canadian Journal of Botany, 52(6): 1225-1231. https://doi.org/10.1139/b74-158

Mosyakın, S. L., & Fedoronchuk, M. M. 2015. New combinations for East European species of *Sabulina* (Caryophyllaceae). *Phytotaxa, 231(1),* 095-098. http://dx.doi.org/10.11646/phytotaxa.231.1.10

Özbek, F. (2023). Palynomorphological observations on the genus *Sabulina* Rchb. (Caryophyllaceae) from Turkey using light microscopy and scanning electron microscopy get access arrow. *Microscopy and Microanalysis, 29(2*), 802-815. https://doi.org/10.1093/micmic/ozac039

Perveen, A., Qaiser, M. (2003). Pollen flora of Pakistan XXII. Oxalidaceae. *Pakistan Journal of Botany, 35*, 3-6.

Preite, V., Sailer, C., Syllwasschy, L., Bray, S., Ahmadi, H., Krämer, U., & Yant, L. (2019). Convergent evolution in *Arabidopsis halleri* and *Arabidopsis arenosa* on calamine metalliferous soils. *Phil. Trans. R. Soc. B., 374*, 20180243. https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0243

Sahreen, S., Khan, M. A., Meo, A. A., & Jabeen, A. (2008a). Pollen morphology of the genus *Silene* (Sileneae-Caryophyllaceae) from Pakistan. *Biological Diversity and Conservation, 1(2)*, 74-85.

Sahreen, S., Khan, M. A., Meo, A. A., & Jabeen, A. (2008b). Studies on the pollen morphology of the genus *Dianthus* (Caryophyllaceae) from Pakistan. *Biodicon, 1(1),* 89-98.

Tekebaş, S. (2017). Küre Dağları Milli Parkı'nın Bartın Bölümünde bulunan Zoni Yaylası ve etrafının florası. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi 76 s.

Ullah, F., Zafar, M., Ahmad, M., Dilbar, S., Shah, S. N., Sohail, A., Zaman, W., Iqbal, M., Bahadur, S., & Tariq, A. (2018). Pollen morphology of subfamily Caryophylloideae (Caryophyllaceae) and its taxonomic significance. *Microsc Res Tech. 81(7),* 704-715. https://doi.org/10.1002/jemt.23026

Ulukuş, D. (2018). Morphology, anatomy and palynology study on Turkish endemic species *Saponaria karapinarensis* (Caryophyllaceae). *Phytotaxa, 374(1)*, 80-86. https://doi.org/10.11646/phytotaxa.374.1.7

Üstüner, H., Nasırcılar, A., & Yavuz, M. (2021). In vitro germination and vegetative growth characteristics of *Gypsophila pilulifera* (Caryophyllaceae) seeds grown under abiotic stress conditions. *Anatolian Journal of Botany, 5(2)*, 91-97. https://doi.org/10.30616/ajb.935421

Xu, Z., & Deng, M. (2017). Caryophyllaceae. in: identification and control of common weeds: II.Volume, Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-024-1157-7_31

Yildiz, K. (2001). Pollen morphology of Caryophyllaceae species from Turkey. *Pakistan Journal of Botany, 33,* 13-25.

Yildiz, K. (2002). Seed morphology of Caryophyllaceae species from Turkey (North Anatolia). *Pakistan Journal of Botany, 34(2)*, 161-171.

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi
Dergi web sayfası: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen
DOI: 10.7212/karaelmasfen.1789743

Araştırma Makalesi
Geliş tarihi / Received : 23.09.2025
Kabul tarihi / Accepted : 23.03.2026

Ölü Son Duvarının Dairesel Su Alma Ağzı Membasındaki Hız Dağılımına Etki Ettiği Limit Mesafenin İncelenmesi

Effect of a Dead-End Wall on Velocity Distribution Upstream of a Circular Intake: Investigation of the Limiting Distance

Efe Barbaros*, Kerem Taştan

Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Öz

Su alma yapıları; kanal, deniz, rezervuar gibi durağan veya hareketli ortamlardan ihtiyaç duyulan suyun temin edilerek iletim sistemlerine aktarılmasını sağlayan yapılardır. Bu yapıların etkili çalışabilmesi için ağız membasında oluşan hız dağılımının doğru biçimde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Literatürde, kanal tabanı veya baraj duvarı gibi fiziksel akım sınırlarının hız dağılımına kayda değer etkileri olduğu gösterilmiş olsa da ağzın bu sınırlara olan mesafesinin hangi değerlerden itibaren akımı etkilediğine dair net bir bilgi bulunmamaktadır. Bu çalışma kapsamında, ölü son duvarı içerisine yerleştirilmiş dairesel kesitli bir su alma ağzının membasında oluşan hız dağılımının sınır etkilerinden bağımsız hale gelmesi için ağız–duvar arasındaki limit mesafe araştırılmıştır. Bu amaçla, ağzın ölü son duvarına yerleştirildiği düzenek için hız dağılımları Akustik Doppler Hız Ölçer ile deneysel olarak ölçülmüş, FLOW-3D HYDRO yazılımıyla oluşturulan sayısal modeller ise deneysel verilerle doğrulanmıştır. Bulgular, su alma ağzının ölü son duvarına mesafesinin hız dağılımı üzerinde önemli etkiler yarattığını ortaya koymuştur. Özellikle ağzın ölü son duvarı üzerindeki konumundan 1D mesafeye taşınması en büyük değişimi oluştururken, 2.5D mesafesinde farkın ihmal edilebilir düzeye geldiği ve bu değerin limit mesafe olarak tanımlanabileceği görülmüştür. Ayrıca, duvar sınır etkileri nedeniyle akım doğrultusundaki hızlarda %33'e varan artışlar meydana gelebileceği belirlenmiştir. Sayısal çalışma sonuçları, ağız akımına bağlı hız dağılımlarının doğru şekilde elde edilmesinde FLOW-3D HYDRO yazılımının güvenilir bir araç olduğunu da göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Akım sınırları, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, su alma ağzı

Abstract

Intakes are hydraulic structures that transfer the required water from static or dynamic sources such as channels, seas, or reservoirs to conveyance systems. For the efficient operation of these structures, it is important to understand the velocity distribution upstream of the intake. Although the literature has demonstrated that physical flow boundaries, such as channel beds or dam walls, significantly affect velocity distributions, there is no clear information on the critical distance at which the intake's proximity to these boundaries begins to influence the flow. In this study, the limiting distance between a dead-end wall and a circular intake was investigated to ensure that the velocity distribution upstream of the intake becomes independent of boundary effects. For this purpose, velocity distributions were experimentally measured using an Acoustic Doppler Velocimetry in a setup where the intake was placed adjacent to a dead-end wall, and numerical models developed with FLOW-3D HYDRO were validated using the experimental data. The findings revealed that the distance between the intake and the dead-end wall significantly affects the velocity distribution. In particular, moving the intake from the wall to a distance of 1D caused the most significant variation, while at a distance of 2.5D the difference became negligible, which can therefore be defined as the limiting distance. Furthermore, it was determined that wall boundary effects could increase flow-direction velocities of up to 33%. The numerical analysis results also demonstrated that FLOW-3D HYDRO is a reliable tool for accurately predicting intake-related velocity distributions.

Keywords: Flow boundaries, computational fluid dynamics, water intake

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: efebarbaros@gazi.edu.tr

Efe Barbaros orcid.org/0000-0002-6548-438X
Kerem Taştan orcid.org/0000-0003-1747-2496

Bu eser "Creative Commons Alıntı-GayriTicari-4.0 Uluslararası Lisansı" ile lisanslanmıştır.

1. Giriş

Su alma yapıları, farklı akım ortamlarından ihtiyaç duyulan suyu alarak iletim sistemlerine aktaran mühendislik yapılarıdır. Bu akım ortamları, nehir ve kanal gibi hareketli veya deniz, göl, rezervuar ve regülatör gibi durağan olabilir. Bu yapıların giriş bölümleri ise su alma ağzı (emme ağzı, ağız, orifis) olarak adlandırılmaktadır. Bu yapıların etkili ve verimli çalışabilmesi için tasarım kriterlerinin ve başlıca özelliklerinin tespit edilmesi büyük önem kazanmaktadır.

Su alma ağızlarıyla ilgili literatür incelendiğinde, ağza hava girişini ele alan araştırmalar (Yıldırım & Kocabaş, 1995; Eroğlu & Bahadırlı, 2007; Yıldırım & Taştan, 2009; Taştan & Yıldırım, 2017; Taştan, 2018) ile ağız membasında sediment hareketi sonucu oluşan oyulma çukurunu inceleyen çalışmalar (Powell & Khan, 2012; Khanarmuei vd., 2016; Karmacharya vd., 2021; Taştan vd., 2023; Erat vd., 2024) dikkat çekmektedir. Ağızlara hava girişi, iletilmesi istenilen debinin iletim sistemlerine ulaşmasını engelleyebilir ve hidrolik yapı elemanlarında titreşim veya kavitasyon riskine yol açabilir. Sediment girişi ise yapıda aşınmaya neden olarak elemanların ömrünü kısaltabilir.

Öte yandan, katı madde veya hava girişinden bağımsız olarak, ağız membasında oluşan hız dağılımının ve akım özelliklerinin araştırılması hidrolik yapıların güvenle çalışabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Önceki çalışmalar, su alma yapılarında ağız membasındaki hız dağılımını çoğunlukla deneysel veya teorik yöntemlerle araştırmıştır. Anayiotos vd. (1995), orifis yakınındaki hız dağılımının yarı-eliptik bir form sergilediğini ölçümlerle göstermiştir. Benzer şekilde, Chanson vd. (2002) dairesel bir tankın tabanındaki dikdörtgen orifis üzerindeki hız dağılımını zamana bağlı akım koşulları altında incelemiştir. Potansiyel akım yaklaşımını kullanan Shammaa vd. (2005), tek noktasal kuyu modelinin orifis yakınındaki hız alanını doğru tahmin edemediğini ortaya koymuştur. Araştırmacılar, orifis yüzeyi boyunca dağıtılmış çoklu noktasal kuyular ile daha gerçekçi sonuçlar elde etmiş ve ağza yakın alanda yarı-eliptik, uzak alanda ise yarı-küresel eş-hız eğrilerinin oluştuğunu göstermiştir. Bryant vd. (2008), bu yöntemi basınç gradyanlarının etkisini de dahil ederek geliştirmiş ve özellikle büyük orifisler için akım dağılımının daha doğru tahmin edilebildiğini deneysel verilerle ortaya koymuştur. Öte yandan, Islam ve Zhu (2011), kompleks analiz yöntemiyle farklı boyut ve konumlara sahip dikdörtgen ağızların membasındaki hız dağılımlarını incelemiş; özellikle çoklu ağız durumlarında süperpozisyonun uygulanabilir olduğunu göstermiştir. Çalışmalar, hızlanma bölgesinin su derinliği ile ağız boyutu ve konumuna bağlı olduğunu ortaya koymuştur.

Bahsi geçen çalışmalar akım sınırlarının ağız membasındaki hız dağılımına etkisinin olmadığı durumları araştırmıştır. Ancak su alma ağzının kanal tabanına veya yan duvarlarına, ölü son veya baraj gövdesine olan mesafelerinin akım alanı içerisinde önemli değişiklikler yarattığı bilinmektedir (Yıldırım & Kocabaş, 1995; Kocabaş & Yıldırım, 2002; Powell & Khan, 2012; Taştan vd., 2023). Sınır etkilerini dikkate alan araştırmalardan biri olan, Powell ve Khan (2012) tarafından ortaya konan çalışma, sabit ve hareketli taban koşulları altında dairesel orifislerin membasındaki akım davranışını hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle incelemiştir. Çalışmada üç farklı sabit su yüksekliği ve farklı sediment boyutları kullanılarak yapılan deneylerde, yatay ve düşey düzlemlerdeki hız bileşenleri ölçülmüştür. Hem sabit hem de hareketli taban koşullarında, yatay ve düşey düzlemlerdeki boyuna hız dağılımlarının benzerlik gösterdiği; maksimum hızın ise her iki durumda da orifis merkez hattının altında gerçekleştiği belirlenmiştir. Üç boyutlu sayısal modelleme sonuçları deneylerle karşılaştırılmış ve modelin her iki taban koşulu için de hız alanını doğru biçimde tahmin ettiği görülmüştür. Taştan vd. (2023), farklı ağız geometrilerinin, ölü son duvarına sahip kanallardan su alan ağızların membasındaki hız dağılımları üzerindeki etkisini hem teorik hem de sayısal yöntemlerle incelemiştir. Teorik analizde potansiyel akım çözümü kullanılırken, sayısal araştırmada hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımlarından (HAD) biri olan FLOW-3D kullanılmıştır. Dikdörtgen, kare, eşkenar üçgen, eşkenar dörtgen vb. çeşitli ağız geometrileri, akım sınırlarının olmadığı ve kanal tabanı ile yan duvarlarının sınır etkilerinin bulunduğu durumlar için analiz edilmiştir. Bulgular, ağız geometrisinin memba bölgesindeki hız dağılımını önemli ölçüde etkilediğini, ancak ağızdan uzaklaştıkça bu etkinin kaybolduğunu göstermiştir. Teorik ve sayısal sonuçların uyumu tatmin edici bulunmuştur. Erat vd., (2024) ise, hız dağılımlarından ziyade, su alma ağzının akım sınırlarına olan konumunun oyulma çukuru üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemiştir. Çalışmalarında, ağız konumunun oluşan vorteks yapısı ve sedimente etki eden kayma gerilmeleri üzerinde önemli bir rol oynadığını ortaya koymuşlardır.

Literatürde görüldüğü üzere, ağız membasındaki hız dağılımlarını inceleyen çalışmaların büyük çoğunluğu sınır etkilerinin bulunmadığı koşullara odaklanmıştır. Akım sınırlarının dikkate alındığı çalışmalarda ise su alma ağzının kanal sınırlarının yakınında konumlandırılarak hız dağılımında

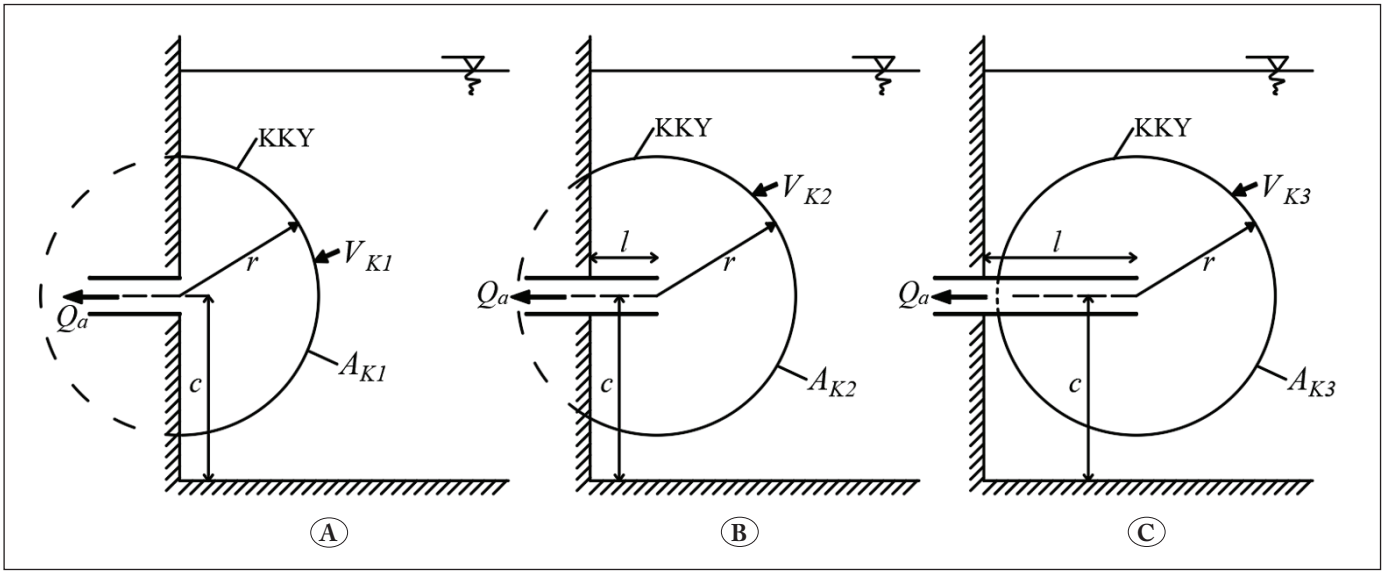
değişim oluşturulduğu gösterilmiştir. Bununla birlikte, ağzın yatayda duvara olan mesafesinin hangi değerlerden itibaren akımı etkilediğine, bir diğer ifadeyle limit mesafesinin ne olduğuna ilişkin literatürde bir bilgiye rastlanmamaktadır. Oysaki limit mesafenin bilinmemesi, ağzın duvardan gereğinden fazla uzak konumlandırılması durumunda yapı boyutları ve dolayısıyla maliyetlerin artmasına; duvara çok yakın konumlandırılması halinde ise hız artışlarına bağlı olarak sediment taşınımı veya kavitasyon gibi istenmeyen etkilerin oluşmasına yol açabilir. Bu çalışma kapsamında, dairesel kesitli bir su alma ağzının membasındaki hız dağılımının akım sınırlarından etkilenmemesi için ağız ve ölü son duvarı arasında gerekli olan limit mesafe sayısal yöntemlerle araştırılmaktadır.

2. Ağız Membasındaki Hız Dağılımına Sınır Etkileri

Yıldırım ve Kocabaş (1995), potansiyel akım kabulüne dayalı olarak dairesel bir su alma ağzı etrafında akım alanının küresel kuyu yüzeyleri (KKY) ile temsil edilebileceğini göstermiştir. Bu yaklaşımda, KKY'lerin merkezleri su alma ağzı merkezi ile çakışmakta ve yüzeylerden geçen debi, kütlenin korunumu gereği ağızdan alınan debiye eşit olmaktadır. Dolayısıyla her bir KKY üzerinden geçen akım miktarı sabit kalırken, yüzey alanı küçüldükçe bu alan üzerinden geçen radyal hızın artması zorunlu hale gelmektedir. Elde edilen çözümde debi Q_a, KKY'nin net etkin yüzey alanı (A_K) ile bu yüzey üzerindeki ortalama radyal hızın (V_K) çarpımıyla ifade edilmektedir. Böylece, akım alanında engeller veya sınırlar nedeniyle etkin yüzey alanında meydana gelen azalmalar, radyal hız değerlerinde artış olarak ortaya çıkmaktadır. Yazarlar, aynı çapta seçilen farklı KKY yüzeylerini karşılaştırarak, çıkış yapısının kanal duvarına yakın veya uzak konumlanmasının bu hız dağılımı üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermiştir. Şekil 1'de gösterildiği üzere duvara daha yakın konumlanan bir ağızda, KKY'nin etkin alanı daha küçük olduğundan ($A_{K1} < A_{K2} < A_{K3}$) oluşan radyal hızlar daha büyük olmaktadır ($V_{K1} > V_{K2} > V_{K3}$). Bu bulgular ağız membasındaki sediment kaynaklı oyulmaları inceleyen Taştan vd., (2023) ve Erat vd., (2024) çalışmalarında da görülebilmektedir.

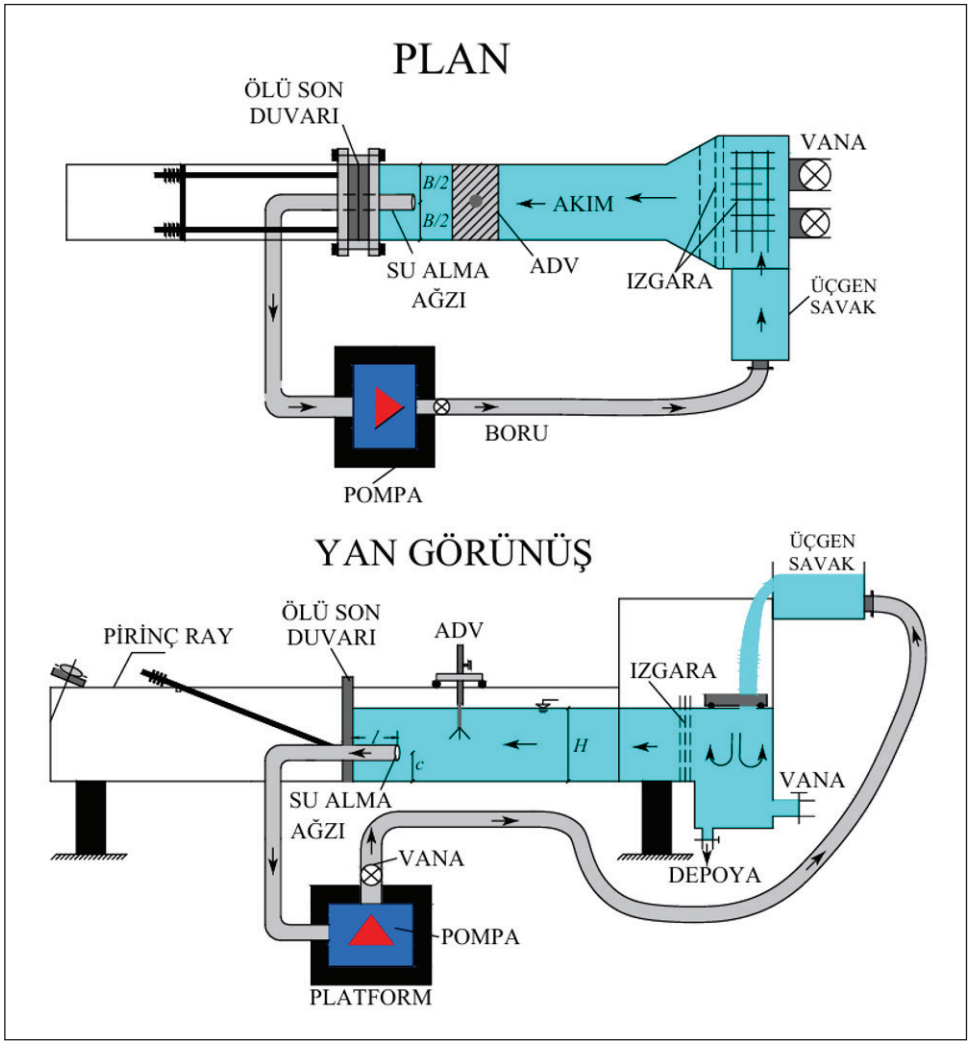
3. Deneysel Çalışma

Sayısal çalışmada oluşturulan modelin kalibrasyonu için ihtiyaç duyulan veriler, 7.5 m uzunluğunda ve 0.50 m genişliğinde (B), tabanı ve yan duvarları camdan, yatay bir açık kanalda gerçekleştirilen deneylerden elde edilmiştir. Ölü son duvarı içerisinde yatay olarak yerleştirilen dairesel kesitteki (D=5.32 cm) su alma ağzından merkezkaç pompası aracılığıyla çekilen debi (Q=5 lt/s), kanal başlangıcında bulunan üçgen savağa iletilmektedir. Kanal merkezine yerleştirilen su alma ağzının tabana olan mesafesi (c), literatürde belirtildiği üzere sınır etkilerinden uzakta olacak şekilde $2D$ olarak sabit tutulmuştur (Bryant vd., 2008; Powell & Khan, 2012). Aynı zamanda ağız kanal ortasına yerleştirilerek kanal duvarlarına olan mesafesi $B/2=4.7D$ oranında tutulmuş, bu sayede duvarların ağız akımını etkilemesinin önüne geçilmiştir. Ağzın ölü son duvarına olan mesafesi (l)



Şekil 1. Farklı ağız konumları için küresel kuyu yüzeylerinin değişimi (Ölçeksiz).

ise 0 olacak şekilde düzenek kurulmuştur (Su alma ağzı ölü son duvarı üzerindedir). Üçgen savak vasıtasıyla debi ölçümü gerçekleştirilmekte, kanal başlangıcında bulunan ızgaralar yardımıyla ise meydana gelen düzensizlikler azaltılarak, akımın sakin bir şekilde kanalda ilerlemesi sağlanmaktadır. Deneyler öncesi kanal su ile doldurulmakta (H/D=4.5), pompa çalıştırıldıktan sonra kanal içerisindeki su devridaim yapılmaktadır. Su alma ağzı kaynaklı hız dağılımının etkisi, ağza yakın bölgelerde belirgin olup, ağızdan uzaklaşıldıkça azalmaktadır (Shammaa vd., 2005; Powell & Khan, 2012). Nitekim Taştan vd. (2023), farklı geometrik özelliklere sahip su alma ağızlarının membasındaki hız dağılımlarını incelediklerı çalışmalarında, yatay ve düşey hız bileşenlerinin ağızdan yaklaşık x/D>2.13 mesafeden itibaren sıfıra yaklaşma eğilimi gösterdiğini belirtmiştir. Bu sebeple, yaklaşık 141D uzunluğa karşılık gelen 7.5 metrelik kanal uzunluğu, su alma ağzı kaynaklı hız dağılımının kanal boyunca gelişimini etkilemeyecek düzeydedir. Deneylerde, iç çapı 5.32 cm olan ağızdan 5 lt/s debi alındığında, ağız içindeki minimum Reynolds sayısı (Re) yaklaşık 120 000 olarak hesaplanmaktadır. Rajaratnam ve Manzurek (2002) ile Köse ve Yanmaz (2010) çalışmalarında, Reynolds sayısı 2000'in üzerinde olduğunda etkisinin ihmal edilebileceği ifade edilmiştir. Ayrıca deneyler sırasında ağızdan alınan debi kanal başında bulunan savağa iletildiğinden ve kanala ek bir debi girişi olmadığından, su alma ağzı içerisindeki ortalama hızın (U_o) kanaldaki kesit alan ortalamalı yaklaşım hızına (U_w) oranının etkisi sabit kalmaktadır ($U_o/U_w = (4Q/\pi D^2)/(Q/BH) = 4BH/\pi D^2$ = sabit). Kanal duvarlarında bulunan pirinç raylar üzerine yerleştirilen Akustik Doppler Hız Ölçer (ADV), üzerinde konumlandırıldığı hazne sayesinde üç yönde hareket ederek, akım içerisinde istenilen konumda hız ölçümü gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Ölçeksiz deney düzeneği Şekil 2'de gösterilmektedir. Ölçümlerin referans noktası, kanal boyunca (x yönü) ve yatayda (y yönü) ağız merkezi, derinlik boyunca (z yönü) ise kanal tabanıdır.



Şekil 2. Ölçeksiz deney düzeneği.

Üç yöndeki hız bileşenlerinin (V_x, V_y, V_z) ölçümü Sontek 16 MHz MicroADV aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Ölçüm süresi 90 saniye, örneklem frekansı ise 25 Hz olarak seçilmiştir. Sontek MicroADV kullanım kılavuzunda tavsiye edildiği üzere ölçümler esnasında %70 COR ve 15 dB SNR değerleri sağlanmıştır (Sontek, 2007). Ham veri seti, COR ve SNR kriterleriyle filtrelenmesine rağmen ani sıçramalar (spike) ve aykırı değerler (outlier) içerebilmektedir. Bu nedenle bu değerlerin veri setinden çıkarılması gerekmektedir. Bu çalışmada, Goring ve Nikora (2002) tarafından önerilen ve Wahl (2003) tarafından geliştirilen Faz-uzayı aykırı değer ayıklama yöntemi (Phase-Space Despiking) kullanılarak veri filtrelemesi gerçekleştirilmiştir. ADV ölçümlerine ilişkin belirsizlik, cihaz özellikleri ve deneysel koşullar dikkate alınarak değerlendirilebilmektedir. SonTek 16 MHz MicroADV cihazı için uygun sinyal kalitesi sağlandığında, hız ölçümlerinin doğruluğunun ölçülen hız değerinin yaklaşık ±%1 düzeyinde olduğu ifade edilmektedir (Sontek, 2007). Bunun yanı sıra, cihazın 0.01 cm/s düzeyindeki hız çözünürlüğü, küçük ölçekli hız dalgalanmalarının ayırt edilebilmesine olanak tanımaktadır. Ölçümlerin yalnızca 0.09 cc gibi oldukça sınırlı bir örneklem hacmi içerisinde gerçekleştirilmesi ise, mekansal ortalamaya bağlı hata kaynaklarının azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Buna ek olarak, deneysel çalışmada, ADV'nin üç ayaklı yapısı nedeniyle, ağza en yakın ölçümler x/D=0.70 noktasından alınabilmiştir.

4. Sayısal Çalışma

HAD uygulamalarının temel amacı, akım davranışını ve belirli noktalardaki hız, basınç ve kayma gerilmesi gibi parametreleri sayısal olarak incelemektir. Bu tür yazılımlar kütle, momentum ve enerji denklemlerini çözerek, fiziksel olayın iki veya üç boyutlu modellenmesini ve modelin hücrelere ayrılarak belirli zaman adımlarında çözülmesini sağlar. Böylece her bir hücrede istenilen akım özellikleri elde edilebilir. Bu çalışmada, su alma ağzının ölü son duvarına olan mesafesinin (l) hangi değerlerden itibaren ağız membasındaki hız dağılımını etkilediğinin ortaya konulması amacıyla, ağız ve duvar arası limit mesafe sayısal olarak FLOW-3D HYDRO yazılımı aracılığıyla araştırılmıştır. Yazılım, sonlu hacimler yöntemiyle süreklilik ve Navier-Stokes denklemlerini çözebilmekte ve sediment hareketi, katı cisim etkileşimi ile ısı transferi gibi olayların modellenmesine de olanak tanımaktadır. FLOW-3D yazılımı, Hirt ve Nichols (1981) tarafından geliştirilen VOF (Volume of Fluid) yöntemi ile serbest yüzeyli akışları ve FAVOR (Fractional Area/Volume Obstacle Representation) yöntemi ile katı cisimleri modellemektedir. VOF yönteminde, her çözüm hücresine atanan hacim oranı (V_F) su ve hava varlığını tanımlar; V_F = 1 hücrenin tamamen su ile dolu olduğunu, V_F = 0 ise tamamen hava ile dolu olduğunu gösterir. Ara değerler, hücrede her iki fazın birlikte bulunduğunu ifade eder ve ilgili hız, basınç ve kayma gerilmesi değerleri bu oranlara göre hesaplanır. FAVOR yöntemi de benzer şekilde hücredeki katı cisim oranını sıfır ile bir arasında bir değerle belirler. Bu başlık içerisinde öncelikle yazılımın çözdüğü temel denklemlere yer verilecek, ardından da model kurulum aşamaları özetlenerek sayısal çalışmada kullanılan model tanıtılacaktır.

4.1. Temel Denklemler

FLOW-3D yazılımı, akışkanlar mekaniğinin temel denklemlerini sayısal olarak çözerek fiziksel olayların modellenmesine olanak sağlar. Süreklilik, momentum ve enerji denklemleri yazılım tarafından çözülürken, türbülanslı akımların modellenmesi için farklı türbülans modelleri de kullanılabilmektedir.

Sıkıştırılamaz akışa ait 3 boyutlu kütle (Eş. (1)) ve momentum korunumu denklemleri (Eş. (2)) aşağıda gösterilmektedir. Eşitliklerde yönler x, y ve z ile, bu yönlere göre hızlar da u, v ve w ile gösterilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x)+\frac{\partial}{\partial y}(vA_y)+\frac{\partial}{\partial z}(wA_z)=\frac{R_{SOR}}{\rho_w} \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left(uA_x\frac{\partial u}{\partial x}+vA_y\frac{\partial u}{\partial y}+wA_z\frac{\partial u}{\partial z}\right)=-\frac{1}{\rho_w}\frac{\partial p}{\partial x}+ g_x+f_x-\frac{R_{SOR}}{\rho_w V_F}u \tag{2 - a}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left(uA_x\frac{\partial v}{\partial x}+vA_y\frac{\partial v}{\partial y}+wA_z\frac{\partial v}{\partial z}\right)=-\frac{1}{\rho_w}\frac{\partial p}{\partial y}+ g_y+f_y-\frac{R_{SOR}}{\rho_w V_F}v \tag{2 - b}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left(uA_x\frac{\partial w}{\partial x}+vA_y\frac{\partial w}{\partial y}+wA_z\frac{\partial w}{\partial z}\right)=-\frac{1}{\rho_w}\frac{\partial p}{\partial z}+ g_z+f_z-\frac{R_{SOR}}{\rho_w V_F}w \tag{2 - c}$$

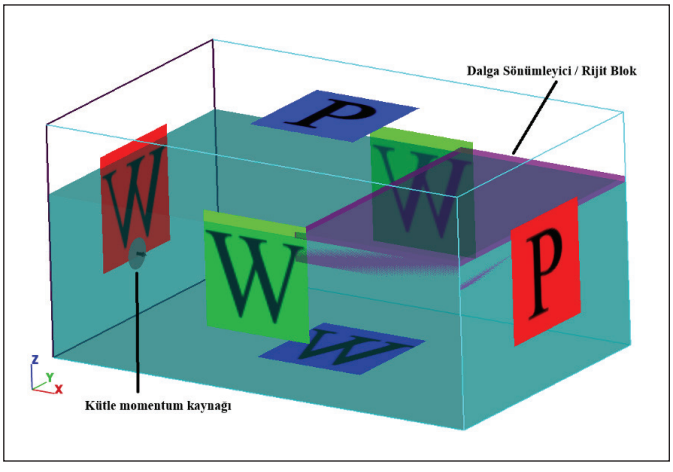
Bu denklemlerde, ρ_w akışkanın yoğunluğunu, p basıncı, R_{SOR} sisteme eklenen veya sistemden çıkarılan kütleyi ifade eden yoğunluk kaynak terimini göstermektedir. A_x, A_y, A_z ilgili yönlerdeki alansal oranları, t zamanı, g_x, g_y, g_z yerçekimi ivmelerini, f_x,f_y,f_z ise viskoz ivmeleri temsil etmektedir. Ayrıca, V_F hücredeki su-hava oranını belirten büyüklük olup, bu değer Eş. (3) yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\frac{\partial F}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left(\frac{\partial}{\partial x}(FA_x u)+\frac{\partial}{\partial y}(FA_y v)+\frac{\partial}{\partial z}(FA_z w)\right)=0 \quad (3)$$

Bu eşitlikteki F parametresi, 0 ile 1 arasında değer alarak hücre içerisindeki su doluluk oranını ifade etmektedir. Eşitlikler sıkıştırılamaz ve sabit yoğunluklu akış koşulları için sadeleştirilmiştir. Isı transferi, hareketli cisimler veya yüzey geçirimliliği gibi modeller bu çalışmanın kapsamı dışında olduğundan, eşitliklerde bu terimlere yer verilmemiştir.

4.2. Sayısal Modelin Oluşturulması

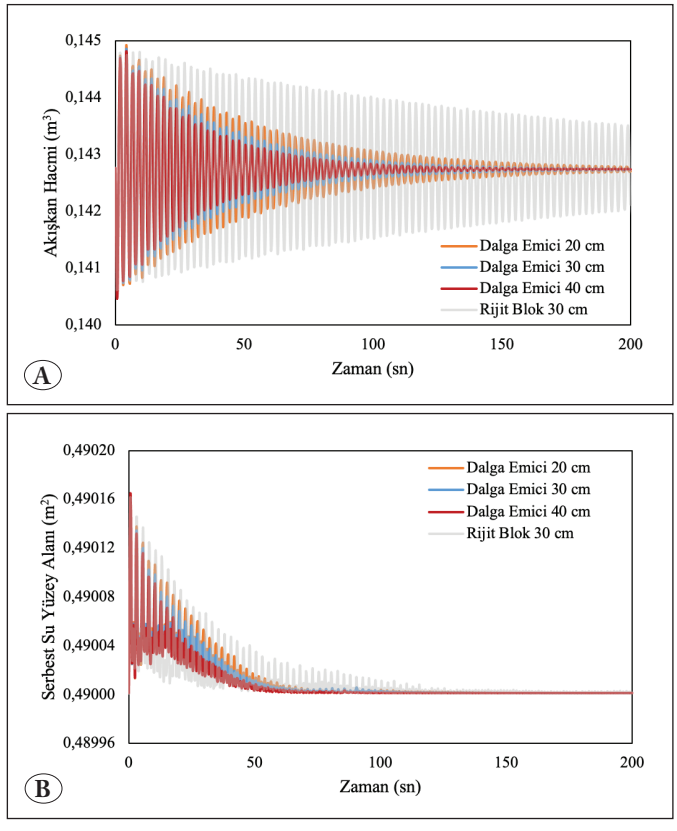
Deneysel çalışmanın gerçekleştirildiği kanal yapısı ve akım koşullarının sayısal modele tanımlanabilmesi için FLOW-3D yazılımında yer alan "Model Kurulumu" modülündeki araçlar kullanılmıştır. Model kurulumunda; kanal uzunluğu, dalga sönümleyici yapısı, ağ çözünürlüğü, çözüm süresi ve türbülans modeli gibi parametrelerin sonuçlar üzerindeki etkileri incelenmiş ve deney verilerine en uygun sonuçları veren model geliştirilmiştir. Öncelikle, 50 cm genişliğinde ve yüksekliğinde, 1 m uzunluğunda dikdörtgen bir çözüm ağı tanımlanmıştır. Çözüm ağı sıkılığı başlangıçta 2 cm olarak seçilmiştir. Kanal tabanı, yan duvarları ve ölü son duvarının programa tanımlanabilmesi için X_{min}, Z_{min}, Y_{min} ve Y_{max} sınırlarına "Duvar" sınır koşulu, çözüm alanının atmosfere açılan yüzeyine ise "Basınç" sınır koşulu atanmıştır. Kanal membasını yansıtan X_{max} yüzeyine, deneylerdeki su yüksekliğinin daimi olarak sağlanabilmesi için hidrostatik basınç yüksekliği tanımlanmıştır. Su alma ağzı için ise, çapı ağız iç çapına eşit bir kütle-momentum kaynağı kullanılmıştır (Şekil 3). Kütle-momentum kaynağı kullanımı, özellikle geometrik boyutları çözüm alanına kıyasla küçük olan akım girişlerinin modellenmesinde, hesaplama yükünü azaltarak çözüm süresinin kısalmasına katkı sağlamaktadır. Bu yöntem sayesinde, çözüm alanı içerisinde belirlenen herhangi bir noktada sabit veya zamana bağlı debi ya da hız koşulları uygulanabilmekte; akım yönüne bağlı olarak kaynak elemanı giriş veya çıkış (kuyu) karakterinde çalıştırılabilmektedir.



Şekil 3. Başlangıç sayısal modeli (l/D=0).

Bu aşamada, öncelikle dalga sönümleyicinin özellikleri belirlenmiştir. Kanalda oluşan dalgaların serbest yüzey yakınındaki hız değerlerini etkileyebileceği ve belirli bir süre sonunda çözüm alanındaki su hacmini gerçek değerinden sapmaya yöneltebileceği ifade edilmektedir (Wei, 2015). Bu nedenle memba kısmına, kalınlığı 5 cm ve genişliği 50 cm sabit tutularak 20, 30 ve 40 cm uzunluğunda dalga emici bloklar ile 30 cm uzunluğunda rijit blok yerleştirilmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Mansaptaki akışı bozmamak için dalga kırıcının uzunluğu en fazla 40 cm olarak seçilmiş, dalga emici bloklarda ise sönüm katsayısı sıfırdan bire lineer biçimde tanımlanmıştır.

Farklı dalga sönümleyici yapıların kabiliyetlerinin karşılaştırılması, kanaldaki akışkan hacmi üzerinden Şekil 4(a)'da, serbest su yüzey alanı üzerinden ise Şekil 4(b)'de sunulmuştur. Şekil 4'ten görüldüğü üzere 40 cm uzunluğundaki dal-



Şekil 4. Dalga sönümleyici boyutlarına karar verilmesi (a) Akışkan hacmi değişimi (b) Serbest su yüzey alanı değişimi

ga emici bloklar, 1 m'lik kanalda dalgalanmayı kayda değer ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca, simülasyon süresi açısından 50–100 sn aralığının yeterli olduğu görülmektedir.

Dalga sönümleyici boyutları belirlendikten sonra, kanal uzunluğunun seçimi ele alınmıştır. Sayısal modelde, kanalın hem deney akım koşullarını yansıtacak kadar uzun hem de simülasyon süresini verimli tutacak kadar kısa olması gerekmektedir. Bu doğrultuda, deney düzeninde kullanılan 50 cm'lik kanal genişliği sabit bırakılırken, kanal uzunlukları 60, 80, 100 ve 120 cm olarak karşılaştırılmıştır. Dalga sönümleyicinin ağız akımını etkilememesi amacıyla, sönümleyicinin kanal uzunluğuna oranı 0.40 olarak korunmuştur. Şekil 5 kanal uzunluğu boyunca, *x* yönündeki hızın derinlikle değişimini farklı kanal uzunlukları için göstermektedir. Simülasyon sonuçları *x/D*=0.88 konumunda (ağza olan kanal boyunca uzaklık) değerlendirildiğinde, 0.8 m uzunluğundaki bir kanalın yeterli olduğu görülmektedir. Şekiller içerisinde *x*, *y* ve *z* yönlerinde hızlar sırasıyla *Vx*, *Vy* ve *Vz* ile gösterilmekte, boyutsuzlaştırma işlemi için ise su alma ağzı içerisindeki ortalama hız (*Uo*) kullanılmaktadır.

Sayısal sonuçların deneysel verilerle ne ölçüde örtüştüğü, Hata Kareleri Ortalamasının Karekökü (Root Mean Square Error - RMSE) ile Belirleme Katsayısı (R^2) kullanılarak değerlendirilmiştir. RMSE değeri, sayısal hesaplamalar ile deneysel veriler arasındaki ortalama sapma miktarını göstermektedir. R^2 katsayısı ise modelin deneysel veri setindeki değişimi açıklama başarısını ifade etmektedir. Bu iki istatistiksel göstergenin birlikte ele alınması, sayısal modelin doğruluk düzeyinin incelenmesine olanak sağlamaktadır. RMSE değerinin sıfıra yakın olması, modelden kaynaklanan hataların sınırlı olduğunu ve model doğruluğunun yüksek seviyede bulunduğunu göstermektedir. R^2 katsayısı ise 0 ile 1 arasında değer almakta olup, modelin deneysel veri setindeki değişkenliği açıklama başarısını ifade etmektedir. R^2 değerinin 1'e yaklaşması, sayısal sonuçların deneysel verileri doğru bir şekilde yansıttığını ortaya koymaktadır. RMSE ve R^2 hesaplamalarında kullanılan matematiksel ifadeler sırasıyla Eş. (4) ve Eş. (5)'te verilmiştir.

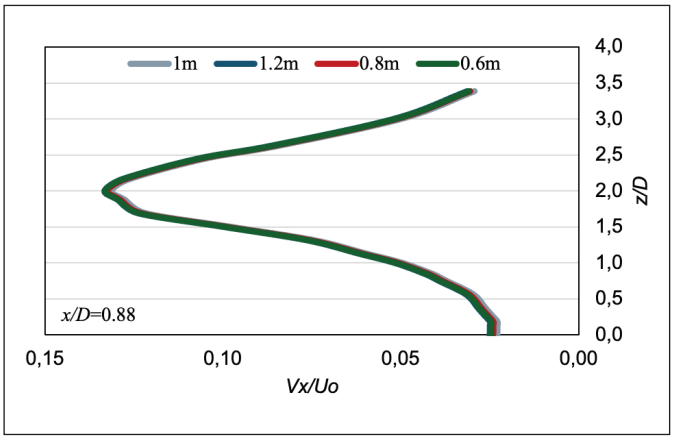
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_{i(deney)} - y_{i(CFD)})^2} \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(y_{i(deney)} - y_{i(CFD)})^2}{\sum_{i=1}^{N}(y_{i(deney)} - \overline{y_{deney}})^2} \quad (5)$$

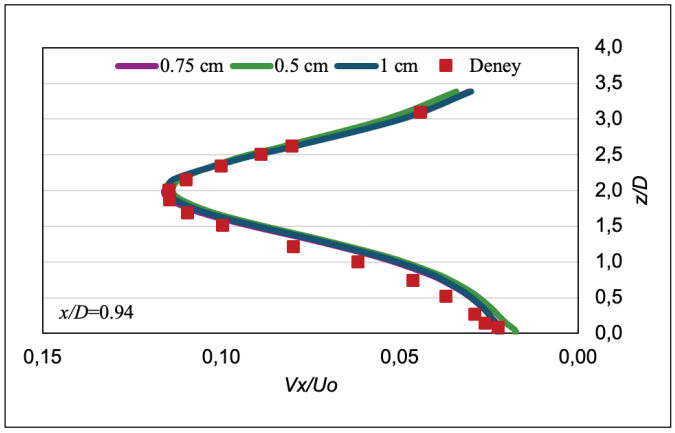
Söz konusu eşitliklerde *N*, analiz kapsamında değerlendirilen toplam veri sayısını belirtmektedir. Veri setindeki her bir deneysel ya da sayısal karşılaştırma için kullanılan *i* ifadesi, ilgili verinin sıra numarasını temsil etmektedir. $y_{i(deney)}$ terimi, *i* numaralı deneysel ölçüm sonucunu; $y_{i(CFD)}$ terimi ise aynı sıradaki sayısal model verisini tanımlamaktadır. Bunun yanı sıra, $\overline{y_{deney}}$ ifadesi, veri setinde yer alan deneysel ölçümlerin ortalama değerini göstermektedir.

Sayısal modellemede dikkat edilmesi gereken en kritik unsurlardan biri, çözüm ağından bağımsız sonuçların elde edilmesini sağlayacak uygun ağ yapısının belirlenmesidir. 0.80 m kanal uzunluğu seçildikten sonra, çözüm ağı özelliklerinin hız dağılımına etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda, ağız akımının yoğun olarak etkili olduğu ağızdan itibaren ilk 20 cm'lik bölge ile kalan 60 cm'lik bölüm ayrı çözüm ağı blokları olarak tanımlanmıştır. İlk bölgede 1, 0.75 ve 0.5 cm'lik ağ aralıkları karşılaştırılmış, ikinci bölgede ise 2 cm'lik ağ aralığı sabit tutulmuş ve tüm simülasyonlar için süre 100 saniye olarak belirlenmiştir. Buna bağlı olarak, toplam hücre sayıları 1, 0.75 ve 0.5 cm ağ aralıkları kullanılan modeller için sırasıyla 55 000, 110 877 ve 335 000 olarak hesaplanmıştır. Farklı çözüm ağı blokları için elde edilen sonuçlar Şekil 6'da gösterilmektedir. 0.5, 0.75 ve 1 cm'lik ağ aralıkları için R^2 ve RMSE değerleri sırasıyla 0.944 ve 0.0079; 0.970 ve 0.0057; 0.964 ve 0.0063 olarak elde edilmiştir. Sayısal modelden elde edilen değerler ile deneysel sonuçlar arasındaki uyum ve çözüm süresinde optimumun elde edilmesi kriterleri birlikte değerlendirildiğinde 0.75 cm çözüm ağı sıkılığının seçilmesine karar verilmiştir.

Kanalın fiziksel özelliklerinin belirlendiği kısımda sunulan Şekil 4'te, simülasyon süresi için 50–100 saniyelik aralığın



Şekil 5. Farklı kanal uzunlukları için boyuna hız profili karşılaştırması (*Vx/Uo*).



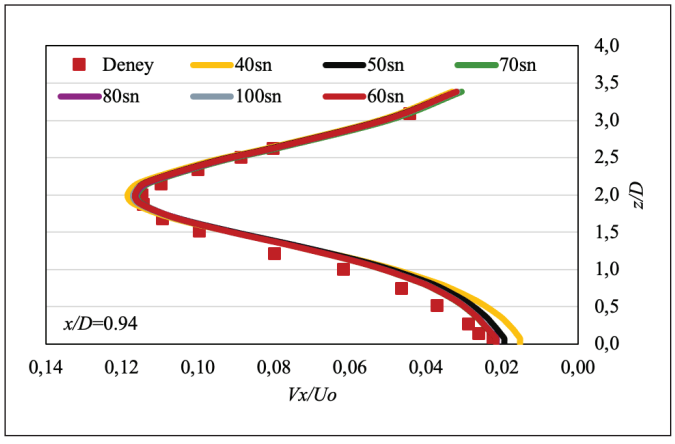
Şekil 6. Çözüm ağı boyutundan bağımsız sonuçlar elde edilmesi.

yeterli olabileceği öngörülmüştü. Bu tahmini kesinleştirmek amacıyla, 40, 50, 60, 70, 80 ve 100 saniyelik sürelerin hız dağılımına etkileri incelenmiştir (Şekil 7). 40, 50 ve 60 saniyelik çözümler için R^2 ve RMSE değerleri sırasıyla 0.933 ve 0.0086; 0.954 ve 0.0071; 0.968 ve 0.0059 olarak elde edilmiştir. Çözüm süresinin 60 saniyenin üzerine çıkarılması durumunda ise R^2 ve RMSE değerlerinin değişmediği ve 0.968 ile 0.0059 olarak sabit kaldığı görülmüştür. Bulgular, kanal içerisindeki akışkan hacmi ve serbest yüzey alanı (Şekil 4) ile değerlendirildiğinde, 60 saniyelik simülasyon süresinin yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.

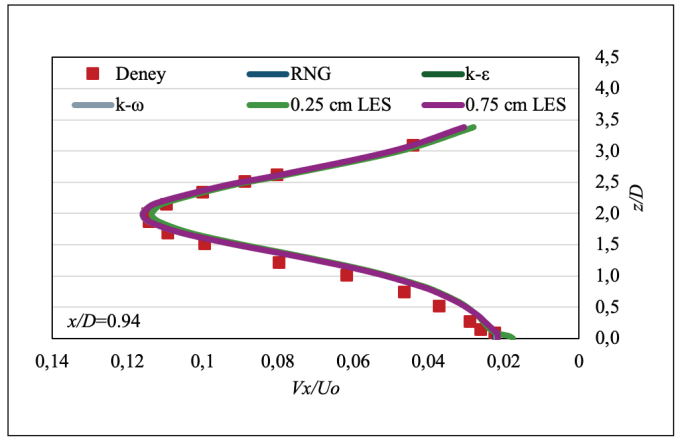
Türbülans modelinin seçilebilmesi amacıyla RNG, k–ε, k–w ve Büyük Çevrinti Modeli (Large Eddy Simulation – LES) yaklaşımları karşılaştırılmıştır. LES yönteminde, çözüm ağından daha büyük olan enerji taşıyıcı girdaplar Navier–Stokes denklemleri kullanılarak doğrudan çözülürken, ağ boyutunun altında kalan küçük ölçekli girdapların etkileri modelleme yoluyla temsil edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan FLOW-3D HYDRO yazılımında, küçük ölçekli türbülans etkilerinin modellenmesi için Smagorinsky alt-grid ölçek (sub-grid scale) modeli uygulanmıştır. Bu modelde, çözülemeyen küçük ölçekli türbülansın ana akış üzerindeki etkisi, yerel şekil değiştirme hızına bağlı olarak tanımlanan bir alt-grid viskozitesi (eddy viscosity) aracılığıyla hesaba katılmaktadır. Öte yandan LES yönteminin diğer türbülans modellerine kıyasla daha ince çözüm aralıkları gerektirdiği bilindiğinden, ek olarak 0.25 cm'lik ağ aralığı da değerlendirilmiştir (Şekil 8). 0.25 cm ağ aralığına sahip LES çözümü için R^2 ve RMSE değerleri sırasıyla 0.964 ve 0.0063 olarak elde edilirken, diğer türbülans modellerinde bu değerler 0.970 ve 0.0057 olmaktadır. Sonuçlar arasında anlamlı bir farklılık gözlenmemesi ve su alma yapılarındaki akımlar üzerine yapılan önceki sayısal çalışmalarda bu yaklaşımın yaygın olarak kullanılması (Tokyay ve Constantinescu, 2006; Nakayama ve Hisasue, 2010; Taştan vd., 2023) nedeniyle, 0.75 cm ağ aralığı ile LES modelinin tercih edilmesine karar verilmiştir.

Yürütülen süreç sonucunda elde edilen ve sayısal analizlerde kullanılan nihai model örneği Şekil 9'da sunulmuştur.

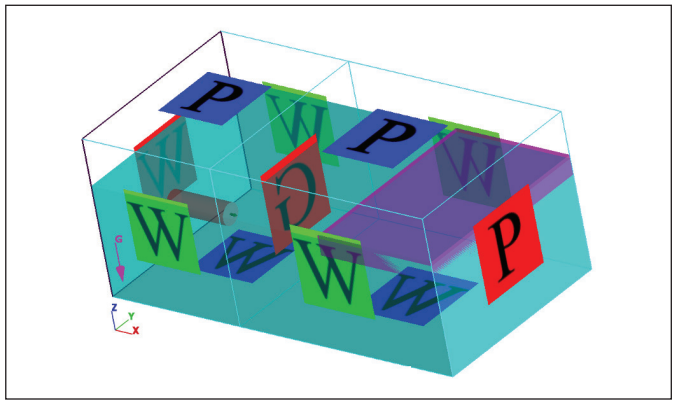
Nihai hale getirilen sayısal modelden elde edilen sonuçların, x/D=0.70, 0.94 ve 1.13 konumları için deneysel sonuçlarla karşılaştırılmaları Vx ve Vz dağılımları üzerinden Şekil 10'da gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere sayısal sonuçlar deneysel verilerle uyum içerisindedir.



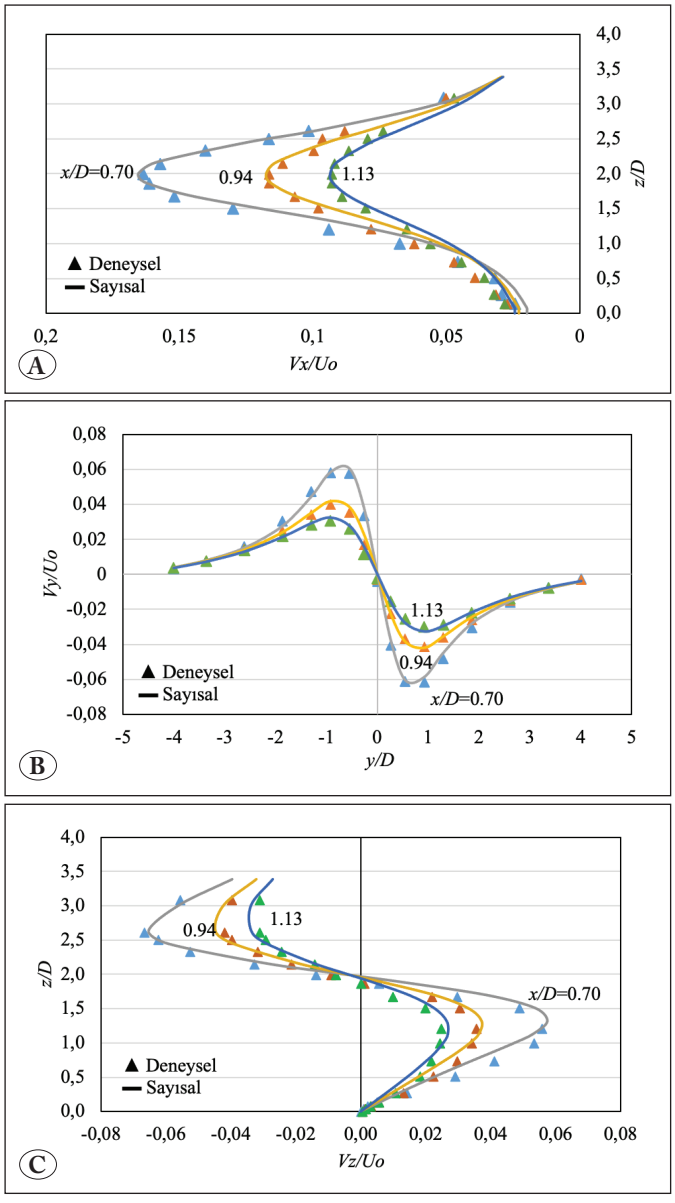
Şekil 7. Simülasyon süresinin boyuna hız profiline olan etkisi (Vx/Uo).



Şekil 8. Türbülans modelinin boyuna hız profiline olan etkisi (Vx/Uo).



Şekil 9. Nihai sayısal model (*l*/*D*>0).



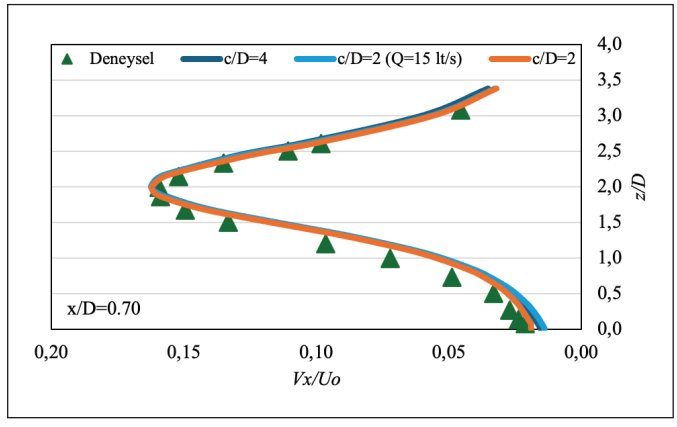
Şekil 10. Nihai modelden elde edilen sayısal sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması (a) *Vx/Uo* (b) *Vy/Uo* (c) *Vz/Uo.*

5. Bulgular ve Tartışma

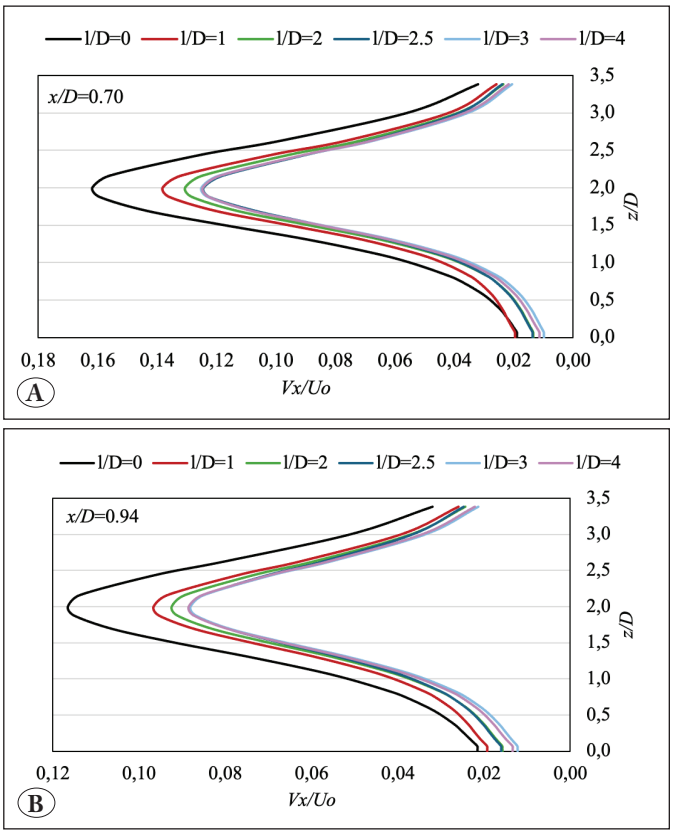
Bir önceki bölümde detayları sunulan sayısal modelin, deneysel sonuçlarla uyumlu çıktılar üretebildiği görüldükten sonra, deneysel olarak incelenemeyen farklı düzeneklerin simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Ancak limit mesafenin belirlenmesine geçmeden önce, su alma ağzının kanal tabanına olan 2*D* mesafesinin ve ağızdan alınan debi miktarının boyutsuzlaştırılmış hız dağılımını etkilemediğinden emin olabilmek için ek simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen tüm simülasyonlar 5 lt/s debi değeri altında yürütülmüş olup, yalnızca Şekil 11'de debi miktarındaki değişimin boyutsuzlaştırılmış hız dağılımı üzerindeki etkisi olmadığını doğrulamak amacıyla standart debinin yanı sıra 15 lt/s debi koşuluna ait sonuçlar da sunulmuştur. Şekil 11 *c*/*D*=2, *c*/*D*=2 için *Q*=15 lt/s ve *c*/*D*=4 düzenekleri için boyutsuz hız dağılımları arasında fark bulunmadığını ve deneysel verilerle uyum sağlandığını ortaya koymaktadır.

Akım alanında değişiklik yaratacak tek parametrenin su alma ağzının ölü son duvarına olan uzaklığı (*l*) olduğu kesinleştirildikten sonra *l*=0, 1, 2, 2.5, 3 ve 4 için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Şekil 12 *x* yönündeki hız bileşeninin derinlik boyunca değişimini, *x*/*D*=0.70 ve *x*/*D*=0.94 konumlarında farklı *l*/*D* düzenekleri için göstermektedir. Şekilden görüldüğü üzere ağzın duvara olan mesafesinin arttırılması oluşan hızların önemli miktarda azalmasına sebep olmaktadır. Ayrıca ağzın duvara olan mesafesinden bağımsız maksimum hızın ağız merkezi hizasında oluştuğu görülmektedir.

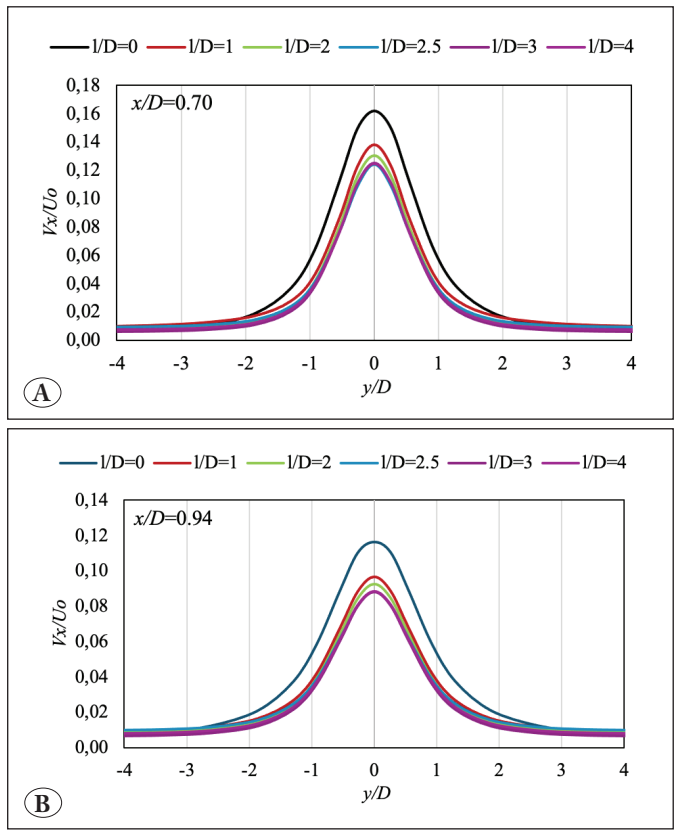
Çizelge 1'de sunulan veriler, *l*/*D* mesafesinin akım alanında oluşan maksimum boyuna hız (Vx_{max}) üzerindeki etkilerini nicel olarak ortaya koymaktadır. Sonuçlar, ağzın duvardan



Şekil 11. Farklı *c*/*D* ve debi değerlerinde *Vx/Uo* dağılımı.



Şekil 12. Farklı *l/D* değerleri için kanal boyunca *Vx/Uo* dağılımı (a) *x/D*=0.70, (b) *x/D*=0.94.



Şekil 13. Farklı *l/D* değerlerinde yatay düzlemde *Vx/Uo* dağılımı (a) *x/D*=0.70, (b) *x/D*=0.94.

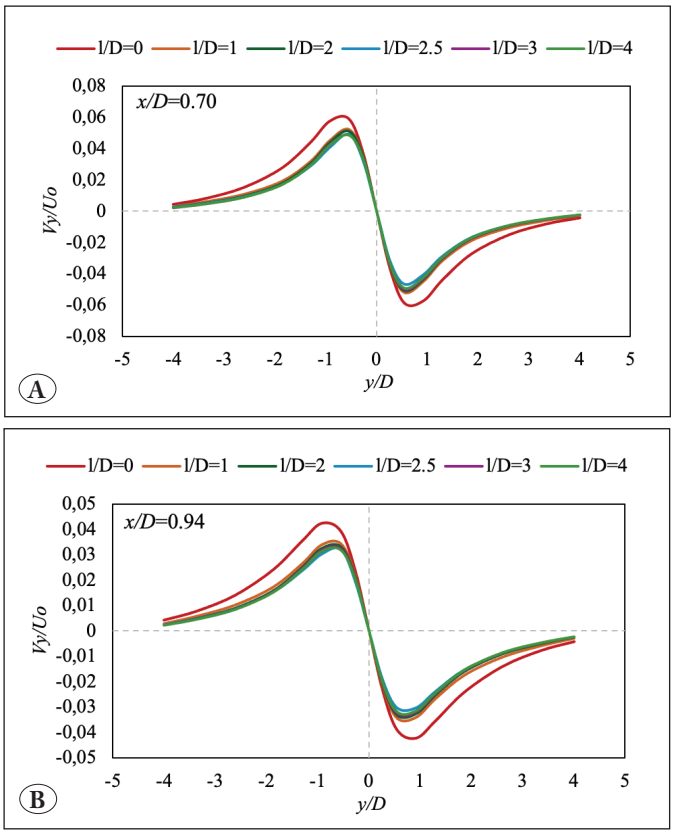
uzaklaştırılmasının hız dağılımı üzerinde önemli değişikliklere yol açtığını göstermektedir. Örneğin ağzın ölü son üzerinde olduğu konumundan, 1*D* mesafeye taşınması halinde *x/D*=0.70 konumunda maksimum hız yaklaşık %17, *x/D*=0.94 kesitinde ise yaklaşık %21 oranında azalmaktadır. Bu sonuçlar, ağzın duvardan (*l/D*=0), 1*D* mesafesine taşınmasının akım üzerinde en büyük etkiyi yarattığını göstermektedir. Ancak mesafe daha da artırıldığında azalma oranı belirgin şekilde düşmekte, 1*D*'den 2*D*'ye ve 2*D*'den 2.5*D*'ye geçişte hız değişimi %5–6 düzeyine inmektedir. *l/D*=2.5 değerine ulaşıldığında hızdaki azalma nispeten küçük kalmakta ve bu noktadan sonra değişim ihmal edilebilir düzeye gelmektedir. l/D=0 ve 2.5 değerleri birlikte incelendiğinde ise duvar sınır etkileri dolayısıyla oluşan hızlarda %33 mertebesinde bir artış olabileceği görülmektedir.

Şekil 13, kanal yatay ekseni (*y/D*) boyunca farklı *l/D* değerleri için *x/D*=0.70 ve *x/D*=0.94 konumlarındaki *Vx/Uo* hız dağılımlarını göstermektedir. Maksimum hız değerleri Tablo 1'de sunulduğundan burada tekrarlanmamıştır. Hız dağılımları incelendiğinde, *l/D*=2.5 değerine kadar hız profillerinin küçülmeye devam ettiği, bu noktadan itibaren ise üst üste geldiği görülmektedir.

Çizelge 1. Farklı *l* mesafeleri için maksimum hız değişimi.

	x/D=0.70		*x/D*=0.94	
l/D	$(Vx/Uo)_{maks}$	Fark (%)	$(Vx/Uo)_{maks}$	Fark (%)
0	0.1619	-	0.1165	-
1	0.1381	-17.22	0.0966	-20.52
2	0.1307	-5.73	0.0924	-4.55
2.5	0.1244	-5.01	0.0880	-4.99
3	0.1252	0.59	0.0881	0.02
4	0.1248	-0.31	0.0885	0.48

Şekil 14, kanal yatay ekseni (*y/D*) boyunca farklı *l/D* değerleri için *x/D*=0.70 ve *x/D*=0.94 konumlarındaki *Vy/Uo* yatay hız dağılımlarını göstermektedir. Tablo 2 ise ilgili kesitlerdeki maksimum *Vy/Uo* değerlerinin farklı *l/D* düzeneklerine göre değişimini göstermektedir.



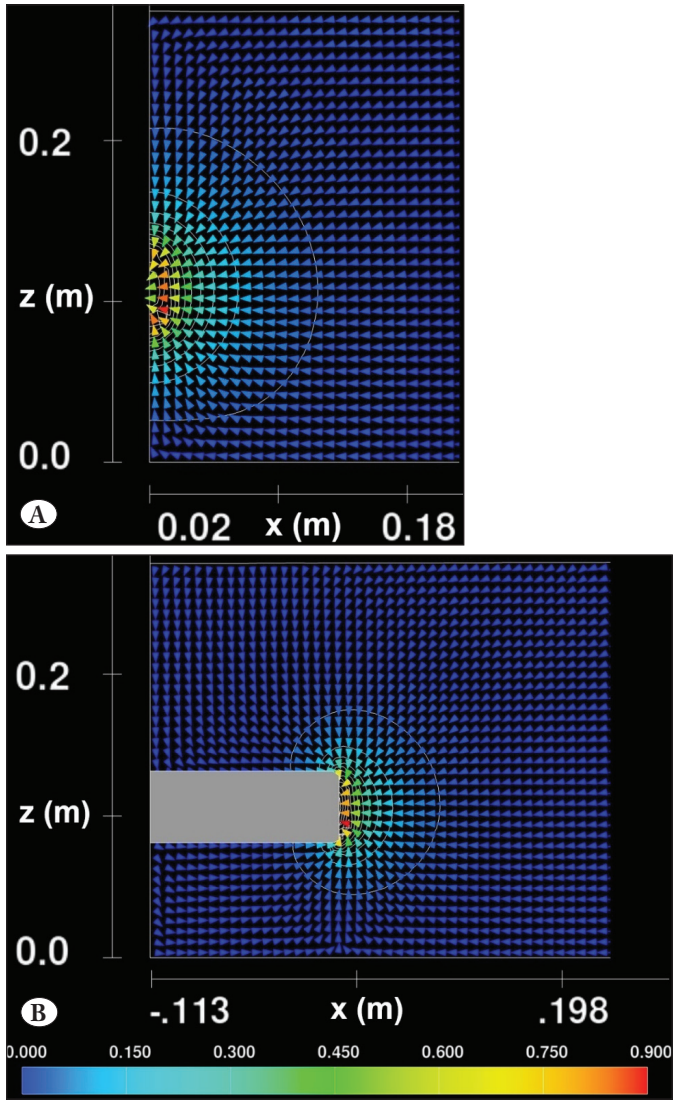
Şekil 14. Farklı *l/D* değerlerinde yatay düzlemde *Vy/Uo* dağılımı (a) *x/D*=0.70, (b) *x/D*=0.94.

Şekil 14 ve Çizelge 2 incelendiğinde, ağzın duvardan uzaklaştırılmasıyla birlikte *y* yönündeki hız bileşeninde (*Vy*) de belirgin bir azalma olduğu görülmektedir. Özellikle *l/D*=0 konumundan 1*D* mesafesine gelindiğinde, maksimum *Vy/Uo* değerleri sırasıyla yaklaşık %13 (*x/D*=0.70) ve %23 (*x/D*=0.94) oranında azalmaktadır. Bu durum, tıpkı *x* yönündeki hız bileşeninde olduğu gibi, en büyük etkinin ağzın duvara en yakın konumdan 1*D* mesafesine uzaklaştırılmasıyla gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Ancak mesafe 1*D*'den daha fazla artırıldığında, hızlardaki değişim giderek azalmış ve özellikle *l/D*=2.5 değerinden sonra mutlak değişim miktarları sınırlı kalmıştır. Bu durum, *l/D*=2.5 mesafesinin akım davranışında bir limit değer niteliği taşıdığını ve bu noktadan sonra gerek *x* gerekse *y* yönündeki hız bileşenlerinde meydana gelen farklılıkların ihmal edilebilir düzeye ulaştığını göstermektedir.

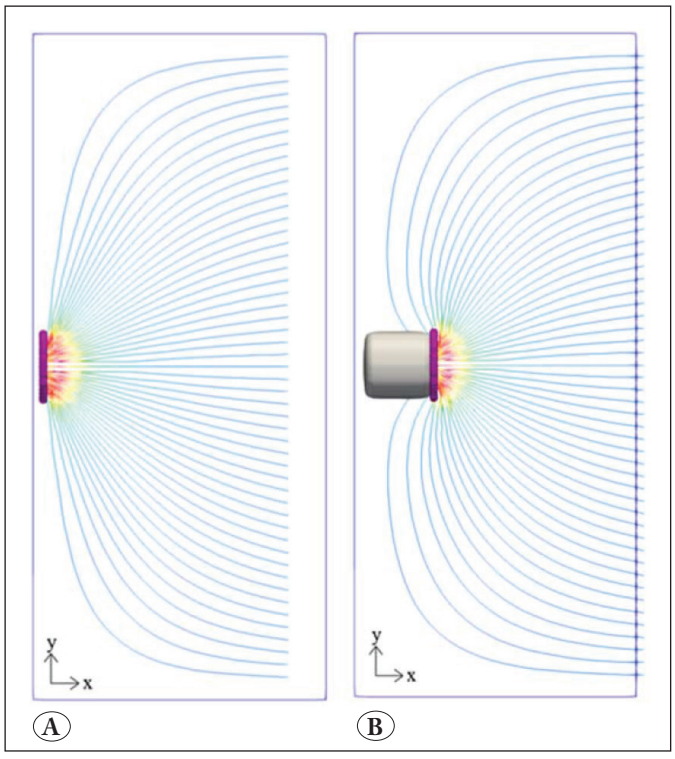
Şekil 15 ise *x*-*z* düzlemi için eş hız eğrileri ve hız vektörleri dağılımının *l/D*=0 ve *l/D*=2.5 düzenekleri için değişimini göstermektedir.

Çizelge 2. Farklı l mesafeleri için *Vy/Uo* değişimi.

	x/D=0.70		*x/D*=0.94	
l/D	$(Vy/Uo)_{maks}$	Fark (%)	$(Vy/Uo)_{maks}$	Fark (%)
0	0.0588	-	0.0425	-
1	0.0521	-12.85	0.0344	-23.46
2	0.0510	-3.53	0.0331	-3.87
2.5	0.0490	-3.09	0.0321	-3.36
3	0.0488	-0.41	0.0320	-0.33
4	0.0487	-0.21	0.0319	-0.30



Şekil 15. Eş hız eğrileri ve hız vektörleri (a) *l/D*=0, (b) *l/D*=2.5.



Şekil 16. Ağız merkez yüksekliğinde oluşan akım çizgileri (a) *l*/*D*=0 (b) *l*/*D*=1.

Şekil 16, su alma ağzının ölü son duvarına bitişik konumda bulunduğu (*l*/*D*=0) ve duvardan uzak yerleştirildiği ilk durum için (*l*/*D*=1), ağız merkez yüksekliğinde meydana gelen akım çizgilerini göstermektedir. *l*/*D*=0 durumunda, suyun ağza yaklaşabileceği alan teorik olarak sadece ön taraftaki bir yarı küreyle sınırlıdır. Ağız duvardan 1*D* kadar uzaklaştığında ise suyun ağzın çevresinden ve hatta duvar ile ağız arasından dolanarak girmesi için fiziksel bir hacim oluşur. Bu durum, ölü son duvarının akım üzerindeki sınırlayıcı etkisini zayıflatarak akım çizgilerinin boru arka bölgesine doğru daha geniş bir alana yayılmasına neden olmaktadır.

6. Sonuçlar

Su alma yapıları, doğal veya yapay su kaynaklarından belirli miktarda suyun kontrollü bir şekilde temin edilmesini sağlayan hidrolik yapılar olup enerji üretimi, sulama ve içme suyu temini gibi çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Bu yapıların hatalı tasarımı, ağza hava girişi, vorteks oluşumu, kavitasyon, sediment taşınımı ve yapısal aşınma gibi sorunlara yol açarak debi kapasitesinin azalmasına, bakım maliyetlerinin artmasına ve hatta iletim hatlarının işlevsiz hale gelmesine neden olabilmektedir. Dolayısıyla akım davranışının anlaşılması ve kritik sınır koşullarının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma, dairesel kesitli bir su alma ağzının ölü son duvarına olan mesafesinin, ağız membasındaki hız dağılımı üzerindeki etkilerini incelemektedir. Literatürde akım sınırlarının hız dağılımını önemli ölçüde etkilediği ortaya konulmuş olmakla birlikte, ağız–duvar mesafesinin hangi değerden itibaren akımı etkilediğine dair net bir bilgi bulunmamaktadır. Bu kapsamda, sayısal modelin doğrulanması için gerekli veriler deneysel ölçümlerden elde edilmiş, modelin kalibrasyonunun ardından deneysel olarak incelenemeyen düzenekler sayısal yöntemlerle analiz edilmiştir. Araştırmanın öne çıkan bulguları şu şekilde özetlenebilir:

- Su alma ağzı duvara bitişik konumda (*l*/*D*=0) iken hız değerleri en yüksek düzeyde olup, duvardan uzaklaştıkça hızlar azalmaktadır.
- Ağzın duvara olan mesafesi *l*/*D*=1 olacak şekilde artırıldığında hem *x* hem de *y* yönündeki hız bileşenlerinde en büyük değişim gözlenmiş, yaklaşık %17–21 oranında bir azalma meydana gelmiştir.
- 1*D*'den sonraki mesafelerde hız değişimleri giderek azalmakta; özellikle *l*/*D*=2.5 değerinden itibaren farklar ihmal edilebilir düzeye inmektedir. Bu nedenle, söz konusu mesafe limit uzaklık olarak tanımlanmıştır.
- *l*/*D*=2.5 mesafesinden sonra hız profillerinde meydana gelen değişimlerin ihmal edilebilir düzeyde olması, bu mesafenin üzerindeki su alma ağzı yerleşiminin hidrolik açıdan ilave bir avantaj sunmadığını ve gereksiz yapı maliyetine yol açabileceğini ortaya koymaktadır.
- Su alma ağzının ölü son duvarına olan mesafesi, akım doğrultusundaki maksimum hız değerini %33 oranında değiştirebilmektedir. Ağzın duvara bitişik (*l*/*D*=0) ya da duvara çok yakın (*l*/*D*<1) konumlandırılmasının zorunlu olduğu durumlarda, akım doğrultusundaki maksimum hızlarda meydana gelen bu belirgin artışın tabanda oyulma ve yapısal elemanlarda aşınma riski oluşturabileceği görülmektedir.
- Aynı şekilde, ağzın duvara olan mesafesi, kanalın enine doğrultusundaki maksimum hız değerlerinde de %24 oranında bir değişime yol açabilmektedir.

Yazar Katkısı: Kerem Taştan: Çalışmanın kavramsal çerçevesini oluşturmuştur. Efe Barbaros: Veri toplama ve analiz süreçlerini yürütmüş, bulguları değerlendirmiş ve makaleyi hazırlamıştır.

Etik Kurul Onayı: Bu çalışma etik kurul onayı gerektirmemektedir.

Kaynaklar

Anayiotos, A. S., Perry, G. J., Myers, J. G., Green, D. W., Fan, P. H., & Nanda, N. C. (1995). A numerical and experimental investigation of the flow acceleration region proximal to an orifice. *Ultrasound Med. Biol., 21(4)*, 501-516. https://doi.org/10.1016/0301-5629(94)00141-Y

Bryant, D. B., Khan, A. A., & Aziz, N.M. (2008). Investigation of flow upstream of orifices. *J. Hydraul. Eng., 134(1*), 98-104. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:1(98)

Chanson, H., Aoki, S. I., & Maruyama, M. (2002). Unsteady two-dimensional orifice flow: a large-size experimental investigation. *J. Hydraul. Res., 40(1)*, 63-71. https://doi.org/10.1080/00221680209499874

Erat, B., Barbaros, E., & Taştan, K. (2024). Experimental and numerical investigation on flow and scour upstream of pipe intake structures. *Arab. J. Sci. Eng., 49(4)*, 5973-5987. https://doi.org/10.1007/s13369-023-08539-5

Eroğlu, N., & Bahadırlı, T. (2007). Prediction of critical submergence for a rectangular intake. J. Energy Eng., 133(2): 91-103. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9402(2007)133:2(91)

Goring, D. G., & Nikora, V. I. (2002). Despiking acoustic Doppler velocimeter data. *J. Hydraul. Eng., 128(1)*, 117-126. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:1(117)

Hirt, C. W., & Nichols, B. D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J. Comput. Phys., 39(1)*, 201-225. https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5

Islam, M. R., & Zhu, D. Z. (2011). Flow upstream of two-dimensional intakes. *J. Hydraul. Eng., 137(1)*, 129-134. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000284

Karmacharya, S. K., Ruther, N., Aberle, J., Shrestha, S. M., &Bishwakarma, M. B. (2021). Physical modelling of pressure flushing of sediment using lightweight materials. *J. Appl. Water Eng. Res., 9(3)*, 251-263. https://doi.org/10.1080/23249676.2021.1919224

Khanarmuei, M. R., Rahimzadeh, H., Kakuei, A. R., & Sarkardeh, H. (2016). Effect of vortex formation on sediment transport at dual pipe intakes. *Sādhanā, 41(9)*, 1055-1061. https://doi.org/10.1007/s12046-016-0531-6

Kocabaş, F., & Yıldırım, N. (2002). Effect of circulation on critical submergence of an intake pipe. *J. Hydraul. Res., 40(6)*, 741-752. https://doi.org/10.1080/00221680209499920

Köse, Ö., & Yanmaz, A. M. (2010). Scouring reliability of bridge abutments. *Teknik Dergi, 21(105)*, 1387–1402.

Nakayama, A., & Hisasue, N. (2010). Large eddy simulation of vortex flow in intake channel of hydropower facility. *J. Hydraul. Res., 48(4)*, 415-427. https://doi.org/10.1080/00221686.2010.491644

Powell, D. N., & Khan, A. A. (2012). Scour upstream of a circular orifice under constant head. *J. Hydraul. Res., 50(1)*, 28-34. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000960

Rajaratnam, N., & Mazurek, K. A. (2002). Erosion of a polystyrene bed by obliquely impinging circular turbulent air jets. *J. Hydraul. Res., 40(6),* 709–716. https://doi.org/10.1080/00221680209499917

Shammaa, Y., Zhu, D. Z., & Rajaratnam, N. (2005). Flow upstream of orifices and sluice gates. *J. Hydraul. Eng., 131(2)*, 127-133. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:2(127)

Sontek. (2007). Horizon ADV Kullanım Kılavuzu. ABD: SonTek/YSI.

Taştan, K. (2018). Prediction of critical submergence in a two-layer-stratified fluid flow. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng., 40(4)*, 181. https://doi.org/10.1007/s40430-018-1112-x

Taştan, K., & Yıldırım, N. (2017). Effective intake for critical submergence in the case of more than one intake. *KSCE J. Civ. Eng., 21(3)*, 1004-1008. https://doi.org/10.1007/s12205-016-0073-9

Taştan, K., Erat, B., Barbaros, E., & Eroğlu, N. (2023). Flow boundary effects on scour characteristics upstream of pipe intakes. *Ocean Eng., 278*, 114343. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114343

Tokyay, T. E., & Constantinescu, S. G. (2006). Validation of a large-eddy simulation model to simulate flow in pump intakes of realistic geometry. *J. Hydraul. Eng., 132(12)*, 1303-1315. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:12(1303)

Wahl, T. L. (2003). Discussion of "Despiking acoustic Doppler velocimeter data" by Derek G. Goring and Vladimir I. Nikora. *J. Hydraul. Eng., 129(6),* 484-487. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:6(484)

Wei, G. (2015). The sponge layer method in Flow-3D. Flow Sci. Rep., 07-15

Yıldırım, N., & Kocabaş, F. (1995). Critical submergence for intakes in open channel flow. *J. Hydraul. Eng., 121(12)*, 900-905. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:12(900)

Yıldırım, N., & Taştan, K. (2009). Critical submergence for multiple pipe intakes. *J. Hydraul. Eng., 135(12)*, 1052-1062. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000127

Karaelmas Science and Engineering Journal
Journal home page: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen
DOI: 10.7212/karaelmasfen.1814635

Research Article
Received / Geliş tarihi : 31.10.2025
Accepted / Kabul tarihi : 26.01.2026

The Association Between Artificial Intelligence Adoption, Trade Facilitation, and Estimated Trade Cost Reduction Potential: A Regional Qualitative-Quantitative Exploratory Analysis

Yapay Zeka Benimsenmesi, Ticaretin Kolaylaştırılması ve Tahmini Ticaret Maliyeti Azaltma Potansiyeli Arasındaki İlişki: Bölgesel Bir Keşif Analizi

Hakan Kaya*

Republic of Türkiye, Kestel Municipality, Department of Engineering, Bursa, Türkiye

Abstract

This qualitative–quantitative exploratory analysis investigates descriptive patterns linking regional levels of artificial intelligence adoption, trade facilitation implementation, and estimated potentials for reduction in international trade costs. By using regional aggregates (N=7) from the UN Global Survey on Digital and Sustainable Trade Facilitation (2025) and McKinsey's State of Artifical Intellegence Report (2025), ridge regression analysis is used solely with the purpose of stabilizing numerical values due to high multicollinearity Variance Inflation Factor (VIF) > 120. The values derived (β ≈ -0.31 to -0.34) are not interpretable within the context of causality or inferential explanation, but only indicative of certain heuristics that correspond with the law of diminishing returns, especially within the early adopting groups. Considering the extremely small sample size, proxy variables, and cross-sectional nature, all the results are only to be taken as pattern-generating inputs within the formation of hypotheses for future, more robust research. The results are therefore not to be taken as evidence of inference for regression or for effect sizes but only for descriptive patterns.

Keywords: Artificial intelligence, digital divide, small sample limitations, trade facilitation, trade costs

Öz

Bu keşifsel çalışma, yapay zekâ benimsenmesinin bölgesel düzeyleri, ticaretin kolaylaştırılması uygulamaları ve uluslararası ticaret maliyetlerinde tahmini azalma potansiyeli arasındaki istatistiksel ilişkiyi incelemektedir. BM Dijital ve Sürdürülebilir Ticaretin Kolaylaştırılmasına İlişkin Küresel Anketi (2025) ve McKinsey'in Yapay Zekâ Durumu Raporu'ndan (2025) açık olarak erişilebilen bölgesel toplam verileri (N = 7) kullanarak, sıradan en küçük kareler spesifikasyonlarında gözlemlenen ciddi çoklu doğrusallığı (VIF> 120) azaltmak için ridge regresyon modelleri tahmin edilmektedir. Bulgular, mevcut veri sınırları içinde, yapay zekâ benimseme düzeyleri ile kalan ticaret maliyeti azaltma potansiyeli arasında gözlemlenebilen betimsel bir eğilimi yansıtmaktadır (β ≈ −0,31 ila −0,34). Bu, erken benimseyenlerin verimlilik artışının büyük bir kısmını zaten elde etmiş oldukları hipoteziyle tutarlıdır. Örneklem büyüklüğünün oldukça küçük olması, yüksek çoklu doğrusallık, aşırı öğrenme riskleri, endojenite endişeleri ve proxy tabanlı değişken inşası gibi faktörler göz önünde bulundurulduğunda, bulguların nedensel, yönlü veya genelleştirilebilir olmaktan ziyade, daha çok öncü ve çıkarım dışı paternler olarak değerlendirilmesi niteliğinde yorumlanmalıdır ve ileride yapılacak daha kapsamlı araştırmalar için hipotez oluşturma amacı taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yapay zekâ, dijital uçurum, küçük örneklem sınırlamaları, ticaret maliyetleri, ticaretin kolaylaştırılması

*Corresponding author: hakanware@hotmail.com

Hakan Kaya orcid.org/0000-0002-0812-4839

This work is licensed by "Creative Commons Attribution-NonCommercial-4.0 International (CC)".

1. Introduction

In this research, the correlation between the adoption of artificial intelligence (AI) and trade facilitation is analyzed, with the aim of revealing residual potential for cost reduction. The research does not make conclusive statements but tries to uncover first correlations with a precisely defined set of variables relevant to policies in seven international regions.

The sample size available for analysis, albeit limited (N=7), translates into serious challenges of the study's power, the threat of overfitting (with a coefficient of determination R^2 (R-squared) of 0.997), and significant multicollinearity (with VIF values highly in excess of 120). More importantly, the chief independent variable, AI adoption, has been operationalized as the best available regional proxy based on the results of a survey, which carries underlying assumptions. In view of these underlying limitations, rather than focusing on making estimates informed by this study, it may be safely said that the value of this study consists of its cautious quantitative analysis embedded in an interpretation informed by a consideration of the imperatives of effective global governance.

However, the purpose of this study is neither to estimate structural relationships nor test economic hypotheses, nor produce policy-relevant effect sizes. It instead follows a qualitative-quantitative exploratory approach, wherein the role of regression analysis is purely descriptive, with the objective of hypothesis formulation for future studies. The presence of strong constraints imposed by the sample size of N=7 makes the degrees of freedom unsuitable for regression analysis, regardless of the estimation procedure adopted.

The three exploratory research questions that this inquiry pursues are: (1) Do the available data reveal any consistent descriptive patterns? (2) How is the implementation of AI related to efficiency in the context of trade? (3) To what extent do regional differences, especially those that distinguish emerging nations and the more fragile regions, reflect the divergent evolution processes regarding the readiness of digital trade?

The significance of this research becomes apparent at the intersection of exploration and explanation. In highlighting the limitations of methodologies while framing the results using the lenses of governance as well as equity, this research intends to provide insights rather than dictate a discussion on the issue of inclusive digital trade. A mixed descriptive research approach shall be used, in which the information on regions shall combine concepts of policies in the framework of hypothesis formulation, without hypothesis testing.

In the given cross-sectional data and in the existence of possible endogeneity between the adoption of AI and the facilitation of trade, there are no conclusions drawn on causality. Rather, it is based on the heuristic pattern-generating mode as presented in Section 2.2.

1.1. Literature Review

1.1.1. Theoretical and Economic Implications of Artificial Intelligence on International Trade

AI and technological transformation are some of the key forces that are significantly impacting the realm of global trade at present. AI may impact the theory of trade by decreasing costs of production, enhancing logistics, and overcoming information asymmetry (Goldfarb & Trefler, 2018). The predictive nature of AI, as asserted by Agrawal et al. (2019), brings uncertainty to the labor market, which influences the structures of trade. The opportunities and challenges presented by AI for developing countries, as portrayed by Aly (2022), play a significant role in the aspects affecting international trade. The challenges and opportunities presented by AI for international trade are incorporated in modern studies. According to a study published by Ferencz et al. (2022), the early effects of AI on trade are still apparent, as revealed by OECD research. Ganne et al. (2024) analyze AI-trade interaction as a "two-way interaction" process, where trade influences AI developments, which, in turn, transform trade operations. Achar (2019) and Ahmedov (2020) examine the emerging effects of the digital economy on international trade and identify the role of digitalization in developing areas of the global community in boosting their competitiveness.

1.1.2. Digital Transformation and Facilitating Trade

A new stream of research focuses on the role of digitalization in trade facilitation. In this line, Ciuriak and Ptaškina (2018) argue that the process of digitalization has radically changed trade, while others describe global trading platforms as "next-generation trade facilitation mechanisms" (Winn, 2019). Further, Duval and Utoktham (2024) show, through a structural gravity approach, the results of disaggregating trade facilitation indicators with respect to trade volume. Dong and Liu (2023) emphasize the importance of the factors concerning the promotion of cross-border e-commerce in China. Conversely, Ouyang and Park (2024), and Wang and Zhu (2024) examined the role of

digital trade facilitation in diversifying exports in the Belt and Road nations. The facilitation of sustainable electronic trade in ASEAN has been reported (Lei et al., 2024). The effect of AI on the facilitation of international trade has also been explored on Latin American (Quindimil, 2024). The use of electronic technologies has been considered of Ukraine (Vorobiova et al., 2023).

1.1.3. AI Adoption Strategies, Digital Readiness, and Regional Asymmetries

Literature on the adoption processes of AI focuses on the competitive advantage strategies adopted by businesses. Theoretical frameworks for digital business strategy are offered by Bharadwaj et al. in 2013, with emphasis on AI adoption in the works of Kitsios and Kamariotou in 2021 and Kraus et al. in 2021. Kar et al. (2021), for instance, discussed the hindrances and motivations for investing in AI from a strategic management point of view, while models for online leadership and a study on readiness for AI are provided by Holmström (2022) and Tursunbayeva & Gal (2024). The role of AI in optimizing supply chain tasks, for example, is well-articulated by Borges et al. (2021) and Tao et al. (2025). The extent to which AI and electronic trade have affected the region varies significantly. According to Ismail (2021), electronic trade facilitation enhances the volume of bilateral trade for Asian nations. Kere and Zongo (2023) argue that the role of electronic technologies is to promote the growth of regional trade in Africa. Taken together, it is clear that the adoption of AI is not the same for all regions and that digital preparedness is an important determinant of trade cost potential differentials across regions.

1.1.4. Governance, Legal Frameworks, and Future Directions

Data is considered the lifeblood of AI, and data flows are inevitably connected to trade. Barriers within the institutional framework of international digital trade governance have been studied by Meltzer (2019), and Burri (2021) has analyzed big data in international trade law.

The AI and international trade literature covers far more than just economic aspects, and also includes legal and governance aspects, among others. Aslam et al. (2024) and Khan (2024) analyze the impact of AI technology that is rapidly growing and transforming international trade law, specifically regarding the sharing of data, intellectual property, and jurisdictional voids. The presence of AI technology introduced in international trade confronts a number of legal and governance issues. Shadikhodjaev (2021) analyzes the role of technology neutrality regarding digital trade, and Collins (2023) not only points out potential dangers but also opportunities for the facilitation of digital trade that concern the WTO, specifically regarding small and medium-sized enterprises. In evaluating previous research, some common themes recur. Menzies et al. (2024) provide a broad agenda that includes the use, challenges, and future research related specifically to AI and international business. OECD/BCG/INSEAD (2025) offers a report on the adoption of AI at the firm level. The development and governance of digital trade agreements like DEPA are also important for the future digital trade environment (Peters, 2023; Jones, 2023).

Ozturk (2024) also points out the challenges faced by the trade market through AI, together with the benefits the technology possesses. Mirzaye and Mohiuddin (2025) focus on the opportunities presented by the digital revolution and the challenges related to policies. Recent research has examined the impact AI can have on the survival plan for SMEs during a crisis (Tao et al., 2025; Muhammad et al., 2025).

2. Materials and Methods

2.1. Data and Variable Construction

The analysis uses region-level data aggregated from two primary sources: (1) The Global Survey on Digital and Sustainable Trade Facilitation (UN, 2025), which offers data on Trade Facilitation Implementation Rate (%) and Trade Cost Reduction Potential (%) for seven aggregated regions, and (2) The State of AI (McKinsey, 2025) report, which uses online survey data to purchase global and sectoral adoption rates for firms. The State of AI survey in 2025 was administered online to a total of 1,993 respondents between June 25 and July 29, 2025. The survey included representation from 105 nations, regions, industry segments, company sizes, areas of subject-matter expertise, and organizational levels. Approximately thirty-eight percent of respondents were employed within firms earning annual revenues over $1 billion. The method for data acquisition consisted of three tiers: expert survey completion, verification by desk research and interviews with UN regional commissions, and validation with governments. Updates range from 2023 to 2025; trade-cost data are available up to 2021-2023; the global average implementation rate increased by 5 percentage points to 71% across 31 general and digital measures. Some of the important limitations are the exclusion of non-applicable measures; the low full-implementation rates in tricky areas, for example, cross-border paperless trade at 49%; data gaps on emerging fields like trade finance and green facilitation;

and challenges on cross-border interoperability, especially for developing economies and SIDS (Small Island Developing States). Though regional trends can be generalized from this dataset, such generalization should therefore take into account differences in economic capacity, infrastructure, and policy priorities across countries within regions. The data collected was adjusted based on how much each participant's country contributes to the global gross domestic product (GDP). This was done to ensure that geographical differences in response rates were balanced. According to the adoption criterion defined as "the use of AI in at least one job function," the 2025 data coincides with that this rate has reached 78%, and distributing it according to each region's share of world GDP (World Bank, 2025) and its digital infrastructure scores (ITU, 2025). For example, Developed Economies-roughly 60% of global GDP and top-ranked on the ITU ICT Development Index with scores over 90-are assigned about 95% AI adoption. In contrast, SIDS, for which poor connectivity means that even mobile internet penetration is only 45% (GSMA, 2025), has an estimate of 28%. These findings reveal that artificial intelligence technologies have now become a critical operational component across a broad segment of the global business world.

2.1.1. Regional Disaggregation of AI Adoption: Methodology and Assumptions

The regional AI Adoption Level cannot be seen directly, so it is constructed as a composite proxy that combines economic ability and digital infrastructure preparedness, two recognized facilitators of technology diffusion (OECD, 2021). Let A(global) = 0.78 referring to the McKinsey (2025) report, this is the global firm-level AI adoption ratio, which is defined as the proportion of firms that leverage AI in one or more business functions. Based on this, for region (r), the adoption level is derived as:

$$AI_r = AI_{global}\left[w_1\left(\frac{GDP_r}{GDP_{world}}\right) + w_2\left(\frac{IDI_r}{IDI_{max}}\right)\right] \quad (1)$$

In the equation (1), AI_{global} refers to the global rate of AI adoption as reported by McKinsey (2025), GDP_r / GDP_{world} stands for the regional share of global GDP (World Bank, 2025), and IDI_r / IDI_{max} is the normalized ICT Development Index score (ITU, 2025). The IDI is a composite index that consists of different ICT access, use, and skills. Normalized means that the region's score is divided by the highest score in the region, which ensures that the component is between 0 and 1. The weights given to GDP and IDI, respectively, equal weights of importance (w_1= w_2=0.5) and are based on both theoretical and pragmatic arguments.

On the one hand, economic scale (measured through GDP) and digital infrastructure (measured through IDI) are considered two main factors for technology adoption in the literature: GDP mirrors market size, firm density, and investment capacity—major drivers of AI diffusion (Goldfarb & Trefler, 2018; OECD, 2025). IDI reflects connectivity, device penetration, and the provision of digital services by local authorities—necessary conditions for AI implementation (ITU, 2025; World Bank, 2023).

Due to the lack of firm-level AI adoption data for each region, the best-fitting weights (e.g., by factor analysis or regression) cannot be determined in an empirical manner. Unequal weighting would entail the making of normative assumptions that are not supported by the existing explorers. Hence, equal weighting has been chosen as a neutral, clear, and easily repeatable default— in line with the practice of creating exploratory composite indices when there is a lack of data (Joint Research Centre, 2008).

The final dataset consists of the following seven regions: Developed Economies, Southeast and East Asia, Latin America and the Caribbean, the Middle East and North Africa, South Asia, Sub-Saharan Africa, and Pacific Islands (see Table 1).

It should be noted that this proxy method introduces non-classical measurement error, whose direction and magnitude are not capable of being measured with the given data. The equal weight method is not proposed as the best method but only in the sense that it provides transparency and replicability in the face of very limited data. Any form of weighted analysis could not be attempted without the introduction of further assumptions.

2.2. Econometric Specification and Methodological Limitations

2.2.1. Ridge Regression Specification and Diagnostics

The limitations that are being discussed in this text are structural in nature and not technical. Ridge regression is being used only for numerical stability in situations with high multicollinearity, but it does not in any way alleviate the problem of low degrees of freedom in the given data set with N=7.

Table 1. Regional data on trade facilitation, AI adoption, and remaining trade cost reduction potential (negative values indicate unrealized reduction margins).

Region	Implementation Rate (%)	AI Adoption Level (%)	Trade Cost Reduction Potential (%)
Developed Economies	86	95	-5.27
Southeast and East Asia	79	85	-10.30
Latin America and the Caribbean	70	65	-12.38
Middle East and North Africa	68	60	-9.10
South Asia	65	55	-12.28
Sub-Saharan Africa	62	45	-16.91
Pacific Islands	45	28	-23.85

Note: Trade Cost Reduction Potential is expressed as a negative value to denote the remaining margin for cost reduction relative to a fully optimized benchmark. Larger negative values therefore indicate greater unrealized efficiency potential rather than higher costs.

The R^2 value of 0.997 obtained in the current dataset is not consistent with the high explanatory power of the model. On the contrary, this value is a result of deterministic overfitting in a regression performed with two highly correlated variables ($r \approx 0.99$) in a tiny sample size of N = 7. In such cases, R^2 should be interpreted as a 'small sample bias' rather than a 'measure of fit.' Similarly, narrow confidence intervals and low p-values in Ordinary Least Squares (OLS) outputs are a reflection of the deterministic nature of the data rather than statistical reliability. Ridge regression modifies the OLS loss function by adding a penalty term proportional to the square of the magnitude of the coefficients (L2 penalty). The ridge estimator is defined as (Equation 2):

$$\beta_{ridge} = \arg min_{\beta} \{ \sum_{i=1}^{N} \left(y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^{p} \beta_j x_{ij} \right)^2 + \lambda \sum_{j=1}^{p} \beta_j {}^2 \} \quad (2)$$

Where, λ is the penalty parameter controlling the strength of regularization, β_j are the coefficients for the predictors, and β_0 is the intercept.

Data Preprocessing and Standardization: Before ridge estimation, all predictor variables (Trade Facilitation Implementation Rate and AI Adoption Level) were standardized (centered and scaled to have zero mean and unit variance) so that the regularization penalty would be uniformly applied across predictors and to avoid scaling biases. The dependent variable (Trade Cost Reduction Potential) was only centered to keep the interpretability in the original units. Standardization is essential in ridge regression as the L2 penalty is sensitive to variable scales.

Choosing the Penalty Parameter (λ): The best penalty parameter was determined using Leave-One-Out Cross-Validation (LOOCV), given the extremely small sample size (N=7). LOOCV leaves out one observation at a time, fits the model with the rest of the six observations, and calculates the prediction error for the observation that was left out. The process is done for all observations, and the mean squared prediction error (MSPE) is computed for each candidate λ value. The λ that leads to the lowest MSPE is the optimal one. The LOOCV error curve shown in Figure 2 (Panel B) has a distinct minimum at λ=1.0 (log10(λ) = 0). This was the final value of the penalty parameter.

Explanation for the Very Large Intercept in Ridge Output: The high intercept value (about 323.9) shown in the ridge regression output (Table 3, Ridge column) is an immediate result of centering the predictors but leaving the response variable only centered (not standardized). When predictors are standardized (mean-centered) in ridge regression, but the response variable is simply centered, the intercept can be interpreted as the mean of the centered response when all predictors are at their mean values (i.e., zero in the standardized space). The big number is merely a by-product of the scaling and centering operation, and there is no real interpretation to be made from it; it shouldn't be seen as a genuine baseline trade cost reduction. The main target of ridge estimation is solely on the coefficients that have been regularized and stabilized. Ridge regression is a good choice for this situation because multicollinearity is mitigated by shrinking coefficients towards zero as it reduces and stabilizes variance, despite the introduction of bias (bias-variance trade-off), and paradoxically, it leads to more accurate and consistent estimates compared to OLS when predictors are correlated.

Risk of overfitting is reduced in the case of the model with 2 predictors and only 7 observations because a penalty term on the loss function is in place and is meant to limit how closely coefficients adapt to the noise of the small sample.

The ridge trace plot (Figure 2, Panel A) illustrates the stabilization of standardized coefficients as λ is increased. The plot illustrates that the trade facilitation coefficient is rapidly shrinking towards zero while the AI adoption coefficient is negatively stable and consistent, which is consistent with the observation of its stronger hold in this dataset.

Ridge has limitations in this context that are worth mentioning. Even though ridge regression may offer numerically stabilized estimates compared to OLS, it does not address the fundamental limitations of this study, namely, a very small sample size (N=7), proxy-based variable construction, and a cross-sectional design. Thus, ridge coefficients *(β_TF≈0.0032, β_AI≈−0.3189)* should be seen only as indicative patterns for further investigations with larger datasets and not as accurate or generally applicable causal estimates. The primary use of this model is heuristic; it helps generate hypotheses about possible relationships between AI adoption, trade facilitation, and cost reduction potential more systematically than the untenable OLS specification.

The basic econometric model is specified by the following equation (Equation 3).

$$\text{Trade_Cost_Reduction}_i = \beta_0 + \beta_1(\text{TF_Implementation_Rate}_i) + \beta_2(\text{AI_Adoption_Level}_i) + \varepsilon_i \quad (3)$$

Here, $\text{Trade_Cost_Reduction}_i$ is the dependent variable measuring the trade cost reduction potential of country 'i.'. $\text{TF_Implementation_Rate}_i$: The independent variable indicating the extent to which country 'i' implements trade facilitation agreements. $\text{AI_Adoption_Level}_i$: The independent variable measuring the intensity of country 'i' adoption and use of artificial intelligence technologies. β_0: The constant term (intercept), β_1, β_2: The coefficients to be estimated, ε_i: The error term.

However, four critical methodological constraints need to be emphasized:

(1) Sample Size N = 7: There are not enough degrees of freedom to do reliable statistical inference with only seven observations. The very high R^2 of 0.997 and narrow widths of Continuous Integration (CI) is artifacts of overfitting and unaddressed endogeneity rather than explores of robust explanatory power.

(2) Severe Multicollinearity: The two independent variables are highly correlated, VIF > 120, suggesting that they measure overlapping dimensions of digital readiness. This means that the estimates of the individual coefficients-especially for trade facilitation unstable and cannot be interpreted in isolation. Whereas single-variable regressions for both predictors yield significant negative effects, as shown in Table 3 ($\beta_TF = -0.4312$, $p < 0.001$; $\beta_AI = -0.3167$, $p < 0.001$), their joint inclusion renders the OLS estimates statistically non-identifiable. Critically, due to N = 7 and VIF > 120, the OLS estimates reported in Table 3 (Full Model column) must not be used for any inferential purpose. They are presented solely for diagnostic illustration—to document the severity of multicollinearity and justify the use of ridge regression as a numerically stabilized alternative.

(3) Cross-Sectional and Static Design: The information refers to one point in time, 2025, and cannot show dynamic feedback loops, where, for instance, AI adoption might be both a cause and consequence of trade facilitation improvements observed between 2023 and 2025. In light of these constraints, the OLS results are presented only for diagnostic checks and to demonstrate the extent of multicollinearity (e.g., VIF > 120, unstable coefficients); they should not be used for any inferential interpretation about the relationship between variables. As sensitivity checks, ridge regression ($\alpha = 1.0$) and univariate models are reported, but the principal added value of this analysis lies in descriptive pattern recognition and hypothesis generation, not in causal estimation or reliable coefficient interpretation. All statistical calculations have been done in Python. Addressing endogeneity in small-N cross-sectional data is challenging without instruments or panel structure (Stock & Watson, 2015; Wooldridge, 2010).

(4) Measurement Error and Endogeneity: As explained in Section 2.1.2, the use of the proxy introduces non-classical measurement error into the analysis. The relationship between the two variables is probably also distorted by the presence of endogeneity, with both reverse causality (for example, reduced trade costs as a stimulus for the use of AI) and the presence of unobservables (for example, institutions influencing both sides) being problems. In this cross-section scenario with a small dataset, it is not possible to deal with either of these issues in a properly identified instrumental variables or panel analysis. The coefficients thus should not be interpreted as causal effects. All substantive

OLS Regression Results

Dep. Variable:	Trade_Cost_Reduction_Potential	R-squared:	0.997
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.996
Method:	Least Squares	F-statistic:	760.8
Date:	Mon, 25 Aug 2025	Prob (F-statistic):	6.87e-06
Time:	05:51:21	Log-Likelihood:	-1.2501
No. Observations:	7	AIC:	8.500
Df Residuals:	4	BIC:	8.338
Df Model:	2		
Covariance Type:	nonrobust		

	coef	std err	t	P>|t|	[0.025	0.975]
const	31.7471	3.277	9.689	0.001	22.650	40.844
Implementation_Rate	0.0281	0.125	0.226	0.833	-0.318	0.374
AI_Adoption_Level	-0.3372	0.091	-3.702	0.021	-0.590	-0.084

Omnibus:	nan	Durbin-Watson:	2.543
Prob(Omnibus):	nan	Jarque-Bera (JB):	1.076
Skew:	0.792	Prob(JB):	0.584
Kurtosis:	1.913	Cond. No.	1.99e+03

Figure 1: Full summary.

interpretations in this paper are therefore based exclusively on ridge regression estimates (which stabilize coefficients under multicollinearity) and on descriptive pattern recognition from Figure 3 and Table 1. No causal, directional, or statistical significance claims are made based on OLS outputs.

The high R^2 value (0.997) and apparent significance of the OLS coefficients shown in Figure 1 are a direct result of overfitting in a sample of only 7 observations under conditions of extreme multicollinearity. These values are not an indication of the model's true predictive or explanatory power. Rather, they are a statistical illusion resulting from the sample size exceeding the degrees of freedom, highlighting the invalidity of OLS regression in such small datasets.

In Figure 2, A. Ridge trace plot-standardized coefficients plotted against log10(λ). Ridge stabilizes coefficients but does not overcome structural data weaknesses; LOOCV (Figure 2) aligns descriptively with variability due to small N. The trade-facilitation coefficient, the dashed red line, drops to nearly zero as soon as λ becomes positive. Meanwhile, the AI adoption coefficient, the solid blue line, remains steady and strongly negative. B. Leave-one-out cross-validation error curve. The minimum of the mean squared prediction error is reached for λ = 1.0, shown by the vertical dashed line, which is selected as the final penalty parameter.

These quantitative results are supported by qualitative data obtained from major international trade agreements. For instance, case studies from the USMCA agreement and the EU-Mercosur agreement registered exports amounting to €56 billion in 2023 (European Commission, EU-Mercosur Agreement, 2024)—offer context. Moreover, surveys and studies, for instance, the UN Global Survey on Digital and Sustainable Trade Facilitation report in 2025, inform about the growth use of AI in these trade agreements in facilitating the simplification of customs formalities, decreasing documentation requirements, and improving logistics.

This qualitative information supports the model's conclusion that while AI is associated with efficiency gains, its diminishing returns are an important factor for policymakers to consider, especially in areas with different levels of technological advancement.

According to the data in Table 2, multicollinearity was assessed by calculating the VIF values. If a VIF exceeds 120, it is consistent with that there's a significant level of multicollinearity among the independent variables. Under this condition, one of the important assumptions for running

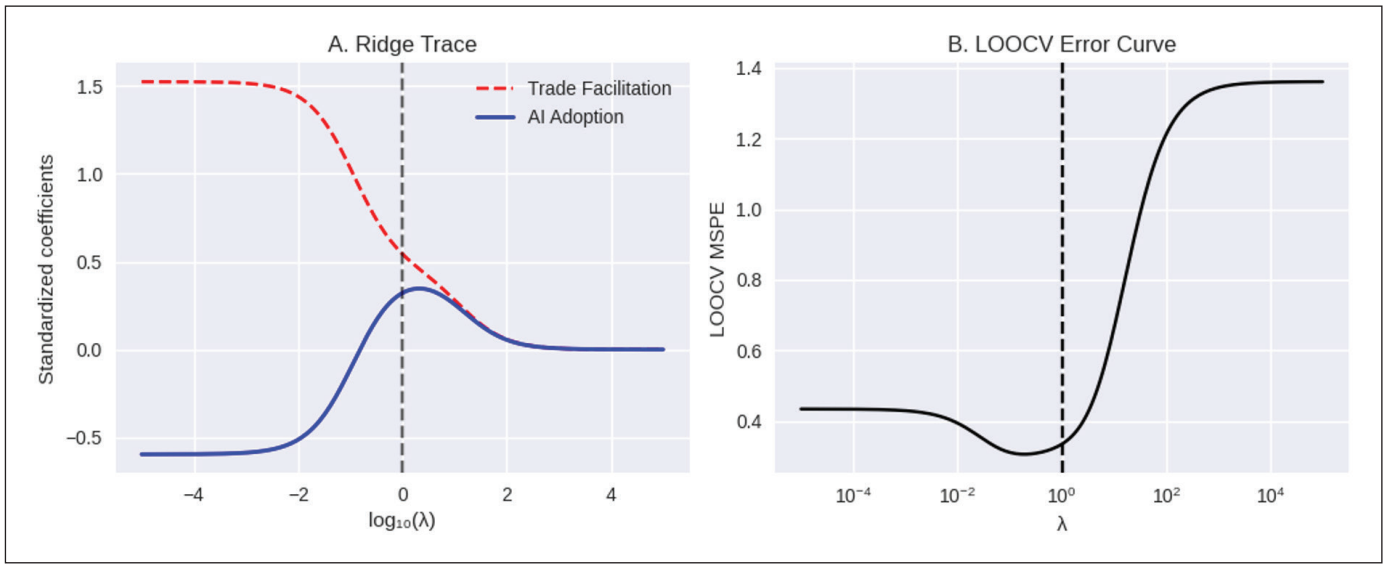


Figure 2. Ridge regression diagnostics.

Note: Due to the extremely small sample size [N = 7], expected variability exists in the LOOCV error; however, a minimum was found at λ = 1.0 (log10(λ) = 0), which will be used as the selected penalty parameter. Predictors were standardized prior to ridge estimation.

OLS regression has been breached; therefore, the standard errors are not to be trusted. This, in turn, makes it almost impossible, statistically, for the unique contribution of each predictor to be seen. In such a context, the coefficient estimates and their p-values from the OLS model are not interpretable. As a result, the insignificant coefficient for trade facilitation is probably due to its strong overlap with AI adoption when it comes to explaining reductions in trade costs. The condition number of 1,990 further reinforces the existence of multicollinearity. In future research, they might consider alternative models, like single-variable regressions or penalized regression techniques such as ridge regression, to help address this issue.

Table 2. VIF results.

Variable	VIF
Const	513.15
Implementation Rate	125.87
AI Adoption Level	125.87

Table 3 is presented to show the model comparison and the limitations of OLS. The coefficient estimates and p-values in the 'Full Model' column (e.g., 0.0281 for Implementation Rate and -0.3372 for AI Adoption Level) are unstable due to VIF > 120 and cannot provide a basis for any statistical inference or interpretation. These values are merely explorations of how multicollinearity invalidates the OLS estimates. Although ridge regression appears to provide more stable coefficients under these conditions (β_AI ≈ -0.32), these estimates also only point to an exploratory pattern and do not carry a causal interpretation due to the use of a proxy variable with a small N.

This table is presented for diagnostic purposes to show the limitations of OLS under conditions of small N and high multicollinearity and to justify the transition to ridge regression. OLS estimates in the "Full Model" column are unstable and uninterpretable due to VIF > 120; they only serve to document the severity of multicollinearity. Univariate models ("Only Impl." and "Only AI") are intended to show the raw individual relationships of variables at a descriptive level; they do not carry any claim to causal or predictive power. The ridge regression (α=1.0) column should be referenced for valid coefficient estimates or patterns, but these estimates are also only exploratory and hypothetical due to underlying data limitations (N=7, surrogate variables). Standard errors and p-values in parentheses do not reflect statistical reliability for N=7.

As seen in Figure 3, the intercept in the ridge regression is not really interpretable due to the centering and standardization of predictors before estimation. It coincides with the mean of the centered response variable. Regional comparison of trade facilitation, AI adoption, and cost reduction

Table 3. Heuristic (Diagnostic) coefficient patterns under extreme multicollinearity (N = 7): for ılustrative purposes only.

Variable	Full Model	Only Impl.	Only AI	Ridge (α=1.0)
Implementation Rate	0.0281 (0.125)	-0.4312*** (0.021)	–	0.0032
AI Adoption Level	-0.3372** (0.091)	–	-0.3167*** (0.007)	-0.3189
Intercept	31.7471*** (3.277)	43.5601*** (1.397)	32.4791*** (0.418)	323.900
R^2	0.997	0.988	0.997	–
Adj. R^2	0.996	0.986	0.997	–
N	7	7	7	7

Note: Parentheses indicate standard errors. *p < 0.1, **p < 0.05, ***p < 0.01. OLS results are reported strictly for diagnostic demonstration of multicollinearity and overfitting and must not be interpreted as evidence of statistical association.

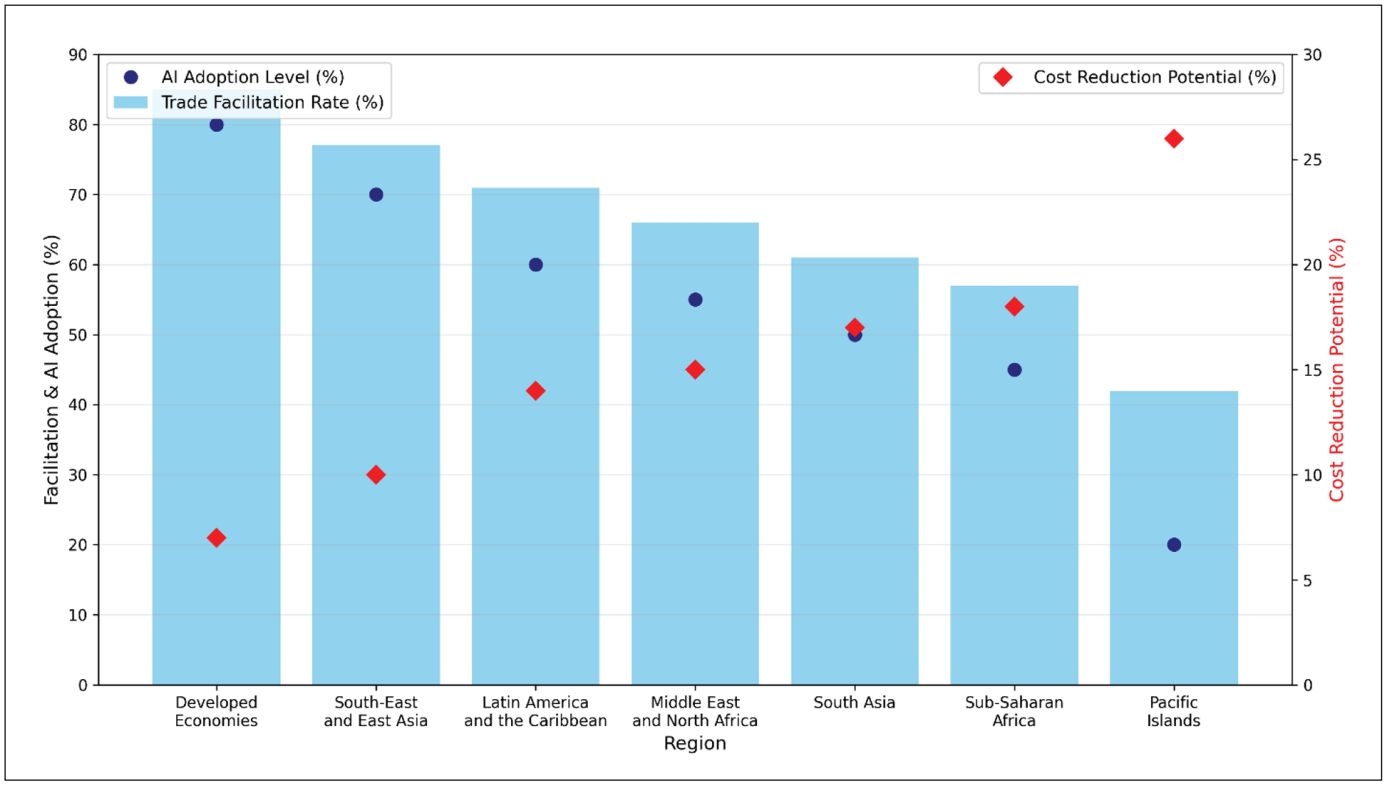


Figure 3. Descriptive co-movements across seven aggregated regions: visual heuristics, not statistical evidence.

potential. Blue bars represent trade facilitation rates (%), blue circles aligns descriptively with AI adoption levels (%), and red diamonds show estimated cost reduction potential (%). Higher cost reduction potential is observed in regions with lower baseline performance, suggesting substantial gains from targeted digital interventions.

Since the possible relationship between AI adoption and trade facilitation might be bidirectional, it would be inappropriate to apply directional inference on this topic. Therefore, this analysis deliberately chooses not to interpret regression coefficients as representing causality, lead-lag relationships, or policy handles. The regression results will be solely used to examine co-movement relationships across regions contemporaneously.

3. Findings and Discussion

In conditions with strong multicollinearity (VIF > 120), ridge regression (with standardized predictors and λ chosen through LOOCV) was applied for numerically stabilized parameter estimation, not as a fix for basic inadequacies in data. The OLS output is presented just to aligns descrip-

tively with structural problems in the data, such as near-perfect collinearity between AI adoption and trade facilitation, and to explain why there was a move to ridge regression.

Three descriptive patterns come out of the data, cautiously interpreted as non-causal exploratory tendencies:

First, with the conditions of N=7 and close collinearity, the ridge-regression coefficient of AI adoption ($\beta \approx -0.32$) cannot be taken as a meaningful indicator. However, when taken together with the findings of Figure 3, the coefficient aligns descriptively with a consistent visual phenomenon of a region's proxy-measured AI adoption being inversely related to the residual trade cost-reduction potential. This trend is in line with the concept of diminishing returns among early digital adopters. Nonetheless, almost perfect correlation obstructs their uncovering through empirical analysis. In regions that have shown greater intensity in the use of AI, such as the Developed Economies with 95% or East Asia with 85%, the potential for trade costs to be further reduced remains smaller (-5.27% or -10.30%, respectively), while in regions with lower AI adoption, such as the Pacific Islands with 28%, this potential remains the highest (-23.85%). Although this descriptive pattern supports a hypothesis on diminishing returns, statistical testing or inference using ordinary least squares has not supported this.

Second, the negative sign of the coefficient of adoption of the regularized AI corresponds to the cross-regional pattern observed in Figure 3, but it is not evidence of any economic mechanism. The areas that have less developed digital infrastructures (such as the Pacific Islands) have high remaining potential savings in trade costs, and those with developed infrastructures (such as the Developed Economies) show minimal or even negative potential. This observation can be ascribed to the diminishing returns principle, but did not require a test. The OLS value obtained in this case is not significant ($\beta = 0.0281$, p-value = 0.833).

Thirdly, the process of AI adoption and regional trade facilitation happening together (correlation ≈ 0.99) is indicative of their interdependence. The regional clustering evident in Figure 3 also points to a likely efficiency frontier where regions that are leaders in digital development have already maximized the low-hanging benefits, but regions that are lagging behind are yet to realize their potential, subject to the removal of constraints. This approach also remains a qualitative insight rather than a result of the regression analysis. It thus validates the belief that the process of digital trade transformation happens in an integrated manner and not in isolated ways that can be treated as separate policy options through regressions.

The relationships revealed in this study are based on an extremely minimal sample size of N=7, strong multicollinearity, and surrogate variables. Therefore, the findings (e.g., the negative relationship between the level of AI adoption and the potential for reduced remaining trade costs) do not carry definitive causal inferences or generalizable conclusions. Instead, they present exploratory propositions and antecedent patterns that warrant testing with larger datasets. The following policy discussion is developed in light of the broader literature and theoretical framework, rather than these limited exploratory findings.

4. Conclusion and Suggestions

4.1. Contribution to the Literature

In light of the very significant challenges presented by the lack of quality data explored throughout this paper, its value must lie not in the provision of authoritative and generalizable findings, but in posing a number of key questions for future study.

The contributions of this research can be categorized into four aspects:

(1) The key contribution of this paper, rather, is not found in its empirical findings, which, with an N of 7, are necessarily based on proxies and subject to endogeneity concerns, but in its clear description of the traps inherent in the process of small-N regional regressions. It shows how, despite the sophisticated nature of techniques such as ridge regression, the inherent issues with the data remain unaddressed. This paper, therefore, serves as a methods paper, encouraging the use of larger, panel data sets before policy-relevant conclusions can be made.

(2) This highlights the empirical connection between the development of AI and the process of trade facilitation in a manner that illustrates how the two policies are inseparable through aggregated data.

(3) The analysis not only improves the digital divide discourse by incorporating the themes of "efficiency saturation" and "access disparities" but also includes both aspects within the concept of trade governance.

(4) The value of this research as a contributor to the existing knowledge base is clear in its critical evaluation of the possible problems that could arise in the use of aggregate data from a small sample in any form of quantitative eval-

uation. This highlights the significance of research design in correct proper interpretation in relation to the issue of transformation.

4.2. Policy-Aware Reflections

The ensuing policy discourse is theoretically informed and rooted in the literature on digital trade and the governance of artificial intelligence. The policy implications have not been derived from the results reported in this study because they have been considered as descriptive.

All policy proposals outlined in this section are purely exploratory in nature and should be viewed as if-then thought experiments rather than data-driven recommendations. Specifically, given the small sample size (N = 7), the use of proxies to define variables, high multicollinearity (all VIF values > 120), as well as the cross-sectional analysis, it is clear that the model will be unable to support any causal inferences or generalizable findings. That said, the negative relationship detected between AI adoption and potential for reducing trade costs (β -0.32) should be viewed as simply descriptive rather than inference-based, supporting theoretical expectations based on diminishing marginal returns displayed by early adopters in general, without a strong connection to the directional clues in the data, should they be confirmed at larger scales.

The negative relationship coincides with above between the baseline adoption levels of AI and the remaining possible decrease in trade cost is consistent with that regions that are more advanced in their adoption levels may be facing diminishing returns. Finally, this observation should be distinguished from a conclusion in the form of a policy recommendation.

At the other end of the distribution, areas that embrace lower levels of AI adoption and trade facilitation seem to have a larger potential opportunity space for cost savings. Although it is impossible to make direct inferences, this result is consistent with the notion that strategic basic investments are critical to the success of high technologies like AI.

Lastly, the close nexus between AI adoption and trade facilitation indices at the regional level emphasizes their possible interdependency. On the policy front, this also tends to outline that solely AI-related efforts within the realm of trade will not be fruitful without contemplating the overall digital policy and trade facilitation frameworks. Such remarks should help shape future research discourse without basing policy actions solely upon the observations of the current analysis.

4.3 Final Reflection

The digitization of trade represents a change not only at the level of technology, but rather the entire world economy requires a socio-technical transition. Unless the entire world begins to adopt the principles of inclusion, security, and legal certainty, the adoption and implementation of AI technology in the intelligent trade system could result in a divergent rather than a convergent force. Speed rather than equity results are not the end result that needs to be achieved.

Ordinary Least Squares regression outputs are used solely for diagnostic and expository purposes in this analysis. What must be kept in mind is that the presence of severe multicollinearity (VIF value above 120) and a small sample (N=7) make OLS model parameters highly unreliable for statistical purposes. Thus, all interpretations regarding coefficients drawn from OLS model outputs are to be considered highly unreliable. The readers are exhorted to note and follow the overall exploratory trends and qualitative interpretations expounded as key contributions in this research.

In order to avoid any risk of over-interpretation, it must be reiterated that none of the coefficients, whether regularized or not, have the goal of approximating any population parameter or facilitating any process of empirical generalization.

4.4. Structural Limitations of the Empirical Framework

However, the analysis is primarily limited by three issues: (1) the extremely small sample size of N = 7, which provides too few degrees of freedom for any type of multivariate test; (2) the use of a proxy for AI adoption which has not been validated and is not accompanied by any measures of uncertainty and sensitivity analysis; and (3) the likely two-way relationship between AI adoption and trade facilitation. Therefore, none of the coefficients presented in the results should be taken as an estimate of a population parameter. This is only meant to provide an illustration of how results may be presented as being more precise than they actually are because of the limitations imposed by the data.

Acknowledgment: No conflict of interest is declared by the author. There are no individuals or organizations supporting the research.

Ethics committee approval: There is no need for ethics committee approval.

References

Achar, S. (2019). Early consequences regarding the impact of artificial intelligence on international trade. *American Journal of Trade and Policy, 6(3),* 119-126. https://doi.org/10.18034/ajtp.v6i3.634

Agrawal, A., Gans, J., & Goldfarb, A. (2019). Artificial intelligence: The ambiguous labor market impact of automating prediction. *Journal of Economic Perspectives, 33(2),* 31–50. https://doi.org/10.1257/jep.33.2.31

Ahmedov, I. (2020). The impact of digital economy on international trade. *European Journal of Business and Management Research, 5(4)*. https://doi.org/10.24018/ejbmr.2020.5.4.389

Aly, H. (2022). Digital transformation, development and productivity in developing countries: is artificial intelligence a curse or a blessing?. *Review of Economics and Political Science, 7(4),* 238-256. https://doi.org/10.1108/REPS-11-2019-0145

Aslam, M. F., Wang, B., & Hou, Y. (2024). Artificial intelligence and international trade laws: in light of trade policy and data sharing. *Business Law Review, 45(2),* 48-55. https://doi.org/10.54648/bula2024007

Bharadwaj, A., El Sawy, O. A., Pavlou, P. A., & Venkatraman, N. (2013). Digital Business Strategy: Toward a Next Generation of Insights. *MIS Quarterly, 37(2),* 471–482. Available at: http://www.jstor.org/stable/43825919

Borges, A. F., Laurindo, F. J., Spínola, M. M., Gonçalves, R. F., & Mattos, C. A. (2021). The strategic use of artificial intelligence in the digital era: Systematic literature review and future research directions. *International journal of information management, 57,* 102225. https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102225

Burri, M. (2021). Big data and global trade law. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781108919234

Ciuriak, D., & Ptaškina, M. (2018). The digital transformation and the transformation of international trade. RTA Exchange. Geneva, Switzerland: ICTSD. Available at: http://hdl.handle.net/11159/1651

Collins, D. 2023. The liberalization of digital trade by the WTO: opportunities and challenges for SMEs. The Elgar Companion to the World Trade Organization, 51-68. https://doi.org/10.4337/9781800882867.00011

Dong, Y., & Liu, J. (2023). Impact of trade facilitation on cross-border e-commerce: A perspective from China. In Proceedings of the 2023 14th International Conference on E-business, Management and Economics, pp. 38-44. https://doi.org/10.1145/3616712.3616778

Duval, Y., & Utoktham, C. (2024). Impact of disaggregated trade facilitation indicators and individual measures on trade using a structural gravity model. Available at: https://hdl.handle.net/20.500.12870/7403

European Commission EU-Mercosur Agreement. (2024). Available at: https://policy.trade.ec.europa.eu/eu-trade-relationships-country-and-region/countries-and-regions/mercosur/eu-mercosur-agreement_en

Ferencz, J., González, J. L., & García, I. O. (2022). Artificial Intelligence and international trade: Some preliminary implications. Available at: https://read.oecd-ilibrary.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2022/04/artificial-intelligence-and-international-trade_9034b5f2/13212d3e-en.pdf

Ganne, E., Locks, L., & Xu, A. (2024). Trading with Intelligence: How AI Shapes and is Shaped by International Trade. Available at: https://coilink.org/20.500.12592/17dit14

Goldfarb, A., & Trefler, D. (2018). AI and international trade (No. w24254). *National Bureau of Economic Research.* https://doi.org/10.3386/w24254

GSMA. (2025). The mobile economy 2025. Available at: https://www.gsma.com/mobileeconomy/

Holmström, J. (2022). From AI to digital transformation: The AI readiness framework. *Business horizons, 65(3),* 329-339. https://doi.org/10.1016/j.bushor.2021.03.006

International Telecommunication Union (ITU). (2025). Measuring digital development: Facts and figures 2025 (ITU Digital Development Dashboard). Available at: https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/facts/default.aspx

Ismail, N. W. (2021). Digital trade facilitation and bilateral trade in selected Asian countries. *Studies in Economics and Finance, 38(2),* 257-271. https://doi.org/10.1108/SEF-10-2019-0406

Joint Research Centre. (2008). Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide. OECD publishing.

Jones, E. (2023). Digital disruption: artificial intelligence and international trade policy. *Oxford Review of Economic Policy, 39(1),* 70-84. https://doi.org/10.1093/oxrep/grac049

Kar, S., Kar, A. K., & Gupta, M. P. (2021). Modeling drivers and barriers of artificial intelligence adoption: Insights from a strategic management perspective. *Intelligent Systems in Accounting, Finance and Management, 28(4),* 217-238. https://doi.org/10.1002/isaf.1503

Kere, S., & Zongo, A. (2023). Digital technologies and intra-African trade. *International Economics, 173,* 359-383. https://doi.org/10.1016/j.inteco.2023.01.005

Khan, A. (2024). The intersection of artificial intelligence and international trade laws: Challenges and opportunities. *IIUMLJ, 32,* 103. https://doi.org/10.31436/iiumlj.v32i1.912

Kitsios, F., & Kamariotou, M. (2021). Artificial intelligence and business strategy towards digital transformation: A research agenda. *Sustainability, 13(4),* 2025. https://doi.org/ 10.3390/su13042025

Kraus, S., Jones, P., Kailer, N., Weinmann, A., Chaparro-Banegas, N., & Roig-Tierno, N. (2021). Digital Transformation: An Overview of the Current State of the Art of Research. *SAGE Open, 11(3).* https://doi.org/10.1177/21582440211047576

Lei, W. C., Toshevska-Trpchevska, K., & Stojkoski, V. (2024). Digital and Sustainable Trade Facilitation in ASEAN Countries. In Asia-Pacific Conference on Economics & Finance (pp. 53-73). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-6998-1_4

McKinsey The State of AI. (2025). Available at: https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/business%20functions/quantumblack/our%20insights/the%20state%20of%20ai/2025/the-state-of-ai-how-organizations-are-rewiring-to-capture-value_final.pdf

Meltzer, J. P. (2019). Governing digital trade. *World Trade Review, 18(S1),* S23-S48. https://doi.org/10.1017/S1474745618000502

Menzies, J., Sabert, B., Hassan, R., & Mensah, P. K. (2024). Artificial intelligence for international business: Its use, challenges, and suggestions for future research and practice. *Thunderbird International Business Review, 66(2),* 185-200. https://doi.org/10.1002/tie.22370

Mirzaye, S., & Mohiuddin, M. (2025). Digital Transformation in International Trade: Opportunities, Challenges, and Policy Implications. *Journal of Risk and Financial Management, 18(8),* 421. https://doi.org/10.3390/jrfm18080421

Muhammad, S. S., Dey, B. L., Kamal, M. M., Samuel, L., & Alzeiby, E. A. (2025). Digital transformation or digital divide? Smes' use of AI during global crisis. *Technological Forecasting and Social Change, 217,* 124184. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2025.124184

OECD/BCG/INSEAD. (2025). The Adoption of Artificial Intelligence in Firms: New Evidence for Policymaking, OECD Publishing, Paris. https://doi.org/10.1787/f9ef33c3-en

Ouyang, W., & Park, I. (2024). Estimating the Extensive Margin of Exports in the Chinese Market: The Impact of Digital Trade Facilitation on Export Diversification. *International Area Studies Review, 27(2),* 95-121. https://doi.org/10.69473/iasr.2024.27.2.95

Ozturk, O. (2024). The impact of AI on international trade: Opportunities and challenges. *Economies, 12(11),* 298. https://doi.org/10.3390/economies12110298

Peters, M. A. (2023). Digital trade, digital economy and the digital economy partnership agreement (DEPA). *Educational Philosophy and Theory, 55(7),* 747-755. https://doi.org/10.1080/00131857.2022.2041413

Quindimil, M. (2024). Artificial Intelligence and International Trade from a Latin American Perspective. *Global Trade and Customs Journal, 19(11/12),* 748-756. https://doi.org/10.54648/gtcj2024084

Shadikhodjaev, S. (2021). Technological neutrality and regulation of digital trade: how far can we go?. *European Journal of International Law, 32(4),* 1221-1247. https://doi.org/10.1093/ejil/chab054

Stock, J. H., & Watson, M. W. (2015). Introduction to econometrics (3rd updated edition). Age (X3), 3(0.22).

Tao, H., Wan, Y., Huang, L., & Zhao, Y. (2025). Applications and Challenges of Artificial Intelligence in International Trade and Logistics: Current Status, Future Developments, and Policy Recommendations. *International Journal of Computer Science and Information Technology*, *5(1),* 35-47. https://doi.org/10.5281/zenodo.14915353

Tursunbayeva, A., & Gal, H. C. B. (2024). Adoption of artificial intelligence: A TOP framework-based checklist for digital leaders. *Business Horizons, 67(4),* 357-368. https://doi.org/10.1016/j.bushor.2024.04.006

UN Global Survey on Digital and Sustainable Trade Facilitation. (2025). Available at: https://www.untfsurvey.org/files/documents/2025-UNTF-Global-Report.pdf

Vorobiova, V. V., Krupskyi, O. P., & Stasiuk, Y. (2023). The role of digital technologies in modern trade: A study of global trends and prospects for Ukraine. *Economic Journal Odessa Polytechnic University 2 (24)*, 44-55. https://doi.org/10.15276/EJ.02.2023.5

Wang, S., & Zhu, Y. (2024). An inquiry into the effect of trade facilitation on China's digital product exports to countries along the" Belt and Road". *International Review of Economics & Finance, 93,* 1246-1259. https://doi.org/10.1016/j.iref.2024.04.041

Winn, J. K. (2019). Trade Facilitation, Digital Transformation and the Emergence of Global Trade Platforms. *Digital Transformation and the Emergence of Global Trade Platforms* (June 30, 2019). https://doi.org/10.2139/ssrn.3412370

Wooldridge, J. M. (2010). Econometric analysis of cross section and panel data. MIT press.

World Bank. (2025). World development indicators: GDP (current US$) – Regional aggregates. Available at: https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi
Dergi web sayfası: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen
DOI: 10.7212/karaelmasfen.1817885

Araştırma Makalesi
Geliş tarihi / Received : 05.11.2025
Kabul tarihi / Accepted : 12.02.2026

Karbonat Kökenli Doğal Taşların Fizikomekanik Özellikleri ile Katrak Makinelerinde Kesilebilirlik Performansı Arasındaki İlişkinin Analizi

Analysis of the Relationship Between the Physicomechanical Properties of Carbonate-Based Natural Stones and their Sawability Performance in Gangsaws

Aydin Shaterpour-Mamaghani*, Deniz Tumaç

İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Öz

Bu çalışmanın amacı, karbonat kökenli on adet farklı doğal taşın fiziksel ve mekanik özelliklerini kullanarak, katrak makinelerinde kesilebilirlik performansını tahmin etmeye yönelik yeni ampirik modeller geliştirmektir. Bu kapsamda, yoğunluk, porozite, tek eksenli basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı, Schmidt çekici sertlik değerleri ve Cerchar aşındırıcılık indeksi ile katrak makinesi performans göstergesi olan alansal plaka üretim oranı arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Öncelikle, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki doğrusal ve doğrusal olmayan korelasyonlar analiz edilmiştir. Ardından, elde edilen sonuçlara dayanarak çoklu doğrusal regresyon modelleri oluşturulmuştur. Elde edilen bulgular, katrak makinesi kesim performansının, doğal taşların tek eksenli basınç ve dolaylı çekme dayanımları ve Schmidt çekici deformasyon katsayısının birlikte değerlendirilmesiyle güvenilir bir biçimde tahmin edilebileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, daha genel ve kapsamlı modellerin geliştirilebilmesi için farklı jeolojik kökenlere sahip doğal taşlar ve çeşitli katrak makinelerinden elde edilen verilerin analize dahil edilmesi önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Fizikomekanik özellikler, katrak makinesi, kesilebilirlik, regresyon analizi

Abstract

This study seeks to establish original empirical models to predict the sawability performance of gangsaw machines by using the physical and mechanical properties of ten carbonate-origin natural stones. For this purpose, relationships between density, porosity, uniaxial compressive strength, indirect tensile strength, Schmidt hammer hardness values, Cerchar abrasivity index, and the gangsaw performance indicator (area slab production rate per active framework) are investigated. Initially, linear and non-linear correlation analyses are conducted to determine the best relationships between the dependent and independent variables. Subsequently, multiple linear regression analyses are performed to strengthen the proposed models. The results demonstrate that the performance of gangsaw machines can be reliably predicted by jointly considering the uniaxial compressive and indirect tensile strengths, and the Schmidt hammer deformation coefficient of the natural stones. Moreover, it is suggested that the inclusion of data from natural stones with different geological origins and from various gangsaw machines would facilitate the development of more comprehensive and robust prediction models.

Keywords: Physicomechanical properties, gangsaw machine, sawability, regression analysis

1. Giriş

Doğal taşlar dünya çapında inşaat ve dekoratif malzeme olarak kullanılmaktadır. Doğal taş sektörü, farklılaştırılmış pazar özelliklerinin yanı sıra, teknoloji kullanımı ve işletme özellikleri açısından diğer sektörlerden ayıran benzersiz bir rekabet özelliğine sahiptir. Son yıllarda, sürekli gelişen teknolojiler ve tüm dünyada hızla yayılan yenilikçi tasarım fikirleri nedeniyle doğal taşlara olan talep oldukça artmıştır. Türkiye'de doğal taş sektörü büyük bir ilerleme kaydetmiş; yoğun yatırımlarla en son üretim yöntemlerine ve teknolojilerine yönelmiştir.

Ocaklardan elde edilen blok doğal taşlar, katrak (lamalı blok kesme) ve S/T gibi farklı kesme makineleri kullanılarak istenilen boyutlarda levhalar ve plakalar şeklinde üretilebilmektedir. Doğal taş işletmelerinde, aynı anda birden fazla

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: mamaghani@itu.edu.tr

Aydin Shaterpour-Mamaghani orcid.org/0000-0001-7751-4796
Deniz Tumaç orcid.org/0000-0003-0626-1087

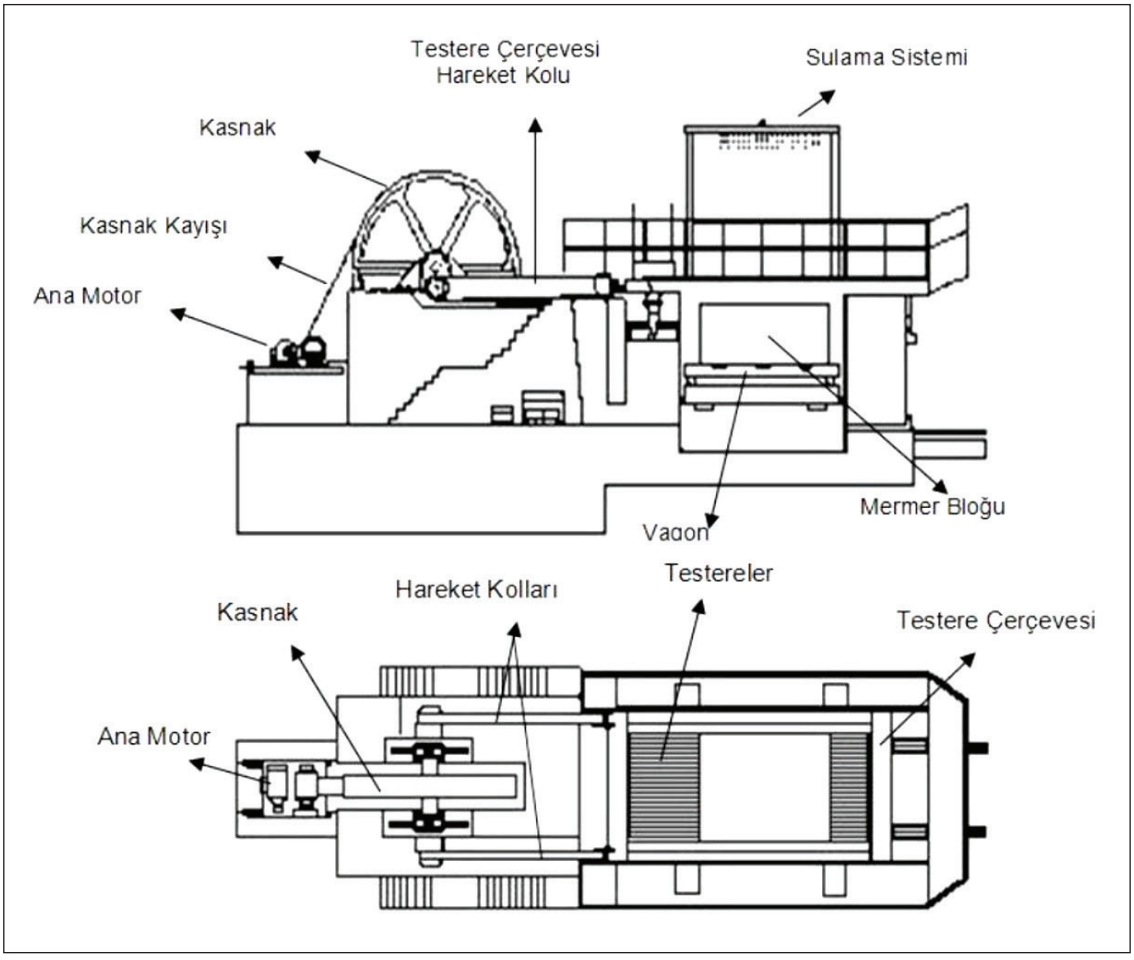
Bu eser "Creative Commons Alıntı-GayriTicari-4.0 Uluslararası Lisansı" ile lisanslanmıştır.

doğal taş levhası üretmek için katrak makineleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu makineler, lamalar üzerine lehimlenmiş elmas soketler yardımıyla doğal taşları aşındırarak doğrusal kesme işlemi yapmaktadır. Katrak makinelerinin kapasitesine göre kullanılan lamaların sayısı 10 ile 120 arasında değişebilmektedir.

Katraklar, kesim şekillerine (yatay veya dikey), bloğun kesim işlemi için makineye yüklenme şekline (kapalı kasalı veya açık kasalı) ve çalışma hızlarına (hızlı veya yavaş) göre sınıflandırılmaktadır (Bayram, 2002). Bununla birlikte, sınıflandırma yöntemi çoğunlukla kesim testerelerinin durumuna bağlı olarak uygulanmaktadır. Bu sınıflandırmada katraklar; kumlu (çelik testereli) ve elmas testereli olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır (MEGEP, 2011). Ayrıca, katrak blok kesme makineleri kasnak (çapı 3 ile 4 metre arasında), eksantrik kol, çelik lamaların (testerelerin) tutturulduğu çerçeve, testereler ve motor elemanlarından oluşmaktadır (Şekil 1).

Katrak makinelerinin ilk yatırım maliyetleri yüksektir. Ayrıca, doğal taş üretim tesislerinde maliyet tahmini ile planlama süreçlerini belirleyen iki ana faktör, katrak makinelerinin doğru seçimi ile performanslarının doğru bir şekilde tahmin edilmesidir. Doğal taşların fizikomekanik özellikleri ile katrak makinesinin çalışma koşulları, tasarım ve teknik özelliklerin doğru seçimi, kesim performansını en fazla etkileyen parametrelerdir. Ayrıca, doğal taşların kesme performansını etkileyen parametrelerin belirlenmesi, üretim verimliliği ve enerji tasarrufu açısından büyük önem taşımaktadır.

Lons (1970) yaptığı çalışmalarda, testere makinelerindeki elmas soketlerine uygulanan kuvvetleri incelemiş ve kesme kuvvetleri ile elmas aşınması arasında zayıf bir korelasyon olduğunu ortaya koymuştur. Brook (2002) kesme hareketi yapan elmas kesiciler için enerji tüketimini tahmin etmek amacıyla Brook sertliği adı verilen yeni bir kaya dayanımı indeksi geliştirmiştir. Wang ve Clausen (2002) elmas bıçaklarla donatılan katrak makinelerinin kesme sürecini inceleyerek, bu süreçteki kinematik davranışları ve kesme mekanizmasını analiz etmişlerdir. Literatürde katrak makinelerinin performansını değerlendirmek için alansal plaka (levha)



Şekil 1. Katrak makinesinin çeşitli kısımları (MEGEP, 2011).

üretim oranı (APÜO) kullanılmaktadır. Literatürde katrak makineleriyle ilgili çeşitli araştırmalar yapılmıştır, ancak bu makinelerin performans tahminiyle ilgili literatürde oldukça az çalışma bulunmaktadır (Kahraman vd., 2007; Neves vd., 2016; Dormishi vd., 2018; Dormishi vd., 2019; Shaffiee Haghshenas vd., 2019; Satı vd., 2023). Bu çalışmalarda, araştırmacılar katrak makinelerinin farklı doğal taşlarda kesme performansını değerlendirmek için farklı yaklaşımlar önermişlerdir. Bayram (2002), elmas lamalı katrak makinelerinde meydana gelen aşınmaları kayaçların farklı fizikomekanik özellikleri ile ilişkilendirmeye çalışmıştır. Sakcalı (2013), katrak makinelerinde kesilen mermer blokların plaka verimi ile P-dalga hızları arasındaki ilişkileri incelemiş ve çeşitli mermerler için bu iki parametre arasında lineer ilişkiler olduğunu belirlemiştir. Mikaeil vd. (2014), katrak makinelerinde çalışma özellikleri ve kaya kırılganlık indekslerine dayalı olarak titreşim parametresini tahmin etmek için çoklu regresyon analiz yöntemini kullanmışlardır. Bilim (2012), doğal taşların blok kesme makinelerinde optimum kesme hızının enerji tüketimi üzerindeki etkisini incelemiş ve kesme parametrelerinin doğru seçiminin enerji verimliliğini önemli ölçüde artırabileceğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, doğal taş kesiminde hem enerji etkinliği hem de üretim performansının birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Korman vd. (2015), katrak makinesinin özgül kesme enerjisi ile kesme hızı arasındaki ilişkiyi incelemişler ve özgül enerji ile testere hızı azalması arasında doğrudan bir ilişki olduğunu belirtmişlerdir. Zhang vd. (2016), çalışmalarında tasarlanan yeni katrak makinesinin, diğer katrak makinelerine kıyasla daha yüksek kesme verimliliğine ve daha iyi plaka yüzey kalitesine sahip olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, daha düşük oranda elmas parçacıklarının kopması ve daha yüksek oranda mikro çatlaklı elmas parçacıklarının oluşumu gözlemlenmiştir. Sun vd. (2016), granit kesimi sırasında kaya özelliklerinin soket aşınması üzerindeki etkisini incelemek için elmas testereli katrak prototip makinesinde deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Neves vd. (2016), yedi farklı karbonat kökenli kayaç üzerinde katrak makinelerinin performansını incelemiş ve levha üretim parametrelerinin değerlendirilmesi amacıyla, kayaçların tek eksenli basınç dayanımı, aşınma direnci ve blokların yüzey alanına dayalı bir ampirik model önermişlerdir. Dormishi vd. (2018 ve 2019)'da katrak makinelerinin enerji tüketimi ve elektrik akımı parametrelerini tahmin etmek için karbonatlı kayaçların bazı fizikomekanik özelliklerini kullanarak yeni modeller geliştirmişlerdir. Sarıçalı (2019), bir mermer işletmesi için uygun katrak makinesinin seçilmesinde kriter ağırlıklarının belirlenmesinde KEMIRA-M (Kemeny Median Indicator Rank Accordance-Modified) yöntemi, alternatiflerin sıralanmasında ise COPRAS (Complex Proportional Assessment) yöntemi kullanılmış; bu iki yöntemin bütünleşik kullanımına dayanan yeni bir metodolojik çerçeve literatüre kazandırılmıştır. KEMIRA-M yöntemi, çok kriterli karar verme problemlerinde kriterlerin göreli önemlerini belirlemek amacıyla kullanılan, karşılaştırmaya dayalı bir ağırlıklandırma yöntemidir. COPRAS yöntemi, alternatiflerin hem fayda hem de maliyet kriterleri altında göreli önemlerini dikkate alarak sıralanmasını sağlayan birçok kriterli karar verme yöntemidir. Satı (2020), katrak ve S/T makinelerinin sedimanter ve metamorfik kökenli doğal taş kesim performanslarını incelemiş ve katrak makinesinin alansal plaka üretim oranının S/T blok kesme makinesinden 3.91 kat daha yüksek olduğunu belirlemiştir. Satı vd. (2023), altı farklı doğal taşın fizikomekanik değerleri ile katrak makinelerinin APÜO değerleri arasındaki ilişkilerin ortaya konulması amacıyla basit ve çoklu regresyon analizlerinden yararlanmışlardır. Bayram ve Kulaksiz (2021), elmas soketli katrak makinesinin kaya kesme performansını, elmas soket aşınması açısından değerlendirerek bu aşınmanın kaya özellikleri ve ilerleme hızı ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Shaffiee Haghshenas vd. (2022), on iki farklı mermer türü üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri ve istatistiksel analizler sonucunda, katrak makinesinin çektiği akımı tahmin etmeye yönelik modeller önermişlerdir. Karaabat Varol (2023), Türkiye'deki bir doğal taş kesme fabrikasında katrak makinelerinin performansını, genel ekipman etkinliği ve üretim ekipmanı etkinliği yöntemlerini kullanarak değerlendirmiştir.

Doğal taşların katrak makinelerinde gösterdiği kesme davranışının anlaşılması, üretim verimliliğinin artırılması ve proses optimizasyonu açısından büyük önem taşımaktadır. Literatürde, doğal taşların kesilebilirlik performansını etkileyen faktörler üzerine çeşitli araştırmalar yapılmış olsa da bu çalışmaların büyük bir kısmı sınırlı taş türleri veya belirli kesme sistemleriyle sınırlı kalmıştır. Ayrıca, karbonat kökenli doğal taşların fizikomekanik özellikleri ile katrak makinelerinin kesme performansı arasındaki ilişkiyi kapsamlı biçimde inceleyen çalışmalar oldukça azdır. Bu çalışma, karbonat kökenli doğal taşların fizikomekanik özellikleri ile katrak makinesi performansı arasındaki ilişkiyi incelemenin yanı sıra, literatürde daha önce dikkate alınmamış bir parametre olan Schmidt çekici deformasyon katsayısını (K) modelleme sürecine dahil ederek özgün bir katkı sunmaktadır. Bu parametre, kayacın yüzeysel deformasyon tepkisini temsil etmesi bakımından kesme davranışının anlaşılmasına yeni bir bakış açısı kazandırmaktadır. Literatürde benzer çalışmalar bulun-

makla birlikte, bu çalışma K parametresinin katrak performansıyla ilk kez ilişkilendirilmesi yönüyle farklılaşmaktadır. Ancak, önceki araştırmalar ile bu çalışmanın kapsam ve yöntem bakımından farklarının ilerideki çalışmalarda daha ayrıntılı biçimde vurgulanması, literatür bağlamındaki konumunun daha da güçlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

Ayrıca, kayaç gevrekliği, kesme ve aşındırma süreçlerinde performansı etkileyen önemli bir parametre olup, literatürde farklı şekillerde tanımlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan gevreklik tanımı, Altindag (2000, 2002, 2003) tarafından önerilen ve tek eksenli basınç dayanımı (UCS) ile dolaylı çekme dayanımını (BTS) esas alan (UCS×BTS)/2 eşitliğine dayanmaktadır. Söz konusu tanım, sonraki birçok ulusal ve uluslararası çalışmada yaygın biçimde kullanılmıştır.

Bu çalışma kapsamında, on farklı doğal taş üzerinde yapılan deneylerle yoğunluk (ρ), porozite (φ), tek eksenli basınç dayanımı (UCS), dolaylı çekme dayanımı (BTS), Schmidt çekici sertlik (SHH_1, SHH_2 ve K deformasyon katsayısı) değerleri ve Cerchar aşındırıcılık indeksi (CAI) ile aktif çerçeve (lama) başına düşen alansal plaka üretim oranı (APÜO) arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Katrak makinesi performansını etkileyen en önemli parametreleri belirlemek amacıyla doğrusal ve doğrusal olmayan korelasyon analizlerinin yanı sıra çoklu doğrusal regresyon analizleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçların, katrak makinelerinin kesme verimliliğinin daha iyi anlaşılmasına ve doğal taş endüstrisinde üretim süreçlerinin optimize edilmesine katkı sağlaması beklenmektedir.

2. Çalışmanın Veritabanı

Bu çalışma kapsamında, on farklı doğal taş üzerinde katrak makinelerinin kesim performansı değerlendirilmiştir. Veritabanıyla ilgili detaylar aşağıdaki bölümlerde özetlenmiştir.

2.1. Katrak Makinelerinin Saha Performans Veritabanı

Katrak makinelerinin performansını değerlendirmek için aktif çerçeve başına denk gelen APÜO her bir doğal taş özelinde değerlendirilmiştir. Şekil 2'de katrak makinelerinin kullanıldığı bazı fabrikalarda gerçekleştirilen saha çalışmaları sırasında çekilen fotoğraflar sunulmuştur. Çizelge 1'de ise doğal taşların kesiminde kullanılan katrak makinelerinin performans değerlendirmeleri özetlenmiştir. Finike Cremo Cloudy kireçtaşı ve Finike Cremo Classic kireçtaşı doğal taşlarında sırasıyla sekiz ve altı farklı performans ölçümü yapılmıştır ve bu değerlendirmelerin aritmetik ortalaması verilmiştir. Ayrıca, Finike Cremo Cloudy kireçtaşı, Finike Cremo Classic kireçtaşı ve Korkuteli Bej doğal taşlarında farklı boyutlarda bloklar kesilmiştir. Katrak makinelerinde kullanılan lama (çelik şerit) ve üzerindeki elmas soketler, mermer kesim işleminin temel elemanlarıdır. Katrak makinelerinde kullanılan lamalar özel alaşımlı çeliklerden üretilmektedir. Bu çeliklerin kalınlığı 3-5 mm ve genişliği 180-300 mm arasında değişmektedir. Ayrıca, bu makinelerde blok kesme işlemi, lamalara monte edilmiş elmas soketlerin kayaç yüzeyine sürtünmesiyle, kayaç üzerinde meydana gelen aşınma sayesinde gerçekleşmektedir. Lamaların yüzeyine monte edilen elmas soketler, sentetik elmas taneleri ve metal bağlayıcılar (bronz, bakır, kobalt alaşımları) kullanılarak üretilmektedir. Elmas yoğunluğu ve bağlayıcı sertliği, kesilecek kayacın sertlik derecesine göre optimize edilmektedir.

2.2. Doğal Taşların Fizikomekanik Özellikler Veritabanı

Katrak makinelerinin performansını değerlendirmek için doğal taşların bazı fizikomekanik özellikleri dikkate alınmıştır. Bu özellikler ρ, φ, UCS, BTS, CAI, SHH_1, SHH_2 ve deformasyon katsayısını (K) kapsamaktadır. Bu çalışmada toplam on farklı karbonat kökenli doğal taş örneği üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ancak, zaman ve maliyet tasarrufu sağlamak amacıyla, bu örneklerden yedisi için daha önce gerçekleştirilen deney sonuçları ilgili literatürde raporlandığı şekliyle kullanılmıştır (Tumac, 2015). Söz konusu veriler, aynı taş örnekleri üzerinde ve büyük çaplı dairesel testerelerde yürütülen önceki çalışmaların bulgularına dayanmaktadır ve mevcut araştırmanın veritabanına bütünlük sağlamak amacıyla entegre edilmiştir. Geriye kalan üç örnek üzerinde ise aynı standart deney yöntemleri izlenerek yeni ölçümler yapılmıştır.

Fizikomekanik ve aşındırıcılık özellikleri belirlemek için ISRM (1981), ASTM (2010), Fowell ve McFeat-Smith (1976) tarafından belirtilen yöntemler dikkate alınmıştır. Blok numunelerden alınan NX çapındaki karot numunelerin yüksek hassasiyetli bir terazi ile ağırlıkları ölçülerek kütleleri belirlenmiştir. Ardından, numunelerin hacimlerinin hesaplanmasıyla birlikte yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Her iki ucu düzgün şekilde kesilerek yüzey paralellikleri sağlanan karot numuneleri etüvde 105-110 °C sıcaklık aralığında 24 saat boyunca kurutulmuştur. Etüvde kurutulan numunelerin kuru ağırlıkları, yüksek hassasiyetli bir terazi yardımıyla belirlenmiştir. Daha sonra, kuru ağırlıkları belirlenen numuneler, su ile doldurulmuş bir kapta 48 saat süreyle bekletilmiştir. Su içinde doygun hale gelen numuneler, yeniden hassas terazi ile tartılarak yaş ağırlıkları ölçülmüştür. Bu ölçümler kullanılarak her bir numune için porozite değerleri hesaplanmıştır. UCS ve BTS deneylerinde kullanılan karotların yükseklik/çap oranı sırasıyla 2.5 ve 0.5



Şekil 2. Çalışma kapsamındaki katrak makinelerinin kullanıldığı fabrikalara ait fotoğraflar.

olarak seçilmiştir. Ayrıca, bu deneylerde sırasıyla 1.0 kN/s ve 0.25 kN/s yükleme hızları uygulanmıştır. Yeni kırılmış örnekler üzerinde ise CAI deneyleri yapılmıştır. Kaya numuneleri, taze yüzeyleri yukarı bakacak şekilde bir mengene içine sabitlenmiştir. Sertleştirilmiş çelikten imal edilmiş (Rockwell sertliği 55 HRC), 90° konik uçlu ve 7 kg'lık bir başlığa sabitlenmiş çelik uç, taze yüzey üzerine dikkatlice yerleştirilmiş ve 1 saniye içerisinde yüzey boyunca 1 cm çekilmiştir. Bu prosedür her bir numune için toplam beş çelik uç kullanılarak tekrarlanmıştır. Daha sonra çelik uçları mikroskop altında incelenmiş; oluşan aşınma düzlüğünün birbirine dik iki çapı her bir çelik uç için kaydedilmiş ve

Çizelge 1. Doğal taşların kesiminde kullanılan katrak makinelerinin performans değerlendirmesi.

Gözlem No.	1	2	3	4	5
Doğal taş ismi	Afyon açık kaplan postu mermer	Afyon beyaz mermer	Karacabey siyah kireçtaşı	Manyas beyaz mermer	Marmara beyaz mermer
Aktif çerçeve sayısı	60	50	50	50	56
Blok ölçüsü (cm×cm×cm)	180×240×190	150×190×140	180×200×140	150×240×190	180×240×190
Üretilen plaka alanı (m^2)	4.56	2.66	2.80	4.56	4.56
Toplam kesme süresi (dak.)	550	300	355	450	485
Alansal plaka üretim oranı (m^2/saat)	26.86	23.41	23.19	27.36	29.33
Aktif çerçeve başı alansal plaka üretim oranı (m^2/saat/çerçeve)	0.45	0.47	0.46	0.55	0.52
Gözlem No.	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Doğal taş ismi	Milas beyaz mermer	Eskişehir supreme kireçtaşı	Finike cremo cloudy kireçtaşı	Finike cremo classic kireçtaşı	Korkuteli bej
Aktif çerçeve sayısı	60	55	52*	63*	77
Blok ölçüsü (cm×cm×cm)	180×200×140	175×210×150	-	-	-
Üretilen plaka alanı (m^2)	2.80	3.15	3.98*	2.90*	3.24*
Toplam kesme süresi (dak.)	553	420	364*	343*	555
Alansal plaka üretim oranı (m^2/saat)	22.48	23.40	31.01*	31.69*	24.87
Aktif çerçeve başı alansal plaka üretim oranı (m^2/saat/çerçeve)	0.37	0.43	0.61	0.50	0.32

* Bu örnekler üzerinde üç farklı blok üzerinde kesme işlemi yapıldığı için aritmetik ortalama değerler verilmiştir.

okunan on adet değerin aritmetik ortalaması CAI değerleri olarak alınmıştır.

Schmidt çekici deneyleri laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında cihazın gövdesi numune yüzeyine dik olacak şekilde konumlandırılmıştır. Deneylerde L-9 tipi Schmidt çekici kullanılmıştır. Fowell ve McFeat-Smith (1976), kayaçların yerinde sertlik tayini için en uygun cihazın Schmidt çekici (SH) olduğunu belirtmişlerdir ve ayrıca SH değerlerine göre kayaçların deformasyon katsayısını (K) belirlemişlerdir. Deformasyon katsayısı Denklem (1)'den elde edilmektedir:

$$K = \frac{SHH_2 - SHH_1}{SHH_2} \times 100 \quad (1)$$

Burada K, yüzde olarak ifade edilen deformasyon katsayısıdır, SHH_2 aynı noktada yaklaşık 20 testten sonra elde edilen sabit değerdir ve SHH_1 ilk geri tepme değeridir. Çizelge 2'de doğal taşların fizikomekanik özellikleri özetlenmiştir.

3. Yeni Model Önerisi

Bu çalışmada, katrak makinelerinin aktif çerçeve başına denk gelen APÜO değerleri ile doğal taşların laboratuvarda elde edilen fizikomekanik özellikleri arasındaki ilişkiler iki yöntem yardımıyla değerlendirilmiştir. İlk olarak, çıktı (APÜO) parametresi ile girdi (fizikomekanik özellikler) parametreleri arasındaki ilişkiler korelasyon yaklaşımı (bir bağımsız ve bir bağımlı değişken) ile incelenmiştir. Bu yöntem yardımıyla katrak makinelerinin kesme performansını etkileyen doğal taşların en önemli karakteristikleri saptanmıştır. Şekil 3'te katrak makinelerinin kesim performansı ile doğal taşların fizikomekanik özellikleri arasındaki korelasyonlar özetlenmiştir. Bu grafikleri elde etmek için girdi parametreleri ile çıktı parametresi arasındaki ilişkiler doğrusal (linear), üstel (exponential), logaritmik (logarithmic) ve üslü (power) fonksiyonlar olarak incelenmiş ve determinasyon katsayılarına (R^2) göre değerlendirilmiştir. Bu fonksiyonlardan hangisi daha yüksek R^2 değerine sahipse o korelasyon en anlamlı model olarak seçilmiş ve düşük R^2 değerine sahip korelasyonların denklemleri dikkate alınmamıştır. Görül-

Çizelge 2. Doğal taşların fizikomekanik özelliklerinin özeti.

Doğal taş	ρ (g/cm³)	φ (%)	UCS (MPa)	BTS (MPa)	CAI (-)	SHH_1 (-)	SHH_2 (-)	K (%)
Afyon açık kaplan postu mermer*	2.81	0.27	81.3	5.1	3.05	43.6	51.1	14.7
Afyon beyaz mermer*	2.68	0.16	88.6	6.0	3.50	50.3	54.5	7.7
Karacabey siyah kireçtaşı*	2.70	0.50	70.8	5.4	1.86	38.1	47.3	19.5
Manyas beyaz mermer*	2.71	0.40	65.3	3.9	2.00	40.0	51.4	22.2
Marmara beyaz mermer*	2.71	0.20	70.4	4.1	2.15	39.6	53.9	26.5
Milas beyaz mermer*	2.72	0.20	97.3	7.1	2.99	66.5	71.9	7.5
Eskişehir supreme kireçtaşı*	2.74	0.30	89.0	5.3	2.44	72.0	87.0	17.2
Finike cremo cloudy kireçtaşı	2.20	16.70	52.6	8.4	0.30	20.0	39.0	48.7
Finike cremo classic kireçtaşı	2.44	7.40	19.6	11.0	0.28	33.0	40.0	17.5
Korkuteli bej	2.70	0.40	120.9	9.4	1.29	65.6	71.0	7.6

* Bu doğal taşların değerleri Tumac (2015)'ten elde edilmiştir.
ρ: yoğunluk, φ: porozite, UCS: tek eksenli basınç dayanımı, BTS: dolaylı çekme dayanımı, CAI: Cerchar aşındırıcılık indeksi, SHH_1: Schmidt çekici ilk geri tepme değeri, SHH_2: Schmidt çekici aynı noktada 20'nci geri tepme değeri, K: deformasyon katsayısı.

düğü gibi, UCS, SHH_1, SHH_2 ve K değerleri ile APÜO değerleri arasında orta ve güçlü düzeyde anlamlı korelasyonlar belirlenmiştir.

Daha sonra, korelasyon yönteminden elde edilen modelleri güçlendirmek için çoklu regresyon analizi (bir bağımlı değişken ve birden fazla bağımsız değişken) uygulanmıştır. Bu yöntemi uygulamak için Minitab (2016) programı kullanılmıştır. En iyi altkümeler yöntemi olası istatistiksel ilişkileri ve avantajları tespit etmek için uygulanmıştır. Ayrıca, minimum güven sınırı %95 olarak dikkate alınmıştır. Bu güven sınırında maksimum anlamlılık değeri ise 0.05 olarak kabul edilmiştir. Bunun yanında, çoklu doğrusallık probleminden kaçınmak için (bağımsız/tahmin edici parametreler arasında yüksek korelasyon ($|R|\geq 0.85$)) varyans şişirme faktörü (VIF) de dikkate alınmış ve bu değerin 10'dan düşük olması seçilmiştir. Örneğin, yoğunluk ve porozite parametreleri arasındaki korelasyon yüksek olduğu için bu iki değişken aynı modele birlikte dahil edilmemiştir. Ayrıca, bu iki parametrenin genel olarak dar bir veri aralığında değişim göstermesi nedeniyle, söz konusu değişkenler modelleme çalışmalarında değerlendirme dışı bırakılmıştır. Son olarak, geliştirilen modellere istatistiksel "t" ve "F" testleri uygulanmış; her iki testten elde edilen değerlerin kritik tablo değerlerinden büyük çıkmasıyla modellerin anlamlılığı doğrulanmıştır.

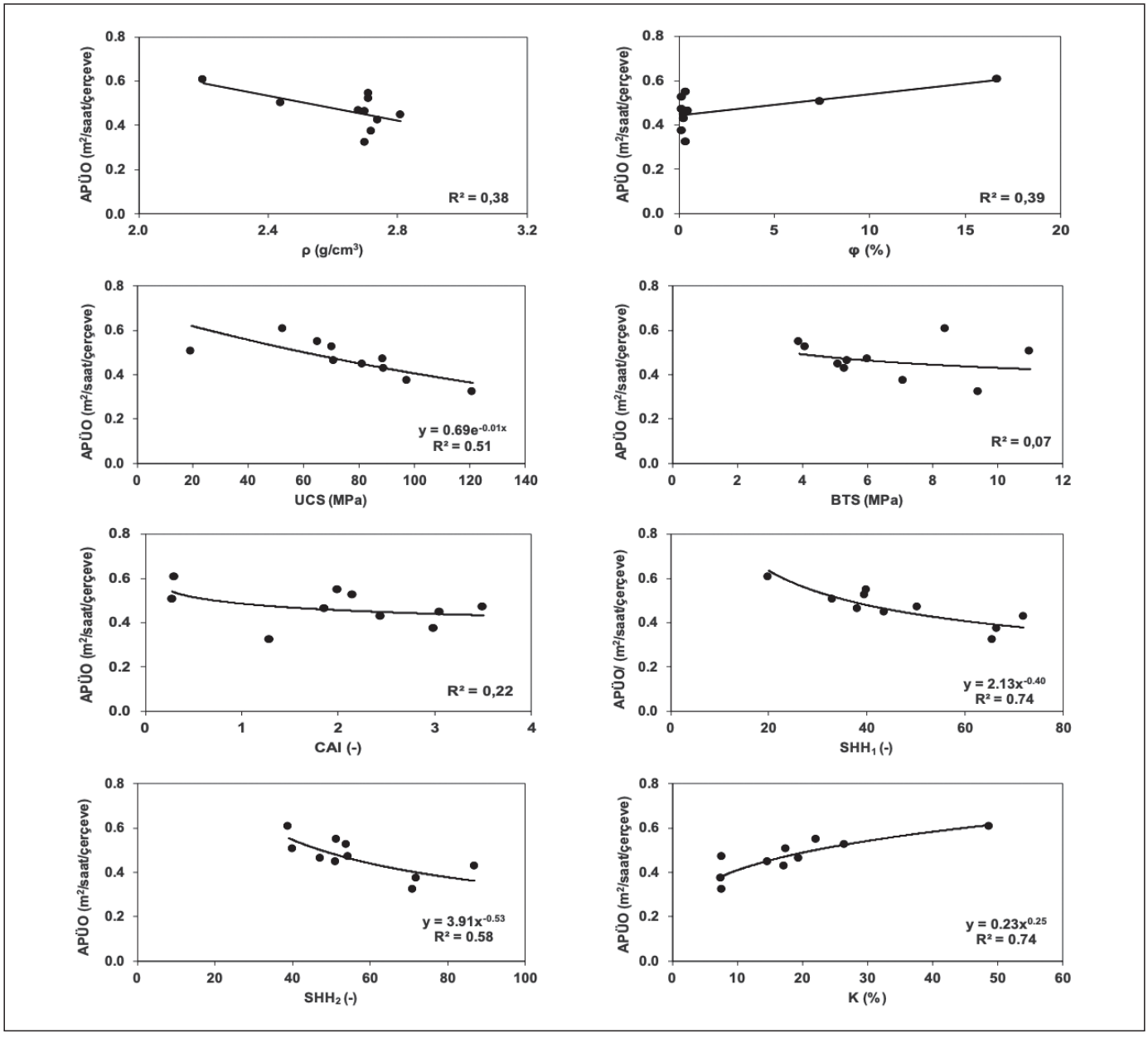
Denklem (2) ve (3)'te çoklu regresyon analizi ile elde edilen modeller verilmiştir. Bu denklemlerdeki R^2 değerleri düzeltilmiş determinasyon katsayısı değerlerini göstermektedir.

$$APÜO = 0.00410\,K - 0.000315 \times \left(\frac{UCS \times BTS}{2}\right) + 0.467 \qquad R^2 = 0.87 \quad (2)$$

$$APÜO = 0.00399\,K - 0.00135\,UCS + 0.495 \qquad R^2 = 0.78 \quad (3)$$

Burada, APÜO alansal plaka üretim oranı (m^2/saat/çerçeve), K Schmidt çekici deformasyon katsayısı, UCS tek eksenli basınç dayanımı (MPa) ve BTS dolaylı çekme dayanımı (MPa) göstermektedir. Şekil 4'te, bu denklemler için ölçülen ve tahmin edilen değerlerin dağılım grafikleri verilmiştir. Ayrıca, denklemlerin istatistiksel analiz sonuçları Çizelge 3'te özetlenmiştir. Görüldüğü üzere, geliştirilen modellerin, 1:1 doğrusu etrafında sınırlı sapma ve düşük düzeyde dağılım sergilediği görülmektedir. Ayrıca, modellerin determinasyon katsayıları orta ve yüksek düzeyde bir açıklayıcılığa işaret etmekte olup, önerilen bu modellerin (özellikle Denklem 2'nin) tahmin yeteneği ve güvenilirliği oldukça yüksektir.

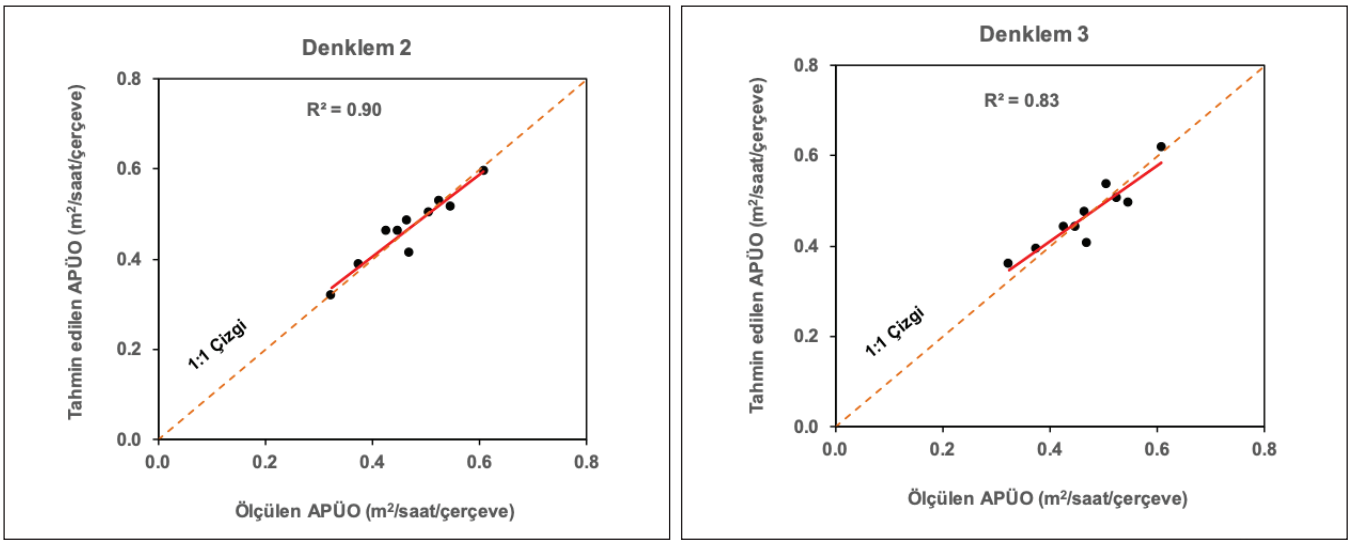
Modellerin tahmin performansını değerlendirmek amacıyla, ortalama karesel hata kökü (Root Mean Square Error - RMSE) ve ortalama mutlak yüzde hata (Mean Absolute Percentage Error - MAPE) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4). RMSE değeri, modelin tahmin ettiği ve gözlenen değerler arasındaki farkların karelerinin ortalamasının karekökünü ifade ederek tahmin hatalarının genel büyüklüğünü göstermektedir. MAPE ise, tahmin hatalarının yüzde cin-



Şekil 3. Doğal taşların fizikomekanik özellikleri ile katrak makinelerinin performansı arasındaki korelasyonlar.

Çizelge 3. Önerilen modellerin istatistiksel sonuçları.

Denklem No.	Ön gösterge	Tahmini t-değeri	Tablo t-değeri	p değer	VIF	R^2 (%)	Düzeltilmiş R^2 (%)	Tahmini F	Tablo F-değeri
2	Sabit	14.26	2.26	0.000	-	90.0	87.1	31.43	4.74
	K	4.55		0.003	1.24				
	$\frac{UCS \times BTS}{2}$	-3.82		0.007	1.24				
3	Sabit	8.26	2.26	0.000	-	83.1	78.2	17.18	4.74
	K	3.20		0.015	1.41				
	UCS	-2.41		0.047	1.41				



Şekil 4. Ölçülen ve tahmin edilen katrak makinelerine ait APÜO parametresinin dağılım grafikleri.

Çizelge 4. Önerilen modellerin istatistiksel sonuçları.

Denklem No.	RMSE	MAPE (%)
2	0.0006	4.1801
3	0.0011	5.9787

sinden ortalamasını temsil eder ve modelin göreli doğruluğunun değerlendirmesinde kullanılmaktadır. Bu sonuçlar, her iki modelin de yüksek doğruluk düzeyine sahip olduğunu, ancak Model 1'in, daha düşük hata oranları nedeniyle kesilebilirlik performansının tahmininde daha güvenilir ve duyarlı bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir.

4. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, katrak makinelerinin kesim performansını tahmin etmek amacıyla yalnızca doğal taşların fiziksel ve mekanik özellikleri esas alınmıştır. Bununla birlikte, katrak performansının yalnızca kayaç özelliklerinden değil; kesim yapılan blok boyutları, makine tasarımı, operasyon parametreleri ve çevresel koşullar gibi birçok faktörden de etkilendiği bilinmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada önerilen ampirik modellerin, sınırlı sayıda parametreye dayalı olarak geliştirilmiş öncü bir yaklaşım olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu çalışma, katrak makinelerinin çerçeve başına denk gelen APÜO ile doğal taşların fizikomekanik özellikleri arasında bazı korelasyonların olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada sunulan verilerde APÜO ile doğal taşların UCS, SHH_1 ve SHH_2 arasında ters yönlü ilişkiler saptanmıştır. Ancak, bu performans parametresi ile Schmidt çekici deformasyon katsayısı (K) arasında doğrudan korelasyon olduğu görülmektedir. Buna benzer bulgular büyük çaplı dairesel testerelerin (S/T) kesim işlemi için de bazı araştırmacılar tarafından ortaya konulmuştur (Neves vd., 2016; Satı vd., 2023; Tumac, 2015; Tumaç & Tolouei, 2017). Tumac (2015), K parametresi ile büyük çaplı dairesel testerelerin APÜO değerleri arasında doğrudan bir ilişki; UCS, SHH_1 ve SHH_2 özellikleri arasında ise ters yönlü ilişkiler olduğunu belirtmiştir. Bu sonuçlar, bu çalışmada önerilen modelleri teyit etmektedir. Neves vd. (2016) ise katrak makinelerinde APÜO ile doğal taşların UCS değerleri arasında ters yönlü ilişki olduğunu belirtmiş ve bu da bu çalışmadaki bulgularla örtüşmektedir. Diğer taraftan, Tumaç ve Tolouei (2017) ise büyük çaplı dairesel testerelerin APÜO ile doğal taşların UCS ve SHH değerleri arasında ters yönlü korelasyonlar olduğunu belirtmişlerdir. Elde edilen sonuçlar bu çalışmadaki sonuçları desteklemektedir. Son olarak, Satı vd. (2023) altı farklı doğal taş üzerinde katrak makinelerinin kesim performansına ilişkin değerlendirmeler sonucunda, APÜO ile UCS arasında ters yönlü bir korelasyon olduğunu belirtmişlerdir ve bu durum bu çalışmada önerilen modelleri desteklemektedir.

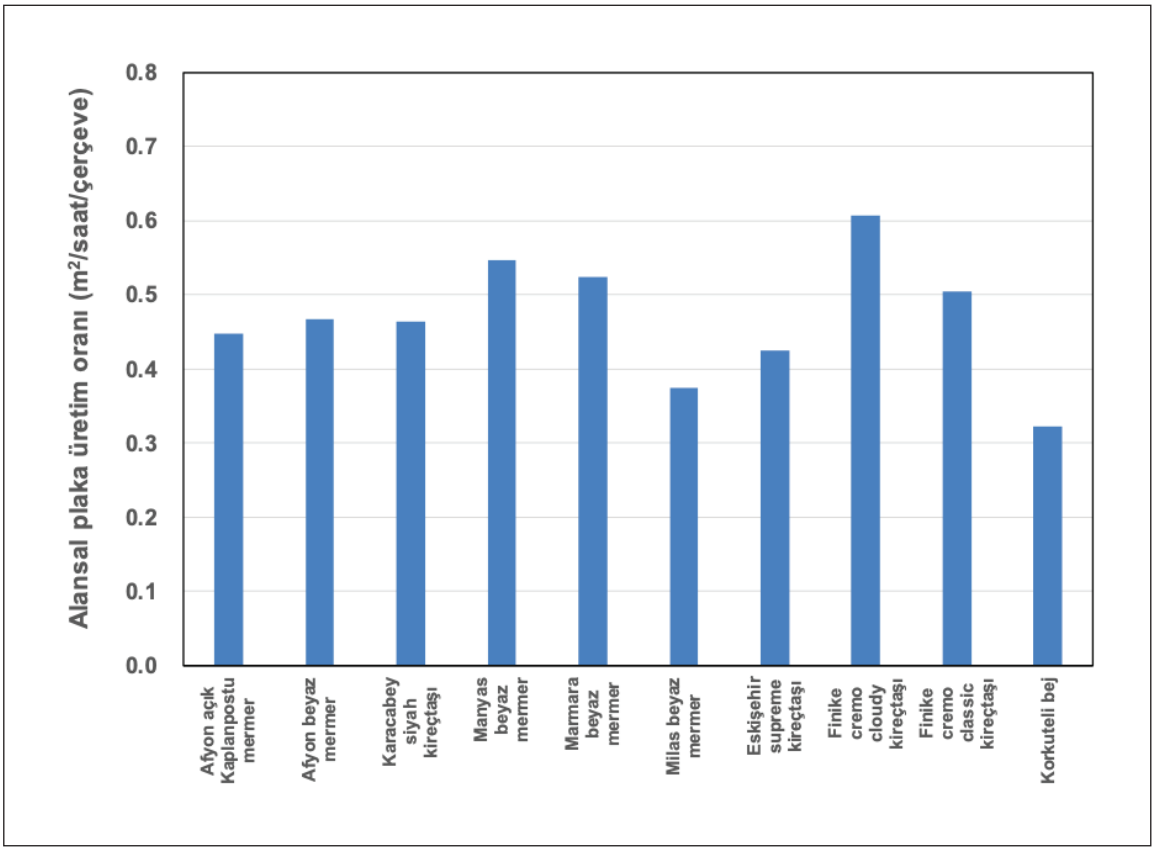
Bu çalışmada, CAI deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen değerlerin 0.28 ile 3.50 arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu aralık, incelenen örneklerin aşındırıcılık açısından 'aşındırıcı olmayan' ile 'çok aşındırıcı' sınıflar arasında geniş bir dağılım sergilediğini göstermektedir. Ancak, sınırlı örnek sayısı ve CAI değerlerindeki yüksek varyasyon, istatistiksel

analizlerde güvenilir ve genellenebilir ilişkilerin kurulmasını güçleştirmiştir. Ayrıca, yapılan basit korelasyon değerlendirmesinde CAI ile APÜO arasında düşük düzeyde bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Bu nedenlerle, CAI parametresi analiz ve modelleme aşamalarında doğrudan kullanılmamış, sonuçlar yorumlayıcı nitelikte değerlendirilmiştir.

Schmidt çekici sertlik değeri (SHH) birçok araştırmacı tarafından hem kayaç ve doğal taşların dayanımlarını tahmin etmek için hem de kazı veya kesim işlemi gerçekleştiren makinelerin performansını değerlendirmek için yaygın biçimde kullanılmaktadır (Tumac, 2015; Tumaç & Tolouei, 2017; Young & Fowell, 1978; Sachpazis, 1990; Goktan & Ayday, 1993; Kahraman, 2001; Bilgin vd., 2002). Bu çalışmada, Schmidt çekici değerinin katrak makinelerinin performansının tahmin edilmesinde de kullanabileceği gösterilmiştir. Özellikle önceki çalışmalar, genellikle SHH değeri ile makine performans parametreleri arasındaki ilişkiyi incelemeye odaklanmıştır. Buna karşın, bu çalışmada Schmidt çekici deformasyon katsayısı (K) ilk kez katrak makinelerinin performansını değerlendirmek amacıyla kullanılmış ve bu durum, çalışmanın yenilikçi yönü ve özgün değerini ortaya koymuştur.

Bu çalışmada kullanılan gevreklik parametresi, Altindag (2000, 2002, 2003) tarafından önerilen tanıma dayanmaktadır. Kayaçların kesme ve parçalanma davranışlarını bütüncül biçimde temsil eden bu kavram, katrak performansının yorumlanmasında açıklayıcı bir çerçeve sunmaktadır. Bu kapsamda, çalışmada önerilen modellerden birinde (UCS×BTS)/2 parametresi doğrudan kullanılmış; diğer analizler ise doğrudan ölçülen fizikomekanik özellikler üzerinden yürütülmüştür. Gelecekte, gevreklik temelli parametrelerin farklı modelleme yaklaşımlarıyla katrak performansına daha kapsamlı biçimde entegre edilmesi, konuya ilave katkılar sağlayabilir.

Bu çalışmada önerilen modeller, yalnızca doğal taşların bazı fizikomekanik özellikleri kullanılarak geliştirilmiş olup; katrak makinelerinin diğer operasyonel parametreleri ile kullanılan testere çapı gibi diğer parametreler göz önünde bulundurulmamıştır. Bu doğrultuda, elde edilen sonuçlar dikkatle yorumlanmalı ve çalışmanın belirli sınırlılıkları göz önünde bulundurulmalıdır. İncelenen katrak makinelerinin APÜO değerleri 0.32-0.61 m^2/saat/çerçeve aralığında değişmiştir. APÜO değerleri, katrak makinelerinin performans düzeylerinin karşılaştırılmasında önemli bir ölçüt olarak değerlen-



Şekil 5. İncelenen doğal taşlarda APÜO değerlerinin aralığı.

dirilmektedir. Görece düşük APÜO değerleri düşük üretim verimliliğini temsil ederken, yüksek APÜO değerleri daha etkin ve avantajlı bir makine performansını ifade etmektedir. Bu bağlamda, Şekil 5'te sunulan APÜO aralıkları, incelenen makinelerin performanslarının karşılaştırmalı olarak yorumlanmasına olanak sağlamaktadır.

Ayrıca, önerilen modellerde yer alan girdi parametrelerinin alt ve üst sınırları esas alınarak, katrak makinelerinin performans tahminlerinde bu sınırların aşılmamasına özen gösterilmelidir. İlaveten, katrak makinelerinin kesim performansını değerlendirmek amacıyla literatürde önerilen diğer modellerin de kullanılması, daha gerçekçi performans tahminleri yapılmasını mümkün kılmaktadır. Bu çalışmada önerilen modeller ile literatürde daha önce önerilmiş modellerden elde edilen performans tahminlerinin birlikte kullanılması, daha güvenilir ve etkin makine seçimlerinin yapılmasına olanak sağlayacaktır.

Zaman ve maliyet kısıtlamaları nedeniyle daha önce literatürde yayımlanmış yedi kayaç örneğine ait deneysel veriler bu çalışmada yeniden değerlendirilmiş, böylece modelin oluşturulmasında farklı kaynaklardan gelen veriler bütünleştirilmiştir. Ancak, örnek sayısının sınırlı olması modelin genellenebilirliğini kısıtlamaktadır. Bu durum, gelecekte yapılacak çalışmalarda daha fazla örnek, farklı jeolojik kökenler ve operasyonel parametrelerin birlikte incelenmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Gelecekteki çalışmalar, bu çalışmadaki veritabanından farklı teknik özelliklere sahip katrak makineleri ve doğal taş örnekleri ile güncellenmelidir. Özellikle, farklı jeolojik kökenli doğal taşların veritabanına ilave edilmesi önerilen modellerin daha genel ve kapsayıcı olmasına yardımcı olabilecektir. Veritabanı genişletildiğinde, doğal taşların mineralojik ve petrografik özelliklerinin (özellikle mineral tane boyutunun) APÜO üzerine etkisinin de araştırılması önerilmektedir. Ayrıca, katrak makinelerinin teknik özelliklerinin, tasarımlarının ve çalışma koşullarının dikkate alınarak yeni çalışmaların yapılmasının faydalı olabileceği düşünülmektedir. Doğal taşların CAI gibi diğer fizikomekanik özelliklerinin katrak makinelerinin performansına olan etkisi üzerine daha kapsamlı incelemeler yapılmalıdır. Buna ek olarak, veri sayısı artırılarak, istatistiksel belirsizlikle ilgili sorunları çözmek için bu çalışmadaki yöntemlere alternatif olarak esnek hesaplama yöntemlerinin kullanılması da önemlidir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, karbonat kökenli doğal taşların fizikomekanik özellikleri ile katrak makinelerinin kesim performansı arasındaki ilişkiler incelenmiş ve bu ilişkileri tanımlamaya yönelik yeni ampirik modeller geliştirilmiştir. On farklı doğal taş üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri sonucunda, yoğunluk, porozite, tek eksenli basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı, Cerchar aşındırıcılık indeksi ve Schmidt çekici sertlik değerleri belirlenmiştir. Bu veriler kullanılarak, katrak makinesi performans göstergesi olarak tanımlanan aktif çerçeve (lama) başına düşen alansal plaka üretim oranı ile fizikomekanik parametreler arasındaki doğrusal ve doğrusal olmayan ilişkiler analiz edilmiştir.

Korelasyon analizleri ile çoklu doğrusal regresyon uygulamalarının sonuçlarına göre, katrak makinesi kesim performansının tahmininde en etkili değişkenlerin tek eksenli basınç, dolaylı çekme dayanımı ve Schmidt çekici deformasyon katsayısı olduğu belirlenmiştir. Bu üç parametre birlikte değerlendirildiğinde, doğal taşların kesilebilirlik performansının yüksek doğrulukla öngörülebileceği görülmüştür. Elde edilen ampirik modeller, üretim planlaması aşamasında katrak makinesi performansının tahmini için pratik bir araç sunmaktadır.

Ayrıca, çalışmada kullanılan modellerin farklı jeolojik kökenlere ve geniş bir fizikomekanik özellik aralığına sahip doğal taşlarla test edilmesi, modellerin genellenebilirliğini artıracaktır. Farklı tipte katrak makinelerinden elde edilecek performans verilerinin de analize dahil edilmesiyle, daha güvenilir ve kapsamlı tahmin modellerinin geliştirilmesi mümkün olacaktır.

Sonuç olarak; bu çalışma, karbonat kökenli doğal taşların fizikomekanik özellikleri ile kesilebilirlik performansı arasındaki ilişkilerin anlaşılmasına önemli katkılar sağlamış ve doğal taş endüstrisinde üretim verimliliğinin artırılmasına yönelik ampirik bir yaklaşım sunmuştur.

Teşekkür: Bu çalışmanın gerçekleştirilmesine olanak sağlayarak kendi fabrikasında ve iş birliği içinde oldukları tesislerde gerekli imkânları sunan Mermeras Ltd. Şti. sahibi Sayın Emek Kılıç'a teşekkür ederiz. Ayrıca, bej ve kireçtaşı numuneleri üzerinde katrak makinelerinin performans ölçümlerini gerçekleştirerek bu kapsamda lisans bitirme çalışmasını tamamlayan Maden Mühendisi Sayın Fevzi Can Polat'a teşekkür ederiz.

Yazar katkısı: Aydin Shaterpour-Mamaghani: çalışmayı planlamış ve tasarlamıştır, çalışmanın analizlerini yaparak makaleyi yazmıştır; Deniz Tumaç: Çalışma hakkında verileri toplamış ve analiz etmiştir, makaleyi düzeltmiştir.

Etik kurul onayı: Etik kurul onayı gerekmemektedir.

Kaynaklar

Altindag, R. (2000). Darbeli delme performans analizlerinde kayaç gevrekliğinin rolü. 5. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu. 30 - 31 Ekim, ss.105-112, Isparta, Türkiye.

Altindag, R. (2002). The evaluation of rock brittleness concept on rotary blast holes drills. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy,* 102(1), 61-66.

Altindag, R. (2003). Correlation of specific energy with rock brittleness concepts on rock cutting. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 103*(3), 163-172.

ASTM D7625-10. (2010). Standard test method for laboratory determination of abrasiveness of rock using the CERCHAR method. American Society for Testing and Materials.

Bayram, F. (2002). Elmas lamalı katraklarda kesme verimliliğin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, 146 s.

Bayram, F., & Kulaksiz, S. (2021). Evaluation of rock cutting performance of diamond segmented frame saw in terms of diamond segment wear. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 139,* 104657. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104657

Bilgin, N., Dincer, T., & Copur, H. (2002). The performance prediction of impact hammers from Schmidt hammer rebound values in Istanbul metro tunnel drivages. *Tunnelling and Underground Space Technology, 17 (3)*, 237-247. https://doi.org/10.1016/S0886-7798(02)00009-3

Bilim, N. (2012). Optimum cutting speed of block-cutting machines in natural stones for energy saving. *Journal of Central South University, 19*, 1234-1239. https://doi.org/10.1007/s11771-012-1134-y

Brook, B. (2002). Principles of diamond tool technology for sawing rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 39*, 41-58. https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00007-2

Dormishi, A., Ataei, M., Khalokakaei, R., & Mikaeil, R. (2018). Energy consumption prediction of gang saws from rock properties in carbonate rocks cutting process. *International Journal of Mining and Mineral Engineering, 9 (3)*, 216-227. https://doi.org/10.1504/IJMME.2018.096115

Dormishi, A., Ataei, M., Mikaeil, R., Khalokakaei, R., & Shaffiee Haghshenas, S. (2019). Evaluation of gang saws' performance in the carbonate rock cutting process using feasibility of intelligent approaches. *Engineering Science and Technology, 22*, 990-1000. https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.01.007

Fowell, R. J., & McFeat-Smith, I. (1976). Factors influencing the cutting performance of a selective tunnelling machine. Proceedings of the international Symposium IMM (Tunelling'76), p. 301-309, London, England.

Goktan, R. M., & Ayday, C. A. (1993). Suggested improvement to the Schmidt rebound hardness ISRM suggested method with particular reference to rock machineability. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 30 (3)*, 321-322. https://doi.org/10.1016/0148-9062(93)92733-7

ISRM. 1981. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. International Society of Rock Mechanics, London: Pergamon Press.

Kahraman, S. (2001). Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38 (7)*, 981-94. https://doi.org/10.1016/S1365-1609(01)00039-9

Kahraman, S., Ulker, U., & Delibalta, M. S. (2007). A quality classification of building stones from P-wave velocity and its application to stone cutting with gang saws. *The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 107*, 427-430.

Karaabat Varol, K. (2023). Performance evaluation to measure production equipment effectiveness in block cutting machine (gang saw). *Mining Science, 30*, 157-169. https://doi.org/10.37190/msc233010

Korman, T., Kujundžić, T., & Kuhinek, D. (2015). Simulation of the chain saw cutting process with a linear cutting machine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 78*, 283-289. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.07.004

Lons, H. H. (1970). Basic research on frame sawing with diamond blades. Diss3 Tu Hanover.

MEGEP. 2011. (Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi), Mermer plaka kesimi-2. T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, Makine teknolojisi modülü, Ankara.

Mikaeil, R., Ataei, M., Ghadernejad, S., & Sadegheslam, G. (2014). Predicting the relationship between system vibration with rock brittleness indexes in rock sawing process. *Archives of Mining Sciences, 59 (1)*, 139-153. https://doi.org/10.2478/amsc-2014-0010

Minitab 16, (2016). Statistical Software. (Licensed by Istanbul Technical University, Türkiye).

Neves, P. F., Silva, M. C. E., Paneiro, G., & Frazão, M. (2016). Prediction of slab production with multiblade gang saw. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2,* 681-686.

Sachpazis, C. I. (1990). Correlating Schmidt hardness with compressive strength and Young's modulus of carbonate rock. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 42*, 75-83. https://doi.org/10.1007/BF02592622

Sakcalı, A. (2013). Mermer blok kalitesinin ultrasonik yöntemle belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, 116 s.

Sarıçalı, G. (2019). Bütünleşik kemira-m ve copras yöntemi ile mermer işletmesi için katrak makinesi seçimi. Kafkas Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, 10 (20), 1028-1061. https://doi.org/10.36543/kauiibfd.2019.044

Satı, Y. E. (2020). Doğal taş fabrikalarında kullanılan S/T ve katrak makinelerinin performans analizi. Bitirme ödevi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Satı, Y. E., Tumaç, D., & Shaterpour-Mamaghani, A. (2023). Sedimanter ve metamorfik kökenli doğal taşlarda blok kesme (S/T) ve katrak makinelerinin kesilebilirliğin değerlendirilmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12 (3)*, 895-904. https://doi.org/10.28948/ngumuh.1279557

Shaffiee Haghshenas, S., Mikaeil, R., Esmaeilzadeh, A., Careddu, N., & Ataei, M. (2022). Statistical study to evaluate performance of cutting machine in dimension stone cutting process. *Journal of Mining and Environment, 13 (1)*, 53-67. https://doi.org/10.22044/jme.2022.11362.2118

Shaffiee Haghshenas, S., Shirani Faradonbeh, R., Mikaeil, R., Shaffiee Haghshenas, S., Taheri, A., Saghatforoush, A., & Dormishi, A. (2019). A new conventional criterion for the performance evaluation of gang saw machines. *Measurement, 146*, 159-170. https://doi.org/j.measurement.2019.06.031

Sun, Q., Zhang, J., Wang, Z., Zhang, H., & Fang, J. (2016). Segment wear characteristics of diamond frame saw when cutting different granite types. *Diamond & Related Materials, 68*, 143-151. https://doi.org/10.1016/j.diamond.2016.06.018

Tumac, D. (2015). Predicting the performance of large diameter circular saws based on Schmidt hammer and other properties for some Turkish carbonate rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 75,* 159-168. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.01.015

Tumaç, D., & Tolouei, S. (2017). Mermer fabrikalarında kullanılan büyük çaplı dairesel testerelerin (S/T) performans analizi. *Politeknik Dergisi, 20 (3),* 651-662.

Wang, C. Y., & Clausen, R. (2002). Marble cutting with single point cutting tool and diamond segments. *International Journal of Machine Tools & Manufacture, 42*, 1045-1054. https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00032-9

Young, R. P., & Fowell, R. J. (1978). Assessing rock discontinuities. *Tunnels Tunnelling, 10 (5),* 45-8.

Zhang, H., Zhang, J. Wang, Z., Sun, Q., & Fang, J. (2016). A new frame saw machine by diamond segmented blade for cutting granite. *Diamond & Related Materials, 69*, 40-48. https://doi.org/10.1016/j.diamond.2016.07.003

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi
Dergi web sayfası: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen
DOI: 10.7212/karaelmasfen.1831353

Araştırma Makalesi
Geliş tarihi / Received : 27.11.2025
Kabul tarihi / Accepted : 12.01.2026

Piretroid İnsektisit Deltametrinin Doza Bağlı Akut Toksisitesinin *Allium cepa* Test Modeli Kullanılarak Değerlendirilmesi

Evaluation of Dose-Dependent Acute Toxicity of the Pyrethroid Insecticide Deltamethrin Using the Allium cepa Test Model

Dilek Çavuşoğlu[1*], Kürşat Çavuşoğlu[2]

[1]Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Atabey Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Isparta, Türkiye
[2]Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Isparta, Türkiye

Öz

Deltametrin, yaygın kullanımı ve düşük seçiciliği nedeniyle çevre ve özellikle bitkiler, hayvanlar ve insanlar üzerinde zararlı etkileri olan bir böcek ilacıdır. Mevcut çalışma, *Allium cepa* L. deneysel model organizmasında deltametrin insektisitinin akut toksisitesini araştırmak amacıyla yürütülmüştür. Bu amaçla, dört gruba ayrılan *A. cepa* bulblarına 7 gün süresince çeşme suyu (kontrol), 0.75, 1.0 ve 1.25 g L-1 deltametrin uygulanmıştır. Çalışılan tüm deltametrin konsantrasyonları, çimlenme yüzdesi, kök uzaması, adventif kök sayısı ve taze ağırlık gibi morfo-fizyolojik özelliklerde önemli bir azalmaya neden olmuştur. Deltametrin uygulamasını takiben sitogenetik özellikler olan mitotik indekste belirgin bir azalma, mikronükleus sıklığı ve kromozomal anormalliklerde belirgin bir artış meydana gelmiştir. Deltametrin uygulamasına bağlı olarak gözlenen kromozomal anormallikler arasında mikronükleus oluşumu, çekirdekte tomurcuklanma, biloblu çekirdek, kromozomal aglütinasyon, c-mitoz, yapışkan kromozomlar, kromatinin eşit olmayan dağılımı, kromozom fragmentasyonu, kromozom köprüleri, halka kromozom, kutup kayması, geri kalmış kromozomlar ve vagrant kromozom yer almıştır. Ayrıca, çeşme suyu ile muamele edilen kontrol bulblarının kökleri normal ve sağlıklı iken, deltametrin ile muamele edilen bulblarda belirgin bir kök anatomik yapı hasarı gözlenmiştir. Deltametrin kaynaklı anatomik hasarlar, epidermis ve korteks hücrelerinde hücresel madde birikimi, iletim dokusunda madde birikimi, çekirdek deformasyonu, epidermis ve korteks hücre deformasyonu, iletim dokusunda yapısal bütünlüğün bozulması, nekroz ve korteks hücre duvarında kalınlaşma olarak belirlenmiştir. Diğer yandan, incelenen morfo-fizyolojik, sitogenetik ve anatomik özelliklerdeki bozulmalar, deltametrin dozunun artmasıyla daha da belirginleşmiştir. Sonuç olarak, deltametrin biyoindikatör organizma olan *A. cepa* için çok yönlü toksik bir kimyasal ajandır.

Anahtar Kelimeler: Anatomi, büyüme, çimlenme, deltametrin, insektisit, kromozom, soğan

Abstract

Deltamethrin is a pesticide with harmful effects on the environment, especially on plants, animals, and humans, due to its widespread use and high non-selective potency. The current study was conducted to investigate the acute toxicity of deltamethrin insecticide on the model organism *Allium cepa* L. For this purpose, *A. cepa* bulbs, divided into four groups, were treated with tap water (control), 0.75, 1.0, and 1.25 g L-1 deltamethrin for 7 days. All studied deltamethrin concentrations caused a significant decrease in morpho-physiological properties such as germination percentage, root elongation, number of hairy roots, and fresh weight. Following the application of deltamethrin, there was a marked decrease in the mitotic index and a significant increase in the frequency of micronucleus and chromosomal abnormalities, which are cytogenetic properties. Chromosomal abnormalities observed in relation to deltamethrin administration included micronucleus formation, nuclear budding, bilobed nucleus, chromosomal agglutination, c-mitosis, sticky chromosomes, unequal chromatin distribution, chromosome fragmentation, chromosome bridges, ring chromosomes, polar shift, lagging chromosomes, and vagrant chromosomes. Furthermore, while the roots of the control bulbs treated with tap water were normal

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: dilekcavusoglu@isparta.edu.tr

Dilek Çavuşoğlu orcid.org/0000-0002-7963-8204
Kürşat Çavuşoğlu orcid.org/0000-0001-6457-0457

Bu eser "Creative Commons Alıntı-GayriTicari-4.0 Uluslararası Lisansı" ile lisanslanmıştır.

and healthy, a significant root anatomical structure damage was observed in the bulbs treated with deltamethrin. Deltamethrin-induced anatomical damages were identified as accumulation of cellular substance in epidermis and cortex cells, substance accumulation in vascular tissue, nucleus deformation, deformation of epidermis and cortex cells, disruption of structural integrity in the vascular tissue, necrosis, and thickening of the cortex cell wall. On the other hand, the deteriorations in the morpho-physiological, cytogenetic, and anatomical properties examined became more pronounced with increasing doses of deltamethrin. In conclusion, deltamethrin is a multi-faceted toxic chemical agent for the bioindicator organism *A. cepa*.

Keywords: Anatomy, growth, germination, deltamethrin, insecticide, chromosome, onion

1. Giriş

Pest terimi, haşarat adı verilen zararlı organizmaları ifade etmek için kullanılan bir terimdir. Dolayısıyla pest terimi, zararlı organizmalarla mücadele için kullanılan kimyasal maddeler olan pestisit teriminin kökenidir. Pestisitler ise insanlar, hayvanlar ve bitkiler üzerinde bulunan veya yaşayan, ayrıca besin maddelerinin üretimi, hazırlanması, depolanması ve tüketimi sırasında onların besin değerini azaltan zararlıları öldürmek için kullanılan maddelerdir. Bu zararlı organizmalar; böcekler, yabani otlar, mantarlar, parazitler, algler, bakteriler, afitler, nematotlar, yumuşakçalar, kemirgenler ve akarlar gibi canlılardır (Kaya, 2005; Tudi vd., 2021). Pestisitler, çeşitli hastalıkların önlenmesinde, ürün kaybının azaltılmasında, ürün veriminin ve kalitesinin iyileştirilmesinde ve ürünün pazar değerinin artırılmasında kritik bir role sahip oldukları düşüncesiyle basit, hızlı ve etkili bir strateji olarak dünya çapında yaygın olarak kullanılırlar (Damalas & Eleftherohorinos, 2011). Yaygın olarak kullanılan pestisitlerin temel sınıfları organoklorinler, organofosfatlar, diamidler, neonikotinoitler, karbamatlar, fenoksiller ve piretroitlerdir (Doğaç vd., 2015; Bilal vd., 2019). Her yıl, dünya genelinde çeşitli uygulamalarda kullanılan yaklaşık üç milyar kilogram pestisitin sadece %1'i hedef zararlıları öldürebilmek amacıyla kullanılırken geriye kalan pestisitler hedefleri dışındaki canlılara ve çevreye absorbsiyon, sızıntı, buharlaşma, sürüklenme ve akış yolu ile nüfuz ederek ekosistem istikrarını ve insan sağlığını olumsuz etkileyebilmektedir (Bolle vd., 2004; Sharma vd., 2019; Tudi vd., 2021). Toprakla temas halinde, pestisitler bitkinin kök sistemi tarafından alınabilir ve daha sonra farklı bitki doku ve organlarında birikebilir (Shahid & Khan, 2022) ve bu da sonuçta büyümenin (Hatamleh vd., 2022), verimin (Glover-Amengor & Tetteh, 2009) fizyolojik (Shahid vd., 2021), metabolik (Shahid vd., 2023) ve simbiyotik (Gonzalez vd. 1996) özelliklerin azalmasına ve ayrıca hücrelerde reaktif oksijen türlerinin birikmesine, hücre zarının hasar görmesine ve iyon sızıntılarının artmasına neden olan oksidatif hasara (Parween vd., 2012) yol açabilir.

Deltametrin, zararlılara karşı geniş spektrumda etkili olan ve hızlı sonuç veren dibromo-piretroid grubu sistemik bir böcek ilacıdır (Chauhan vd., 1999). Deltametrin, süs bitkilerinde, meyvelerde, sebzelerde ve tahıllarda görülen zararlı böcek türleri ile kimyasal mücadelede kullanılan etkili ve kalıcı bir insektisittir (Barlow vd., 2001; Şekeroğlu, 2010). Aynı zamanda, yaz aylarında ülkemizdeki belediyelerin sineklerle mücadele etmek amacıyla kullandıkları duman karışımının ana maddesini oluşturmaktadır (Özkan & Üstüner, 2012). Diğer bazı piretroidler ile karşılaştırıldığında üç kat daha güçlü olması, düşük konsantrasyonlarda yüksek etkisi, kolay parçalanması, ucuz olması, her yerde bulunabilmesi ve kullanım kolaylığı gibi temel avantajları nedeniyle hem iç hem de dış ortamlarda kullanımının arttığı bilinmektedir (Bradbury & Coats, 1989; Özkan & Üstüner, 2012; Kumar vd., 2015).

Deltametrinin bu yaygın kullanımı ve yüksek seçici olmayan gücü; çevre, özellikle de bitkiler, hayvanlar ve insanlar üzerinde zararlı etkilere neden olmaktadır (Leake vd. 1985). Deltametrin son derece lipofilik bir madde olduğu için organik çözücülerde kolaylıkla çözünebilir. Bu lipofilik özelliği sayesinde hücre zarından kolaylıkla geçerek hızlı bir şekilde hücre içerisine girebilir. Bu nedenle, deltametrinin sodyum kanallarında, zar proteinlerinde, hücre içi membran sistemlerinde, karaciğer ve böbrek fonksiyonlarında ve DNA'da hasarlara neden olduğu bildirmiştir (Chinn & Narahashi, 1986; Cabral vd., 1990; Michelangeli vd., 1990; Chargui vd., 2012).

Çevre kirliliğine neden olan çeşitli kimyasal ajanların genotoksik, mutajenik ve kanserojen etkilerini belirlemek amacıyla çeşitli testler ve bu testlerde farklı organizmalar kullanılmaktadır. Bu testlerden birisi, uzun yıllardır bilim insanları tarafından tercih edilen, önerilen ve mükemmel bir genetik model ve biyoindikatör olarak kabul edilen Allium testidir (Ünal vd., 2020). Bu test, prokaryotik ve ökaryotik organizmalarda bazı kimyasalların neden olduğu genotoksik potansiyeli belirlemek ve mitotik indeks, nükleer ve kromozomal anormallikleri değerlendirmek için kullanılan önemli bir toksisite test sistemidir (Khanna & Sharma, 2013). Allium testinde genellikle *Allium cepa* L. (soğan) bitkisi kullanılmakla birlikte *Allium sativum* L. (sarımsak), *Vicia faba* L. (bakla), *Zea mays* L. (mısır) ve *Hordeum vulgare* L. (arpa)

gibi bitki türleri de kullanılmaktadır (Leme & Marin-Morales, 2009; Tedesco & Laughinghouse, 2012). Önemli bir kültür bitkisi olan *A. cepa*, kolay bulunabilmesi, kısa sürede yetiştirilebilmesi, kromozom sayısının (2*n*=16) az olması ve kromozomlarının büyük ve ışık mikroskobunda incelenmelerinin kolay olması gibi çeşitli avantajları nedeniyle, Allium testinde en çok tercih edilen bitki türüdür (Sarac vd., 2019; Yalçın vd., 2021). Alternatif, kısa süreli, düşük maliyetli ve güvenilir bir test olan Allium testi, bilinen diğer toksisite testlerine kıyasla yüksek uyumluluk ve duyarlılık göstermektedir (Khanna & Sharma, 2013). Kök uçları test edilecek kimyasalla doğrudan temas halinde olduğundan, ilgili ajanların fizyolojik, sitotoksik ve genotoksik etkilerinin belirlenmesinde çok önemli bir model organizmadır (Barberio vd., 2011). Ayrıca, Allium testi kullanılarak yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçların, farklı hayvanların kullanıldığı in vivo çalışmalardan elde edilen sonuçlarla benzer olduğu birçok araştırmacı tarafından bildirilmiştir (Chaparro vd., 2010; Palmieri vd., 2016). Bu test, aynı zamanda hayvanların kullanıldığı deneysel çalışmalara kıyasla etik kaygılardan uzak bir rahatlık sağlamaktadır (Özkul vd., 2016; Bonciu vd., 2018).

Yapılan literatür araştırması sonucunda, bitki test sistemlerinde deltametrinin morfo-fizyolojik, sitogenetik ve anatomik özellikler üzerindeki etkilerini akut maruziyet koşulları altında birlikte ele alan çalışmalar sınırlıdır. Bu çalışmanın amacı, ticari insektisit deltametrinin yüksek dozlarda kısa süreli maruziyete bağlı akut toksik etkilerini, güvenilir bir biyoindikatör tür olan *Allium cepa* L. üzerinde Allium test modeli kullanılarak kapsamlı biçimde değerlendirmektir.

2. Gereç ve Yöntem

2.1. Test Organizması

Deney materyali olarak kullanılan bitki *Allium cepa* L. (2*n*=16) olup, Isparta ilindeki bir manavdan temin edilmiştir. Deneylere başlamadan önce, laboratuvarda soğanların kuru pulları ve kurumuş kökleri temizlenmiştir.

2.2. Test Kimyasalları ve LD_{50} Değerinin Belirlenmesi

Bu çalışmada kullanılan deltametrin, Hektaş firmasından temin edilen ve ticari adı Deltharin 2.5 EC olan insektisit formülasyonudur. Çalışmada belirtilen konsantrasyonlar (0.75, 1.0 ve 1.25 g L^{-1}), ticari ürünün birim hacimdeki miktarını ifade etmektedir. Deneylerde kullanılan diğer kimyasallar ise Merck firmasından satın alınmıştır.

LD_{50}, bir kimyasal maddenin tek seferde verildiğinde bir grup test materyalinin % 50'sinin (yarısının) ölümüne neden olan miktarıdır. LD_{50}, bir materyalin kısa süreli zehirlenme potansiyelini ölçmenin bir yoludur. LD_{50} (ölümcül doz) değerini belirlemek amacıyla soğan bulbları çeşitli konsantrasyonlardaki (0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 1.25, 1.50, 1.75 ve 2.0 g L^{-1}) deltametrin ortamlarında 7 gün boyunca çimlendirilmiş ve bulbların yarısının ölümüne neden olan en uygun ve en yakın deltametrin dozu yani LD_{50} değeri 1.0 g L^{-1} olarak bulunmuştur. 1.0 g L^{-1} deltametrin dozu, % 60 oranında soğan bulblarının ölümüne neden olmuştur. LD_{50} değeriyle birlikte, % 90 oranında bulb ölümüne yol açan üst dozu 1.25 g L^{-1} ve % 40 oranında bulb ölümüne yol açan alt dozu 0.75 g L^{-1} olarak seçilmiştir. Bununla birlikte, 1.5 g L^{-1} ve üzerindeki dozlarda bulb çimlenmesi tamamen engellenmiş, 0.25 ve 0.5 g L^{-1} dozlarında ise sırasıyla % 100 ve % 80 arasında çok yüksek bir çimlenme oranı gerçekleşmiştir. Bu yüzden bu dozların çalışılması uygun bulunmamıştır.

2.3. Çimlenme Testi

Negatif kontrol grubunun kullanıldığı bu çalışmada, bilinen bir genotoksik ajan içeren pozitif kontrol grubuna yer verilmemiştir. Bir negatif kontrol ve üç uygulama grubunun her biri için yirmişer adet temiz, benzer büyüklükte ve sağlıklı *A. cepa* bulbları seçilmiştir. Ardından, kapağında bulbların gireceği delikler ve içerisinde musluk suyu ve farklı konsantrasyonlarda (0.75, 1.0 ve 1.25 g L^{-1}) deltametrin bulunan steril plastik kaplara, soğan bulbları tabanları sıvı yüzeyine değecek şekilde yerleştirilmiş ve 7 gün süresince 20 °C'ye ayarlı bir inkübatörde karanlıkta köklenmeleri teşvik edilmiştir. Köklendirme periyodu sonunda, çimlenen bulbların adventif kök sayıları sayılarak; kök uzunlukları milimetrik bir cetvelle ölçülerek, taze ağırlıkları hassas terazide tartılarak; çimlenme yüzdeleri ise eşitlik (1) kullanılarak belirlenmiştir. 1 cm kök uzunluğuna ulaşan bulblar çimlenmiş kabul edilmiştir.

$$\text{Çimlenme yüzdesi (\%)} = [\text{çimlenen bulb sayısı} / \text{toplam bulb sayısı}] \times 100 \quad (1)$$

2.4. Sitogenetik Analizler

Mikroskobik değerlendirmeler için kullanılan kök uçları 1-2 cm uzunluğunda kesilerek toplanmış ve %70 etanole aktarılmadan önce doymuş paradiklorobenzende 4 s boyunca bekletilmiş ve daha sonra etanol-asetik asitte (3:1 v/v) fiksasyona tabi tutulmuştur. Kök uçları sonra 60 °C'de 17 dk boyunca 1 N HCl'de hidrolize edilmiştir. Kök uçları, feulgen ile 1-1.5 s boyanmış ve ardından %45'lik asetik asitte

lam üzerinde ezilmiş, lamel kapatılmış, lamelin etrafına balsam sürülerek daimi preparat haline getirilmiştir. Kromozom fotoğrafları 100x büyütmede ışık mikroskobu altında çekilmiştir (Sharma ve Gupta 1982). Sitogenetik analizler için, her deney grubu başına 10 lam (n=10) hazırlanmıştır. Her lam başına bin (1.000) hücre ve deney grubu başına toplam on bin (10.000) hücre mitotik indeks (Mİ), mikronükleus (MN) sıklığı ve kromozomal anormalliklerin (KA'lar) oluşumunu belirlemek için sayılmış ve Mİ, eşitlik (2) kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca, MN analizi sırasında üç kritik faktör göz önünde bulundurulmuştur. Birincisi, MN, ana çekirdeğin çapının yaklaşık üçte biri kadar bir çapa sahip olmalıdır. İkincisi, MN ve ana çekirdeğin boyama rengi uyumlu olmalıdır. Üçüncüsü ise MN ile ana çekirdek arasında, birbirlerine değiyor gibi görünseler bile, net bir ayrım olmalıdır (Fenech vd., 2003).

$$\text{Mİ}\ (\%) = [\text{mitoz geçiren hücre sayısı} / \text{toplam hücre sayısı}] \times 100 \quad (2)$$

2.5. Anatomik Yapı Hasarlarının Analizi

Anatomik yapı hasarının mikroskobik analizi amacıyla 0.75, 1.0 ve 1.25 g L^{-1} deltametrin ihtiva eden ortamlarda ve çeşme suyu ortamında yetiştirilen *A. cepa* bulblarının köklerinden keskin bir jilet yardımıyla enine kesitler alınmıştır. Kök kesitleri, %2'lik metilen mavisi ile 5 dk boyanmış ve ardından lam üzerine alınmış, lamel kapatılmış, lamelin etrafına balsam sürülerek daimi preparat haline getirilmiştir. Anatomi fotoğrafları, üzerine kamera aparatı takılı olan bir ışık mikroskobu altında 500x büyütmede çekilmiştir.

2.6. İstatistiksel Analiz

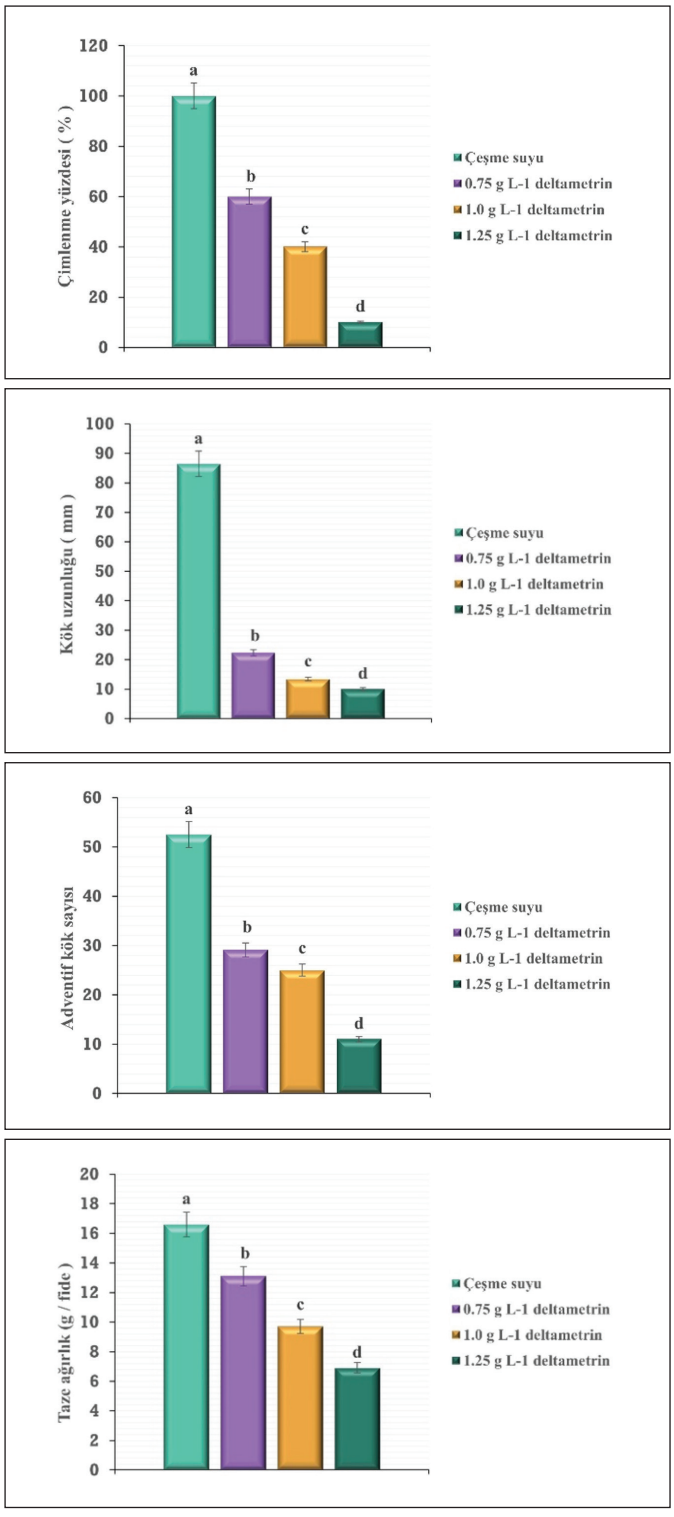
Tüm deneyler üçer kez gerçekleştirilmiştir. Uygulama yapılan grupların ve kontrol grubunun morfo-fizyolojik ve sitogenetik özellikleri için elde edilen veriler ortalama ± standart sapma olarak ifade edilmiştir. Verilerin varyans analizi, SPSS 23.0 bilgisayar programı ile gerçekleştirilmiştir. Ortalamalar arasındaki farklılıkların istatistiksel önemini belirlemek için Duncan'ın çoklu aralık testi kullanılmış ve $p<0.05$ anlamlı kabul edilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Deltametrin Maruziyetinin Morfo-fizyolojik Etkileri

Deltametrin insektisit uygulamasının ardından *Allium cepa* L. bulblarının morfo-fizyolojik özelliklerindeki değişimler Şekil 1'de verilmiştir. 7 günlük inkübasyon süresi sonunda, kontrol bulbları çeşme suyu ortamında %100±0.0 oranında bir çimlenme sergilemiştir. 0.75, 1.0 ve 1.25 g L^{-1} deltametrin dozlarını içeren ortamlardaki bulblarda ise çimlenme oranları, sırasıyla %60±2.8, %40±2.4 ve %10±1.2 olmuştur. Uygulanan dozlar ve çimlenme tepkileri arasında bir ilişki bulunmuştur. Artan insektisit konsantrasyonlarıyla birlikte çimlenme oranlarında belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Diğer yandan, benzer ilişki bulbların taze ağırlıkları, kök uzunlukları ve adventif kök sayıları ile uygulanan dozlar arasında da bulunmuştur. Kontrol bulbları en yüksek kök büyümesine (86.4±1.5 mm) sahipken, 1.25 g L^{-1} deltametrine maruz kalan bulblar en düşük kök büyümesine (10.0±0.1 mm) sahip olmuştur. Bulbların kök büyümesinde, kontrole göre 0.75 g L^{-1} deltametrin ortamında 64.1 mm, 1.0 g L^{-1} deltametrin ortamında 73.0 mm ve 1.25 g L^{-1} deltametrin ortamında 76.4 mm'lik ciddi bir inhibisyon meydana gelmiştir. Kontrol bulblarının ortalama adventif kök sayısı 52.5±0.9 olarak sayılmıştır. Adventif kök sayısı, 0.75 g L^{-1} deltametrin dozundaki bulblarda ortalama 29.1±0.5, 1.0 g L^{-1} deltametrin dozundaki bulblarda ortalama 25.0±0.4 ve 1.25 g L^{-1} deltametrin dozundaki bulblarda ortalama 11.0±0.2 olarak sayılmıştır. 1.25 g L^{-1} en yüksek deltametrin dozunda, adventif kök sayısı kontrole kıyasla 3.8 kat azalmıştır. Kontrol bulbların ortalama taze ağırlığı 16.6±0.6 g iken, 0.75, 1.0 ve 1.25 g L^{-1} deltametrine maruz kalan bulbların ortalama taze ağırlıkları sırasıyla 13.1±0.5, 9.7±0.2 ve 6.9±0.1 g olarak tartılmıştır. İncelenen tüm morfo-fizyolojik özelliklerdeki azalmalar $p<0.05$ düzeyinde anlamlı bulunmuştur (Şekil 1).

Deltametrin insektisitinin toksik etkilerinin incelendiği sınırlı sayıdaki çalışmalarda, bu insektisitin uygulanan konsantrasyonuna ve uygulama süresine bağlı olarak çimlenme yüzdesi, kök uzaması ve taze ağırlık gibi morfo-fizyolojik özellikleri azalttığı yönünde sonuçlara ulaşılmıştır. Örneğin, Yekeen ve Adeboye (2013), 48 sa boyunca 1, 5, 10, 20 ve 40 ppm deltametrin konsantrasyonuna maruz bırakılan *Allium cepa* L. bulblarının kök uzamasında konsantrasyon artışına paralel olarak belirgin bir inhibisyonun meydana geldiğini rapor etmişlerdir. Benzer şekilde, Karaismailoğlu ve İnceer (2017), farklı doz (0.25, 0.5, 1 ve 2.0 ppm) ve sürelerde (24, 36 ve 48 saat) deltametrinle muamele edilen *Helianthus annuus* L. (ayçiçeği)'un kök uzamasında doz ve süreyle ilişkili olarak ciddi bir azalmanın meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Yine Kutluer vd. (2019), deltametrin insektisitinin 5, 10 ve 20 mg L^{-1} konsantrasyonları ile 72 sa muamele edilen *A. cepa* bulblarının çimlenme yüzdeleri, kök uzunlukları ve taze ağırlıklarının çalışılan tüm konsantrasyonlarda kontro-



Şekil 1. Soğanın morfo-fizyolojik (çimlenme yüzdesi, kök uzunluğu, adventif kök sayısı ve taze ağırlık) özelliklerinde deltametrinin neden olduğu bozulmalar. 20 adet (n=20) soğan bulbu incelenmiş ve deneyler üç kez tekrarlanmıştır. Grafiklerdeki veriler ortalama ± standart sapmadır. a, b, c ve d harflerinden oluşan dört farklı harf, istatistiksel süreçte bu dört grup arasındaki anlamlı farklılıkları ($p<0.05$) göstermektedir.

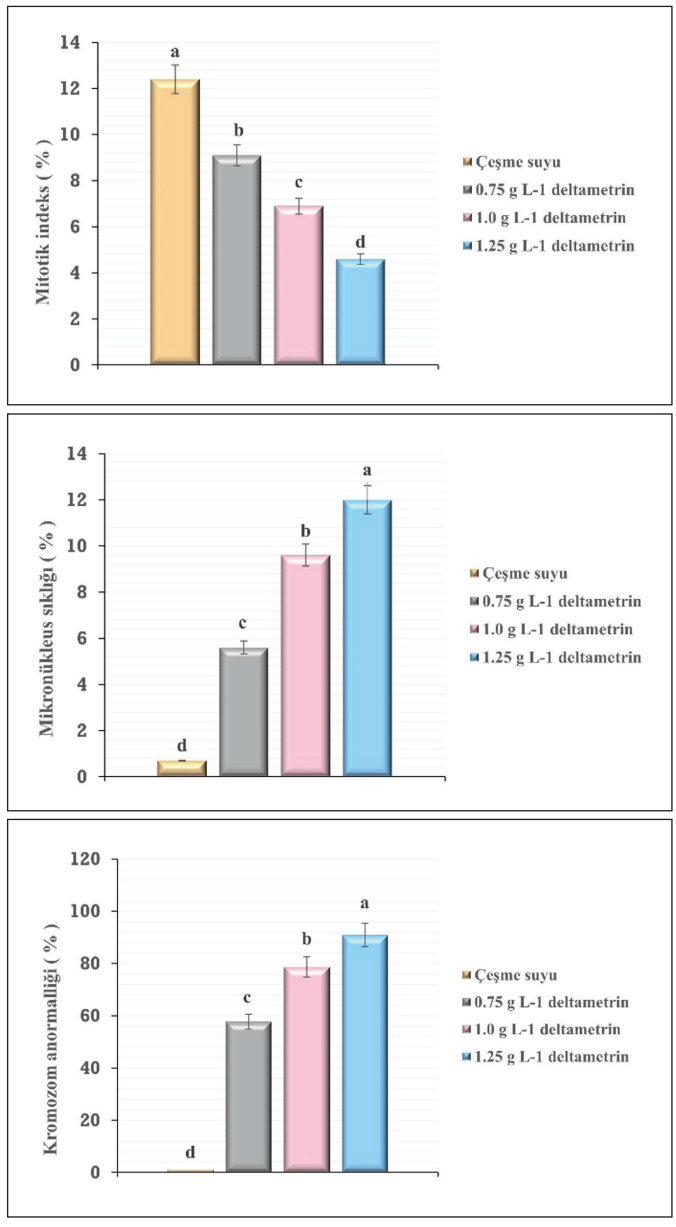
le kıyasla önemli derecede azaldığını belirlemişlerdir. Bütün bu bulgular, mevcut çalışma bulgularımızla benzerdir. Bununla birlikte, mevcut araştırmamız deltametrinin soğan bitkisinin adventif kök sayısı üzerindeki etkisini araştıran ilk çalışmadır.

İzin verilen yasal sınırın üzerinde pestisit kullanımı özellikle bitkilerin farklı yaşam evrelerinde ciddi zararlara neden olmaktadır. Pestisitlerin bitkilere olan zararlı etkileri, bazı bitkilerde çimlenme ve kök büyüme testleri ile makroskobik olarak, kromozom anormalliklerinin tipleri ve sıklıkları da dahil olmak üzere sitogenetik testler ile mikroskobik olarak izlenebilir (Smaka-Kincl vd., 1996; Kamal vd., 2020). Deltametrin pestisitine maruziyetin ardından soğan bitkisinin morfo-fizyolojik özelliklerinde meydana gelen azalmaların pek çok nedeni olabilir. Çimlenme için gerekli depo maddelerinin inhibisyonu, hidrolitik enzimlerin baskılanması ve bozulmuş protein metabolizması gibi faktörler, çimlenmede gözlenen azalmanın sebebi olabilir (Dhungana vd., 2016). Kökler tarafından yeterli su ve mineral madde alınımı ve taşınımının gerçekleştirilememesi, fidelerin taze ağırlık ve su içeriğindeki azalmanın nedeni olabilir. Dolayısıyla, yetersiz su ve mineral madde alınımı kök hücrelerinde yapısal bozukluklara yol açabilir, mitoz bölünmeyi olumsuz etkileyebilir ve böylece kök uzunluğu ve kökçük sayısındaki azalmalar meydana gelebilir (Aktar vd., 2009; Begum vd., 2019). Ayrıca, deltametrinin lipofilik özelliği sayesinde hızlı bir şekilde hücre içerisine girebilmesi de çimlenme ve büyümenin baskılanmasında önemli bir rol oynayabilir. Zira, deltametrin bu özelliği sayesinde zar proteinlerinde, hücre içi membran sistemlerinde ve DNA molekülünde hasarlara neden olmaktadır (Cabral vd., 1990; Michelangeli vd., 1990; Chargui vd., 2012).

3.2. Deltametrin Maruziyetinin Sitogenetik Etkileri

Mutajenik potansiyele sahip birçok kimyasal, genetik materyalde zararlı ve kalıtsal değişimlere yol açabilmeleri nedeniyle test edilmektedir (Nwangburuka & Oyelana, 2011; Panneerselvam vd., 2012). Deltametrinin ticari formu olan Deltharin 2.5 EC, tarımda yaygın olarak kullanılan ve biyolojik sistemler üzerinde toksik etkilere yol açabildiği bildirilen bir insektisit olması nedeniyle bu çalışmada deneysel olarak incelenmiştir. Bitki test sistemlerinde deltametrinin morfo-fizyolojik, sitogenetik ve anatomik özellikler üzerindeki etkilerini birlikte ele alan çalışmalar sınırlıdır. Bu çalışmanın amacı, ticari insektisit deltametrinin doza bağlı akut toksik etkilerini, *Allium cepa* L. üzerinde Allium test modeli kullanılarak kapsamlı biçimde değerlendirmektir.

Mİ, hücre bölünme sıklığının tahmin edilmesini sağlayan ve toksik kimyasalların takibi için sıklıkla kullanılan bir parametredir (Linnainmaa vd., 1978; Marcano vd., 2004). Mİ, kontrole kıyasla uygulanan tüm insektisit konsantrasyonlarında belirgin şekilde azalmıştır. Mİ yüzdesi, kontrol bulblarının kök hücrelerinde %12.4±1.5 iken, 0.75, 1.0 ve 1.25 g L^{-1} deltametrin uygulanan bulblarının kök hücrelerinde sırasıyla %9.1±1.0, %6.9±0.7 ve %4.6±0.3'ya düşmüştür. Görüldüğü gibi kontrol grubuyla karşılaştırıldığında, Mİ uygulama gruplarında sırasıyla %27, %44 ve %63 oranında azalmıştır (Şekil 2). Deltametrin insektisitinin Mİ üzerindeki benzer etkileri, birçok araştırmacı tarafından *Allium cepa* L. (Chauhan vd., 1986; Yekeen & Adeboye, 2013; Kutluer vd., 2019), *Allium sativum* L. (Saxena vd. 2009) ve *Helianthus annuus* L. (Karaismailoğlu & İnceer, 2017)'da da gözlemlenmiştir. Deltametrinin kullanılan bütün konsantrasyonlarında Mİ'yi anlamlı derecede düşürmüş olması güçlü sitotoksik potansiyelini göstermektedir. Mİ'deki azalma, hücre döngüsünün G_1 fazının baskılanmasından (Shcneiderman vd., 1971), hücre döngüsünün S fazında DNA sentezinin inhibisyonundan (Van't Hof, 1968) veya hücre döngüsünün G_2 fazındaki bir bloke sonucu hücrenin mitoza girmesinin engellenmesinden (Sudhakar vd., 2001) kaynaklanabilir. Bununla birlikte, pestisitlerin etkisi sonucu oluşan metabolik hasarlar hücre bölünmesinin inhibisyonuna sebep olabilir, bu da RNA, DNA, protein ve enerji sentezini etkileyebilir (El-Ghamery vd., 2000; Adesuyi vd., 2018). Rank ve Nielsen (1997), toksisite analizi için kullanılan en yüksek konsantrasyonun LD_{50} değerinin altında olması durumunda, Mİ'nin kontrolün %50'sinin altına düşmeyeceğini ileri sürmüşlerdir. Mevcut çalışmada, kontrolle karşılaştırıldığında 1.25 g L^{-1} deltametrin konsantrasyonda Mİ'deki azalma yüzdesi yaklaşık %63 olmuştur. Bununla birlikte, 0.75 ve 1.0 g L^{-1} (LD_{50} değeri) deltametrin konsantrasyonunda Mİ'deki azalma yüzdesi sırasıyla %27 ve %44 olmuş ve kontrolün %50'sinin altına düşmemiştir (Şekil 2).



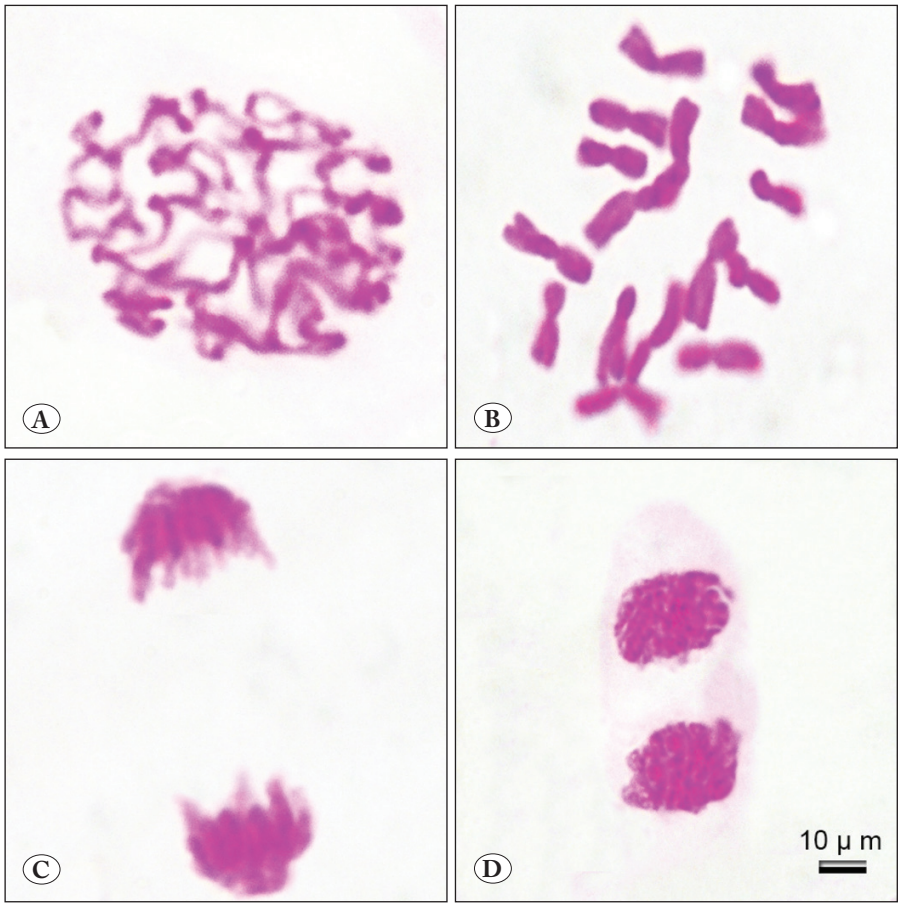
Şekil 2. Soğan kök ucu hücrelerinde deltametrinin neden olduğu sitogenetik (mitotik indeks, mikronükleus sıklığı ve kromozomal anormallikler) özelliklerdeki bozulmalar. Grafiklerdeki veriler ortalama ± standart sapmadır. a, b, c ve d harflerinden oluşan dört farklı harf, istatistiksel süreçte bu dört grup arasındaki anlamlı farklılıkları ($p<0.05$) göstermektedir.

MN ve KA testleri, kimyasalların genotoksisite potansiyelinin belirlenmesinde önemli bir role sahiptir. MN oluşum sıklığı ve KA yüzdesi, kontrolle karşılaştırıldığında artan deltametrin konsantrasyonlarıyla kademeli olarak artmıştır. Bu bulgu, uygulanan deltametrinin genotoksisitesinin konsantrasyonuna bağlı olduğunu ileri süren önceki çalışmalarla (Saxena vd., 2009; Yekeen & Adeboye, 2013; Karaismailoğlu & İnceer, 2017; Kutluer vd., 2019) uyumludur. Kontrol bulblarının kök meristem hücrelerinde %0.7±0.2 oranında düşük bir MN oluşum sıklığı gözlenirken, farklı deltametrin konsantrasyonlarına (0.75, 1.0 ve 1.25 g L^{-1}) maruz bırakılan bubların kök meristem hücrelerinde sırasıyla %5.6±0.6, %9.6±0.9 ve %12.0±1.3 oranında MN sıklığı belirlenmiştir. Kontrole kıyasla, en yüksek deltametrin konsantrasyonu olan 1.25 g L^{-1}'de MN sıklığı 17.1 kat artmıştır. Ayrıca, mikroskobik incelemeler sonucunda en düşük KA yüzdesi kontrol bulblarının kök hücrelerinde %0.9±0.5 olarak bulunmuştur. Bu anormallik yüzdesi, 0.75 g L^{-1} deltametrin

ortamındaki bulblarda %57.8±1.1, 1.0 g L^{-1} deltametrin ortamındaki bulblarda 78.6±1.8 ve 1.25 g L^{-1} deltametrin ortamındaki bulblarda 90.9±2.5 olarak hesaplanmıştır. Özellikle, 1.25 g L^{-1} deltametrin konsantrasyonunda KA yüzdesi kontrole kıyasla 101 kat artmıştır (Şekil 2).

Normal mitotik evreler Şekil 3'te, deltametrin uygulamasına bağlı mitotik ve kromozomal anormallikler ise Şekil 4'te verilmiştir. Soğan kök ucu meristem hücrelerinde kromozom organizasyonundaki değişiklikler incelenmiş ve en yaygın anormallikler; mikronükleus oluşumu (Şekil 4a), triloblu çekirdekte tomurcuklanma (Şekil 4b), biloblu çekirdekler (Şekil 4c), kromozomal aglütinasyon (Şekil 4d), c-mitoz (Şekil 4e), yapışkan kromozomlar (Şekil 4f), anafazda kromatinin eşit olmayan dağılımı (Şekil 4g), anafazda kromozom fragmentasyonu (Şekil 4h), anafazda kromozom köprüleri ve halka kromozom (Şekil 4ı), telofazda kutup kayması (Şekil 4j), telofazda kromozom fragmentasyonu ile geri kalmış kromozomlar (Şekil 4k) ve telofazda vagrant kromozom (Şekil 4l) olarak kaydedilmiştir.

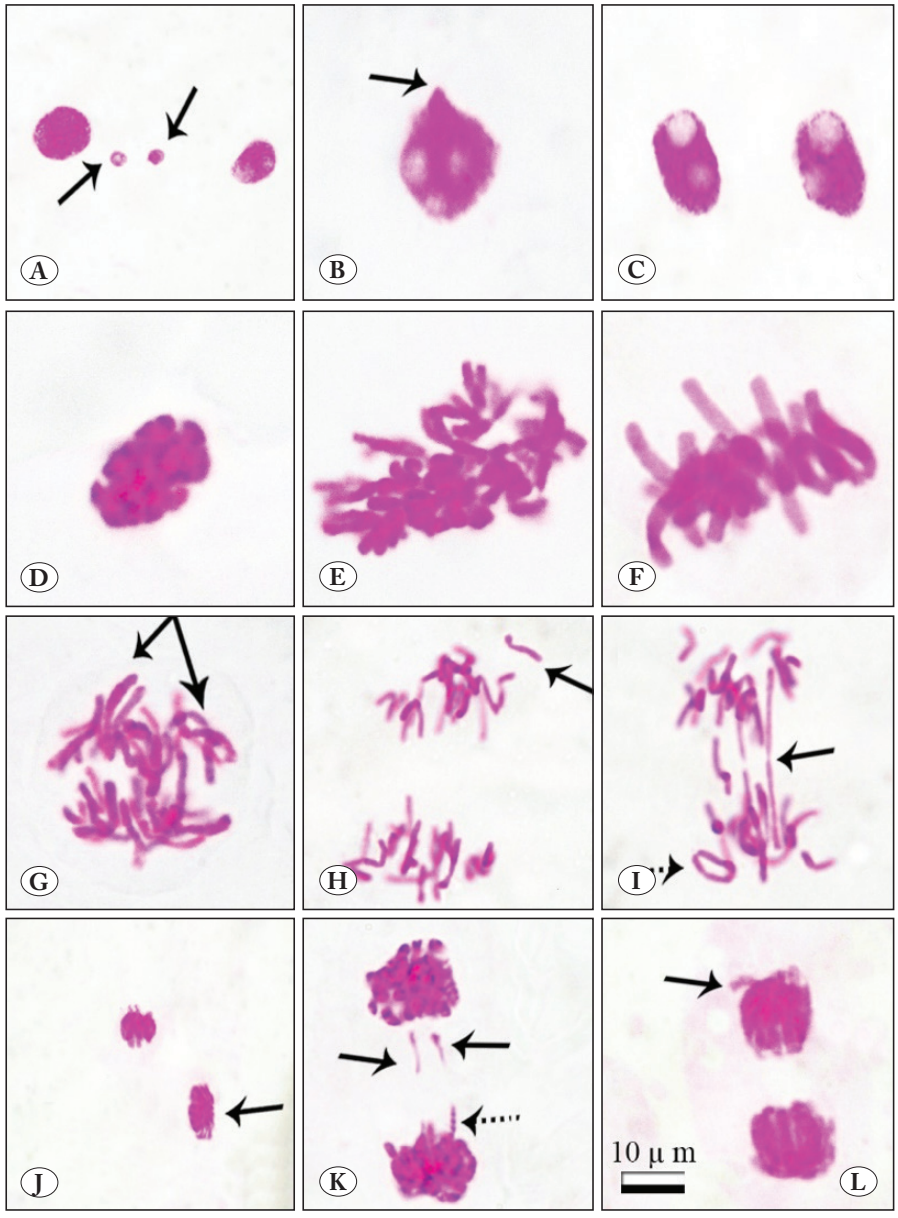
Bu kromozom anormalliklerin pekçoğu, *A. sativum* (Saxena vd. 2009), *H. annuus* (Karaismailoğlu & İnceer, 2017) ve *A. cepa* (Kutluer vd., 2019) kök hücrelerine farklı konsantrasyonlarda deltametrin uygulandıktan sonra da bazı araştırmacılar tarafından gözlenmiştir. MN, hücre döngüsü boyunca tüm kromozomların veya asentrik parçaların ana çekirdekle birleşememesi sonucunda oluşmaktadır (Fenech & Crott, 2002). Klastojenik etkiye sahip genotoksik kimyasallar MN oluşumunu artırmaktadır (Fernandes vd. 2006). Bu bilgi, artan MN sıklığının, gözlemlenen bölünen hücrelerdeki KA'ların proliferasyonuna yol açtığını ortaya koymaktadır (Fiskesjo, 1997). Hücre döngüsünün S fazı sırasında DNA sentezinin bloke edilmesi, çekirdekte tomurcuk oluşumuna yol açmakta ve bu tomurcuklu çekirdekler MN'lara oldukça benzemektedir (Fenech & Crott, 2002; Sutan vd., 2014). Uygulanan kimyasalın tübülin-SH grubuyla etkileşerek disülfit bağlarını bozması, güçlü mitotik iğ ipliğinin hasar görmesine ve bunun sonucunda c-mitoza neden olmaktadır (Kuriyama & Sakai, 1974). Kromatid tipi bir anormallik olan kromozom yapışkanlığı (Klasterska vd., 1976), kromozomlar arasında subkromatik bağlantıları sağlayan kromatin ipliklerinin bozulmasının (Mc-Gill vd., 1974) veya periferal proteinlerin etkilenmesinin (Datta vd., 2018) bir



Şekil 3. Soğan kök meristem hücrelerinde normal mitoz evreleri. **a.** profaz, **b.** metafaz (2n=16 kromozom), **c.** anafaz, **d.** telofaz, ölçek çubuğu: 10 µm.

sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Kromozom yapışkanlığı, geri dönüşümsüz olup sonuçta hücre ölümüne yol açmaktadır (Panda & Sahu, 1985). Kimyasal madde uygulaması ile oluşan anafazda kromatinin eşit olmayan dağılımı, iğ ipliği proteinlerindeki bozulmalarla ilişkilendirilmektedir (Amer ve Ali 1974).

Bu çalışmada, ayrıca deltametrin insektisiti, *A. cepa* kök meristem hücrelerinde hem anöjenik (iğ ipliği üzerinde) hem de klastojenik (DNA üzerinde) etkiye sahip olduğuna işaret eden, geri kalmış kromozomlar, kutup kaymaları, kromozom köprüleri ve kromozom fragmentasyonu gibi anormalliklere de yol açmıştır. Hücredeki iğ iplikleri kısmen etkilenmişse, geri kalmış kromozomlar ortaya çıkar ve bu durum MN oluşumuna sebep olur. Dolayısıyla, MN'lerle birlikte hücreden genetik materyal kaybı gerçekleşir (Panda & Sahu, 1985). Fragmentasyonlar ise kromozomlarda ortaya çıkan kromatid veya kromozom kırıklarının yapısal sonuçlarıdır (Ahmad & Yasmin, 1992). Anafazdaki kromozom köprüleri, kromozomların metafaz evresindeki yapışkanlığından veya kromozomların kırılması ve yeniden birleşmesinden kaynaklanmaktadır (El-Ghamery vd., 2000; Özkara vd., 2015). Telofaz safhasında gözlenen kutup kaymaları, iğ bozukluklarından (Kalcheva vd., 2009), vagrant kromozomlar ise eşit olmayan kromozomlara sahip kardeş hücrelerdeki düzensiz şekilli veya eşit olmayan boyuttaki çekirdeklerden türemişlerdir (El-Ghamery vd., 2003).

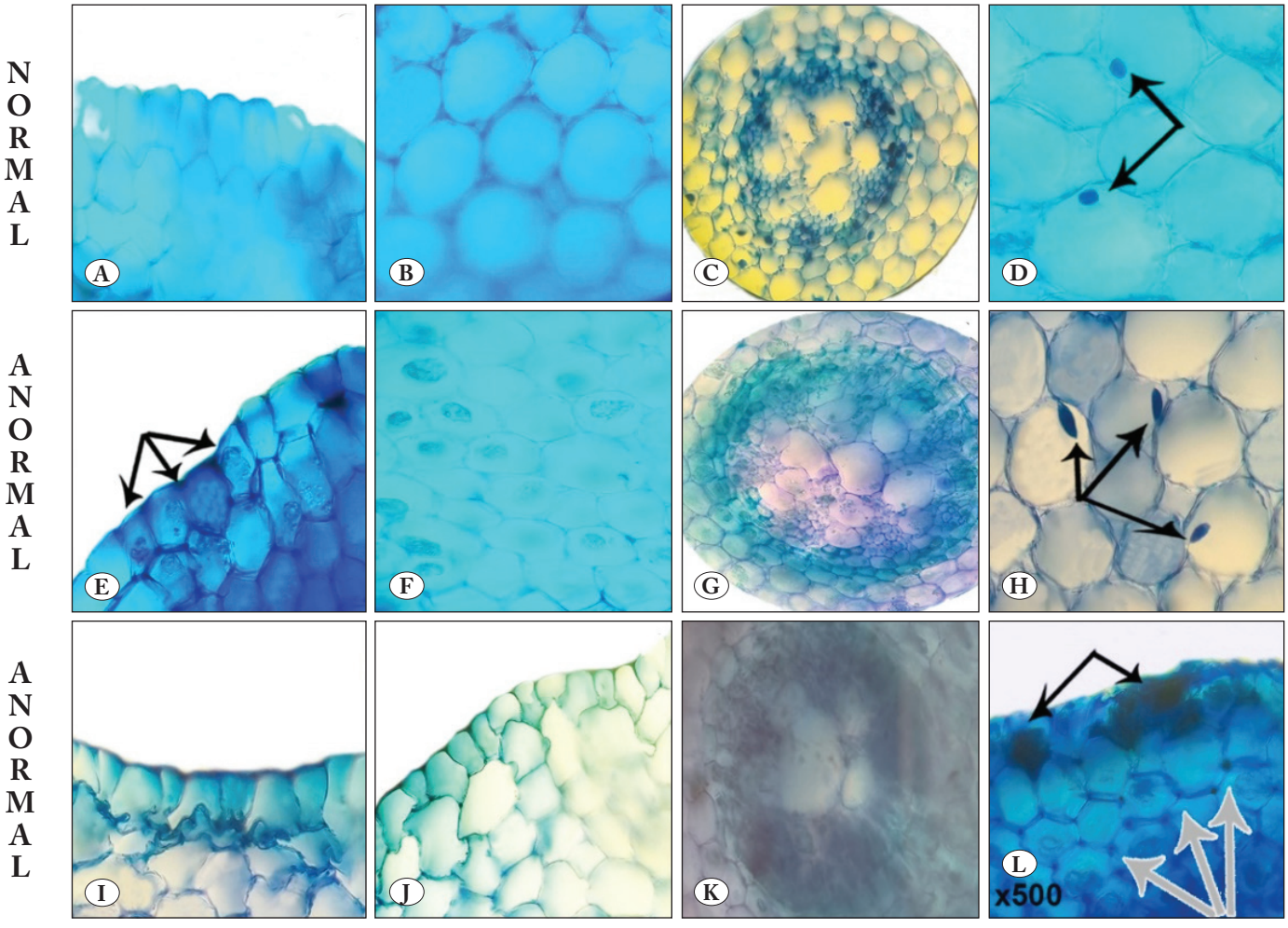


Şekil 4. Soğan kök meristem hücrelerinde deltametrin uygulamasına bağlı olarak gözlenen mitotik ve kromozomal anormallikler. **a.** mikronükleus oluşumları (oklar), **b.** triloblu çekirdekte tomurcuklanma (ok), **c.** biloblu çekirdekler, **d.** kromozomal aglütinasyon, **e.** c-mitoz, **f.** yapışkan kromozomlar, **g.** anafazda kromatinin eşit olmayan dağılımı (oklar), **h.** anafazda kromozom fragmentasyonu (ok), **ı.** anafazda kromozom köprüleri (ok) ve halka kromozom (kesikli ok), **j.** telofazda kutup kayması (ok), **k.** telofazda kromozom fragmentasyonları (oklar) ve geri kalmış kromozomlar (kesikli ok), **l.** telofazda vagrant kromozom (ok), ölçek çubuğu: 10 µm.

3.3. Deltametrin Maruziyetinin Anatomik Etkileri

Karasal bitkilerin toprak içerisinde gelişen organı olan köklerin, bitkiyi toprağa bağlamak ve desteklemek, bitki için gerekli su ve suda erimiş besin maddelerini almak ve depolamak ve ayrıca bazı hormon ve organik bileşikleri depolamak ve salgılamak gibi temel görevleri vardır. Toprakla temas halinde olan kökler, çeşitli çevresel streslere ve toksik kimyasallara maruz kalabilmekte ve bunun sonucunda anatomik yapısında ciddi hasarlar meydana gelmektedir (Çavuşoğlu & Çavuşoğlu, 2023).

Üç farklı deltametrin konsantrasyonunun *A. cepa* bitkisinin kök anatomik yapısında neden olduğu hasarlara ait mikroskop görüntüleri Şekil 5'te sunulmuştur. Kontrol bulblarına ait kök enine kesitlerinin ışık mikroskobu ile incelenmesi neticesinde herhangi bir anatomik hasar gözlenmemiştir (Şekil 5a-d). Fakat, 0.75, 1.0 ve 1.25 g L^{-1} deltametrin uygulanan bulblarının kök enine kesitlerinde, insektisit dozundaki artışla ilişkili olarak ciddi anatomik hasarlar gözlenmiştir (Şekil 5e-l). Uygulama grubu bulblarına ait kök enine kesitleri dikkatli bir şekilde taranmış ve en yaygın 9 anormallik tipi: epidermis hücrelerinde hücresel madde birikimi (Şekil 5e), korteks hücrelerinde hücresel madde birikimi (Şekil 5f), iletim dokusunda madde birikimi (Şekil 5g), çekirdek deformasyonu (Şekil 5h), epidermis hücre deformasyonu (Şekil 5ı), korteks hücre deformasyonu (Şekil 5j), iletim



Şekil 5. Deltametrin insektisitinin soğan köklerinin anatomik yapısı üzerindeki etkisi. Çeşme suyu ile muamele edilen kontrol grubu bulblarının kök enine kesitlerinde; **a.** epidermis hücrelerinin normal görünümü, **b.** korteks hücrelerinin normal görünümü, **c.** iletim dokusunun normal görünümü, **d.** hücre çekirdeklerinin normal görünümü. Deltametrin ile muamele edilen uygulama grubu bulblarının kök enine kesitlerinde; **e**. epidermis hücrelerinde hücresel madde birikimi (oklar), **f.** korteks hücrelerinde hücresel madde birikimi, **g.** iletim dokusunda madde birikimi, **h.** çekirdek deformasyonu (oklar), **ı.** epidermis hücre deformasyonu, **j.** korteks hücre deformasyonu, **k.** iletim dokusunda yapısal bütünlüğün bozulması, **l.** nekroz (oklar) ve korteks hücre duvarında kalınlaşma (beyaz oklar).

dokusunda yapısal bütünlüğün bozulması (Şekil 5k), nekroz ve korteks hücre duvarında kalınlaşma (Şekil 5l) olarak kaydedilmiştir. Detaylı literatür taraması sonucunda, bitki test sistemlerinde deltametrin insektisitinin kök anatomik yapısı üzerindeki rolüne dair sadece Kutluer vd. (2019)'nin yaptığı çalışmaya rastlanmıştır. Söz konusu çalışmada, Kutluer vd. (2019), 72 s boyunca 5, 10 ve 20 mg L^{-1} deltametrin konsantrasyonuna maruz bırakılan *A. cepa* bulblarının kök anatomik yapısında çekirdek deformasyonu, nekroz, iletim dokuda bazı maddelerin birikimi, korteks hücre çeperinde kalınlaşma, iletim dokusunda yapısal bütünlüğün bozulması ve hücre deformasyonu hasarlarını gözlemlemiş ve hasarların şiddetinin deltametrin dozuna bağlı olarak arttığını tespit etmişlerdir. Bununla birlikte, tiyametoksam (Çavuşoğlu vd., 2012), permetrin (Himtaş vd., 2024), triflumuran (Bıyıksız vd., 2025), ometoat (Karagöl vd., 2025) ve esfenvalerat (Sarsar vd., 2025) gibi diğer bazı insektisitlerin özellikle test materyalimiz olan *A. cepa*'nın kök anatomik yapısı üzerindeki etkilerini ortaya koyan çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmalarda kullanılan söz konusu insektisitlerin neden olduğu anatomik hasarların pekçoğu, deltametrin insektisiti ile yaptığımız mevcut çalışmamızda da gözlemlenmiştir.

Deltametrin maruziyeti sonucunda anatomik yapıda gözlemlenen epidermis (Şekil 5ı) ve korteks (Şekil 5j) hücre deformasyonları, söz konusu hücrelerin sayısındaki artış ve bu artışla ilişkili olarak komşu hücrelerin birbirini sıkıştırması sonucu ortaya çıkan iç basınçtan kaynaklanabilir. Aynı zamanda bu deformasyonlar, deltametrinin epidermis ve korteks hücrelerinin zarlarında lipit peroksidasyonunu tetiklemesi sonucunda zar yapısının bozulmasından da kaynaklanabilir. Ayrıca, epidermis ve korteks hücrelerinde iç basıncın artması, bu hücrelerin çekirdeklerinde deformasyona (Şekil 5h) da sebep olabilir. Bununla birlikte, DNA çift sarmal yapısının, DNA hacminin ve nükleer protein konsantrasyonunun bozulması da çekirdeklerin hacim ve şeklinde değişikliklere yol açabilir (Dauer & Worman, 2009). Deltametrin maruziyetinin ardından meydana gelen korteks hücrelerinde duvar kalınlaşması (Şekil 5l) ile epidermis (Şekil 5e), korteks (Şekil 5f) ve iletim (Şekil 5g) dokusu hücrelerinde belirli kimyasalların birikmesi, insektisit maruziyetine karşı geliştirilen savunma adaptasyonlardır. Lignifikasyon ve süberizasyon sonucunda yapısal bir savunma mekanizması olan hücre duvarı kalınlaşması meydana gelmekte (Belete, 2018) ve bu da çeşitli kimyasal ajanlara karşı bir bariyer oluşturup merkezi silindire akışı azaltmakta (Singh vd., 2015) ve böylece toksik kimyasal ajanların bitkideki taşınımı sınırlanmaktadır. Dahası, bitkilerin taşıyıcı proteinleri yardımıyla toksik kimyasalları belirli dokularda biriktirerek diğer dokulara geçişini sınırladıkları da bilinmektedir (Mithöfer & Maffei, 2017). Yaptığımız mikroskobik incelemeler sonucunda, epidermis ve korteks dokusundaki hücresel madde birikiminin iletim dokusundakine göre oldukça fazla olduğu tespit edilmiştir. Diğer yandan, bitkilerin yüksek konsantrasyonda toksik kimyasallara maruz kalması, kök anatomik yapılarında değişimden çok, hasara neden olmaktadır. Mevcut çalışmamızda, epidermis ve korteks hücrelerinde gözlemlenen kahverengi/siyah renkli ve geri dönüşümsüz nekrozlar (Şekil 5l) ile hücre deformasyonlarının (Şekil 5ı, j) en yüksek deltametrin dozunda (1.25 g L^{-1}) daha fazla olması bu görüşümüzü desteklemektedir.

4. Sonuçlar

Mevcut araştırma, küresel bir gıda kaynağı ve ökaryotik bir model organizma olan soğanda (*Allium cepa* L.) dibromopiretroid bir insektisit olan deltametrinin çok yönlü akut toksik etkilerini ayrıntılı bir şekilde incelemiştir. Literatürde, *A. cepa* bitkisinin çeşitli morfo-fizyolojik, anatomik ve sitogenetik özellikleri üzerinde deltametrin insektisitinin doza bağlı akut toksisitesini ortaya koyan sınırlı sayıda araştırma mevcuttur. Bu araştırmadan elde edilen bulgular, deltametrinin kök uçlarında hücre çoğalmasını engellediğini, çeşitli kromozomal ve anatomik hasar oluşumlarını desteklediğini, ayrıca çimlenme ve büyümeyle ilgili morfo-fizyolojik özellikleri de azalttığını göstermiştir. Bu sebeple, tarımsal mücadelede bu insektisitin çifçiler tarafından mümkün olduğunca az tercih edilmesi, izin verilen yasal sınırın üzerinde kullanılmaması ve kullanım dönemleri, süreleri ve yönergelerine harfiyen uyulmasının sağlanması gerekmektedir. Aksi taktirde deltametrin hedefi dışındaki canlılara ve çevreye nüfuz ederek ekosistem istikrarını ve insan sağlığını olumsuz etkileyebilecektir. Diğer yandan, bu çalışma hem literatüre önemli bir katkı sağlayacak hem de gelecekte yapılacak toksisite testleri için bir referans görevi görecektir.

Yazar katkısı: Dilek Çavuşoğlu ve Kürşat Çavuşoğlu çalışmayı planlamış ve tasarlamış, çalışma hakkında verileri toplamış ve analiz etmiş, çalışmanın analizlerini yaparak makaleyi yazmıştır.

Etik kurul onayı: Etik kurul izni gerektirmeyen bir çalışma olup, herhangi bir kurumdan etik kurul izni alınmamıştır.

Kaynaklar

Adesuyi, A. A., Njoku, K. L., Ogunyebi, A. L., Dada, E. O., Adedokun, A. H., Jolaoso, A. O., & Akinola, M. O. (2018). Evaluation of the cytogenotoxic effects of emulsifiable concentrate form of amitraz pesticide on *Allium cepa* L. J. *Applied Sci. Env. Manag., 22(11)*, 1841-1847. https://doi.org/10.4314/jasem.v22i11.20

Ahmad, S., & Yasmin R. (1992). Effects of methyl paration and tri-miltox on the mitosis of *Allium cepa*. *Cytologia., 57*, 155-160.

Aktar, W., Sengupta, D., & Chowdhury, A. (2009). Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards. *Interdiscip. Toxicol., 2(1),* 1-12. https://doi.org/10.2478/v10102-009-0001-7

Amer, S. M., & Ali, E. M. (1974). Cytological effects of pesticides-effects of some herbicides on *Vicia faba*. *Cytologia., 39*, 633-643.

Barberio, A., Voltolini, J. C., & Mello, M. L. S. (2011). Standardization of bulb and root sample sizes for the *Allium cepa* test. *Ecotoxicol., 20(4)*, 927-935. https://doi.org/10.1007/s10646-011-0602-8

Barlow, S. M., Sullivan, F. M., & Lines, J. (2001). Risk assessment of the use of deltametrin on bednets for the prevention of malaria. *Food Chem. Toxicol., 39(5)*, 407-422. https://doi.org/10.1016/s0278-6915(00)00152-6

Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ashraf, M., Ahmed, N., & Zhang, L. (2019). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: implications in abiotic stress tolerance. *Front. Plant. Sci.*, 10, 1068. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068

Belete, T. (2018). Defense mechanisms of plants to insect pests: from morphological to biochemical approach. *Trends Tech. Sci. Res., 2*, 30-38. https://doi.org/1019081/TTSR.2018.02.555584

Bıyıksız, G., Kalefetoğlu Macar, T., Çavuşoğlu, K., & Yalçın, E. (2025). A study investigating the multifaceted toxicity induced by triflumuron insecticide in *Allium cepa* L. *Sci. Rep., 15*, 24839. https://doi.org/10.1038/s41598-025-10777-6

Bilal, M., Iqbal, H. M., & Barcelo, D. (2019). Persistence of pesticides-based contaminants in the environment and their effective degradation using laccaseassisted biocatalytic systems. *Sci. Total Environ., 10*, 695, 133896. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133896

Bolle, P., Mastrangelo, S., Tucci, P., & Evandri, M. G. (2004). Clastogenicity of atrazine assessed with the *Allium cepa* test. *Environ. Mol. Mutagen., 43(2)*, 137-141. https://doi.org/10.1002/em.20007

Bonciu, E., Firbas, P., Fontanetti, C. S., Wusheng, J., Karaismailoğlu, M. C., Liu, D., & Schiff, S. (2018). An evaluation for the standardization of the *Allium cepa* test as cytotoxicity and genotoxicity assay. *Caryologia., 71(3)*, 191-209. https://doi.org/10.1080/00087114.2018.1503496

Bradbury, S. P., & Coats, J. R. (1989). Toxicokinetics and toxicodynamics of pyrethroid insecticides in fish. Environ. Toxicol. Chem., 8: 373-380. https://doi.org/10.1002/etc.5620080503

Cabral, J. R. P., Galendo, D., Laval, M., & Lyandrat, N. (1990). Carcinogenicity studies with deltamethrin in mice and rats. *Cancer Lett., 49(2)*, 147-152. https://doi.org/10.1016/0304-3835(90)90151-m

Chaparro, T. R., Botta, C. M., & Pires, E. C. (2010). Biodegradability and toxicity assessment of bleach plant effluents treated anaerobically. *Water Sci. Technol., 62*, 1312-1319. https://doi.org/10.2166/wst.2010.944

Chargui, I., Grissa, I., Bensassi, F., Hrira, M. Y., Haouem, S., Haouas, Z., & Bencheikh, H. (2012). Oxidative stress, biochemical and histopathological alterations in the liver and kidney of female rats exposed to low doses of deltamethrin (DM): a molecular assessment. *Biomed. Environ. Sci., 25(6)*, 672-683. https://doi.org/10.3967/0895-3988.2012.06.009

Chauhan, L. K. S., Dikshith T. S. S., & Sundararaman, V. (1986). Effect of deltamethrin on plant cells I. cytological effects on the root meristems of *Allium cepa*. *Mutat. Res./Genet. Toxicol., 171(1)*, 25-30. https://doi.org/10.1016/0165-1218(86)90005-4

Chauhan, L. K. S., Saxena, P. N., & Gupta, S. K. (1999). Cytogenetic effects of cypermethrin and fenvalerate on the root meristem cells of *Allium cepa*. *Environ. Exp. Bot., 42(3)*, 181-189. https://doi.org/10.1016/S0098-8472(99)00033-7

Chinn, K., & Narahashi, T. (1986). Stabilization of sodium channel states by deltametrin in mouse neuroblastoma cells. *J. Physiol., 380(1)*, 191-207. https://doi.org/10.1113/jphysiol.1986.sp016280

Çavuşoğlu, K., & Çavuşoğlu, D. (2023). Investigation of the potential role of fusicoccin, a fungal phytotoxin, in mitigating salt stress in onion roots. *Sci. Rep., 13*, 9801. https://doi.org/10.1038/s41598-023-36917-4

Çavuşoğlu, K., Yalçın, E., Türkmen, Z., Yapar, K., & Sağır, S. (2012). Physiological, anatomical, biochemical and cytogenetic effects of thiamethoxam treatment on *Allium cepa* (Amaryllidaceae) *L. Environ. Toxicol., 27(11),* 635-643. https://doi.org/10.1002/tox.20680

Damalas, C. A., & Eleftherohorinos, I. G. (2011). Pesticide exposure, safety issues, and risk assessment indicators. *Int. J. Environ. Res. Public Health., 8(5)*, 1402-1419. https://doi.org/10.3390/ijerph8051402

Datta, S., Singh, J., Singh, J., Singh, S., & Singh S. (2018). Assessment of genotoxic effects of pesticide and vermicompost treated soil with *Allium cepa* test. *Sustain. Environ. Res., 28(4)*, 171-178. https://doi.org/10.1016/j.serj.2018.01.005

Dauer, W. T., & Worman, H. J. (2009). The nuclear envelope as a signaling node in development and disease. *Dev. Cell., 17(5)*, 626-638. https://doi.org/10.1016/j.devcel.2009.10.016

Dhungana, S. K., Kim, I. D., Kwak, H. S., & Shin, DH. (2016). Unraveling the effect of structurally different classes of insecticide on germination and early plant growth of soybean [*Glycine max* (L.) Merr]. *Pestic. Biochem. Physiol.,* 130, 39-43. https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2015.12.002

Doğaç, E., Kandemir, I., & Taşkın, V. (2015). Geographical distribution and frequencies of organophosphateresistant Ace alleles and morphometric variations in olive fruit fy populations. *Pest. Manag. Sci., 71(11)*, 1529-1539. https://doi.org/10.1002/ps.3958

El-Ghamery, A. A., El-Kholy, M. A., & Abou El-Yousser, M. A. (2003). Evaluation of cytological effects of Zn^{2+} in relation to germination and root growth of *Nigella sativa* L. and *Triticum aestivum* L. *Mutat. Res., 537(1)*, 29-41. https://doi.org/10.1016/s1383-5718(03)00052-4

El-Ghamery, A. A., El-Nahas, A. I., & Mansour, M.M. (2000). The action of atrazine herbicide as an inhibitor of cell division on chromosomes and nucleic acids content in root meristems of *Allium cepa* and *Vicia faba*. *Cytologia., 65(3)*, 277-287. https://doi.org/10.1508/cytologia.65.277

Fenech, M., Chang, W. P., Kirsch-Volders, M., Holland, N., Bonassi, S., & Zeiger, E. (2003). HUMN (human micronucleus) project: detailed description of the scoring criteria for the cytokinesis-block micronucleus assay using isolated human lymphocyte cultures. *Mutat. Res., 534(1-2)*, 65-75. https://doi.org/10.1016/s1383-5718(02)00249-8

Fenech, M., & Crott, J. W. (2002). Micronuclei, nucleoplasmic bridges and nuclear buds induced in folic acid deficient human lymphocytes-evidence for breakage-fusion-bridge cycles in the cytokinesis block micronucleus assay. *Mutat. Res., 504(1-2)*, 131-136. https://doi.org/10.1016/s0027-5107(02)00086-6

Fernandes, T. C. C., Mazzeo, D. E. C., & Marin-Morales, M. A. (2006). Mechanism of micronuclei formation in polyploidizated cells of *Allium cepa* exposed to trifluralin herbicide. *Pest. Biochem. Physiol., 88(3)*, 252-259. https://doi.org/10.1016/J.PESTBP.2006.12.003

Fiskesjo, G. (1997). Allium test for screening chemical evaluation of cytological parameters. Wang, W., Gorsuch, JW., Hughes, JS. [eds.], Plants for Environmental Studies New York. NY: CRC Lewis Publishers, pp. 307-333.

Glover-Amengor, M., & Tetteh, F. (2009). Effect of pesticide application rate on yield of vegetables and soil microbial communities. *West Afr. J. Appl. Ecol., 12*, 1-7. https://doi.org/10.4314/wajae.v12i1.45749

Gonzalez, A., Gonzalez-Murua, C., & Royuela, M. (1996). Influence of imazethapyr on Rhizobium growth and its symbiosis with pea (*Pisum sativum*). *Weed Sci., 44*, 31-37. https://doi.org/10.1017/S0043174500093516

Hatamleh, A. A., Danish, M., Al-Dosary, M. A., El-Zaidy, M., & Ali, S. (2022). Physiological and oxidative stress responses of *Solanum lycopersicum* (L.) (tomato) when exposed to different chemical pesticides. *RSC Adv., 12,* 7237-7252. https://doi.org/10.1039/D1RA09440H

Himtaş, D., Yalçın, E., Çavuşoğlu, K., & Acar, A. (2024). In-vivo and in-silico studies to identify toxicity mechanisms of permethrin with the toxicity-reducing role of ginger. Environ. *Sci. Pollut. Res., 31*, 9272-9287. https://doi.org/10.1007/s11356-023-31729-5

Kalcheva, V. P., Dragoeva, A. P., Kalchev, K. N., & Enchev, D. D. (2009). Cytotoxic and genotoxic effects of Br-containing oxaphosphole on *Allium cepa* L. root tip cells and mouse bone marrow cells. *Genet. Mol. Biol., 32,* 389-393. https://doi.org/10.1590/S1415-47572009000200028

Kamal, A., Ahmad, F., & Shafeeque, M. A. (2020). Toxicity of pesticides to plants and non-target organism: a comprehensive review. *Iran. J. Plant. Physiol.,* 10*(4)*, 3299-3313. https://doi.org/10.22034/ijpp.2020.1885628.1183

Karagöl, S., Macar, O., Çavuşoğlu, K., & Yalçın, E. (2025). Toxicological assessment of omethoate insecticide in *Allium cepa* L. *Sci. Rep., 15*, 18663. https://doi.org/10.1038/s41598-025-03923-7

Karaismailoğlu, M. C., & İnceer, H. (2017). Evaluation of potential genotoxic and cytotoxic effects of deltamethrin insecticide on somatic chromosomes of *Helianthus annuus* L. *Caryologia., 70(4)*, 295-301. https://doi.org/10.1080/00087114.2017.1339173

Kaya, E. (2005). Klorprifos ve deltametrinin kan ve beyin lipit peroksidasyon ve antioksidan enzim aktivitelerine etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, 69 s.

Khanna, N., & Sharma, S. (2013). *Allium cepa* root chromosomal aberration assay: a review. *Indian J. Pharm. Biol. Res., 1,* 105-119. https://doi.org/10.30750/ijpbr.1.3.15

Klasterska, I., Natarajan, A. T., & Ramel, C. (1976). An interpretation of the orgin of subchromatid aberrations of chromosome stickiness as a category of chromatid aberrations. *Hereditas., 83*, 153-162. https://doi.org/10.1111/j.1601-5223.1976.tb01581.x

Kumar, A., Sasmal, D., & Sharma, N. (2015). An insight into deltametrin induced apoptotic calcium, p53 and oxidative stress signalling pathways. Toxicol. *Environ. Health Sci., 7(1)*, 25-34. https://doi.org/10.1007/s13530-015-0217-1

Kuriyama, R., & Sakai, H. (1974). Roles of tubulin-bound guanosine triphosphate during microtubule assembly. *J. Biochem., 76*, 651-654.

Kutluer, F., Çavuşoğlu, K., & Yalçın, E. (2019). Deltametrin'in *Allium cepa* L.'daki fizyolojik, anatomik ve genotoksik etkilerinin araştırılması. *Düzce* Üniv. *Bilim ve Teknoloji Derg., 7(3)*, 961-972. https://doi.org/10.29130/dubited.457074

Leake, L. D., Buckley, D. S., Ford, M. G., & Salt, D. W. (1985). Comparative effects of pyrethroids on neurones of target and non-target organisms. *Neurotoxicology., 6(2)*, 99-116. PMID: 4022454

Leme, D. M., & Marin-Morales, M. A. (2009). *Allium cepa* test in environmental monitoring: A review on its application. *Mutat. Res./Rev. Mutat. Res., 682(1)*, 71-81. https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2009.06.002

Linnainmaa, K., Meretoja, T., Sorsa, M., & Vainto, H. (1978). Cytogenetic effects of styrene and styrene oxidei. *Mutat. Res., 58(2–3),* 277-286. https://doi.org/10.1016/0165-1218(78)90020-4

Marcano, L., Carruyo, I., Del Campo, A., & Montiel, X. (2004). Cytotoxicity and mode of action of maleic hydrazide in root tips of *Allium cepa* L. *Environ. Res., 94(2)*, 221-226. https://doi.org/10.1016/s0013-9351(03)00121-x

Mc-Gill, M., Pathak, S., & Hsu, T. C. (1974). Effects of ethidium bromide on mitosis and chromosomes: A possible material basis for chromosomes stickiness. *Chromosoma., 47(2)*, 157-167. https://doi.org/10.1007/BF00331803

Michelangeli, F., Robson, M. J., East, J. M., & Lee, A. G. (1990). The conformation of pyrethroids bound to lipit bilayers. *Biochim. Biophys. Acta (BBA)-Biomembranes., 1028(1)*, 49-57. https://doi.org/10.1016/0005-2736(90)90264-O

Mithöfer, A., & Maffei, M. E. (2017). General mechanisms of plant defense and plant toxins. In Plant Toxins; Springer: Dordrecht, The Netherlands, pp. 3-24. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6464-4_21

Nwangburuka, C. C., & Oyelana, O. A. (2011). Cytological effects of chloroquine on root mitosis of *Allium cepa* (L.). *Acta SATECH., 4(1),* 25-35.

Özkan, O., & Üstüner, O. (2012). Investigations about genotoxicity of deltamethrin. *Kafkas Üniv. Vet. Fak. Derg., 18,* 69-74. https://doi.org/10.9775/kvfd.2011.4858

Özkara, A., Akyıl, D., Eren, Y., & Erdoğmuş, S. F. (2015). Potential cytotoxic effect of anilofos by using *Allium cepa* assay. *Cytotechnology., 67(5)*, 783-791. https://doi.org/10.1007/s10616-014-9716-1

Özkul, M., Özel, Ç. A., Yüzbaşıoğlu, D., & Ünal, F. (2016). Does 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) induce genotoxic effects in tissue cultured Allium roots?. *Cytotechnology., 68(6)*, 2395-2405. https://doi.org/10.1007/s10616-016-9956-3

Palmieri, M. J., Andrade-Vieira, L. F., Trento, M. V. C., Eleutério, M. W. F., Luber, J., Davide, L. C., ... & Marcussi, S. (2016). Cytogenotoxic effects of spent pot liner (SPL) and its main components on human leukocytes and meristematic cells of *Allium cepa*. *Water Air Soil Pollut., 227*, 156. https://doi.org/10.1007/S11270-016-2809-Z

Panda, B. B., & Sahu, U. K. (1985). Induction of abnormal spindle function and cytokinesis inhibition in mitotic cells of *Allium cepa* by the organophosphorus insecticide fensulfotion. *Cytobios., 42*, 147-155.

Panneerselvam, N., Palanikumar, L., & Gopinathan, S. (2012). Chromosomal aberrations induced by glycidol in Allium. *Int. J. Pharm. Sci. Res., 3(2)*, 300-304.

Parween, T., Jan, S., Mahmooduzzafar, M., & Fatma, T. (2012). Evaluation of oxidative stress in *Vigna radiata* L. in response to chlorpyrifos. *Inter. J. Environ Sci. Technol., 9(4)*, 605-612.

Rank, J., & Nielsen, M. H. (1997). *Allium cepa* anaphase-telophase root tip chromosome aberation assay N-methyl-N-nitrosourea, malic hydradize, sodium azide, ethyl meyhyl sulfonate. *Mutat. Res., 390(1-2)*, 121-127. https://doi.org/10.1016/s0165-1218(97)00008-6

Sarac, I., Bonciu, E., Butnariu, M., Petrescu, I., & Madosa, E. (2019). Evaluation of the cytotoxic and geno-toxic potential of some heavy metals by use of Allium test. *Caryologia., 72(2),* 37-43. https://doi.org/10.13128/cayologia-256

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

Saxena, P. N., Murthy, R. C., & Gupta, S. K. (2009). Evaluation of cytogenetic effects of deltamethrin in root meristem cells of *Allium sativum* and *Allium cepa*: a possible mechanism of chromosome damage. Toxicol. *Environ. Chem., 91(3)*, 577-594. https://doi.org/10.1080/02772240802268965

Shcneiderman, M. H., Dewey, W. C., & Highfield, D. P. (1971). Inhibition of DNA synthesis on synchronized Chinese hamster cell treated in G_1 with cycloheximide. *Exp. Cell Res., 67*, 147-155. https://doi.org/10.1016/0014-4827(71)90630-6

Shahid, M., & Khan, M. S. (2022). Tolerance of pesticides and antibiotics among beneficial soil microbes recovered from contaminated rhizosphere of edible crops. *Curr. Res. Microb. Sci., 3*, 100091. https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.100091

Shahid, M., Khan, M. S., Ahmed, B., Syed, A., & Bahkali, A. H. (2021). Physiological disruption, structural deformation and low grain yield induced by neonicotinoid insecticides in chickpea: a long term phytotoxicity investigation. *Chemosphere., 262*, 128388. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128388

Shahid, M., Singh, U. B., & Khan, M. S. (2023). Metabolomics-based mechanistic insights into revealing the adverse effects of pesticides on plants: an interactive review. *Metabolites., 13(2)*, 246. https://doi.org/10.3390/metabo13020246

Sharma, A., Yuan, H., Kumar, V., Ramakrishnan, M., Kohli, SK., Kaur, R., … & Zheng, B. (2019). Castasterone attenuates insecticide induced phytotoxicity in mustard. Ecotoxicol. *Environ. Saf., 179*, 50-61.

Sharma, P. C., & Gupta, P. K. (1982). Karyotypes in some pulse crops. *Nucleus., 25(3)*, 181-185.

Singh, D., Pal, M., Singh, R., Singh, C. K., & Chaturvedi, A. K. (2015). Physiological and biochemical characteristics of *Vigna* species for Al stress tolerance. *Acta Physiol. Plant., 37,* 1-13. https://doi.org/10.1007/s11738-015-1834-7

Smaka-Kincl, V., Stegnar, P., Lovka, M., & Toman, M. J. (1996). The evaluation of waste, surface and ground water quality using the Allium test procedure. *Mutat Res., 368(3-4)*, 171-179. https://doi.org/10.1016/s0165-1218(96)90059-2

Sudhakar, R., Ninge Gowda, K. N., & Venu, G. (2001). Mitotic abnormalities induced by silk dyeing industry effluents in the cell of *Allium cepa*. *Cytologia., 66(3)*, 235-239. https://doi.org/10.1508/cytologia.66.235

Sutan, N. A., Popescu, A., Mihaescu, C., Soare, L. C., & Marinescu, M. V. (2014). Evaluation of cytotoxic and genotoxic potential of the fungicide Ridomil in *Allium cepa* L. Analele Stiint Univ. *Al I Cuza Iasi., 60(1-5),* 5-12. http://www.bio.uaic.ro/publicatii/anale_vegetala/anale_veg_index.html

Şekeroğlu, V. (2010). Thiakloprid ve deltametrin insektisitlerinin tek başlarına ve karışım halinde kullanıldıkları zaman sıçan kemik iliği hücrelerinde in vivo (Rattus Norvegicus Berkenhout, 1769) genotoksik etkileri. Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, 148 s.

Tedesco, S. B., Laughinghouse, I. V. H. D. (2012). Bioindicator of genotoxicity: The *Allium cepa* test. Srivastava J. [ed.], *Environmental Contamination. Croatia: InTech*, pp. 137-156.

Tudi, M., Ruan, H. D., Wang, L., Lyu, J., Sadler, R., Connell, D., … & Phung, D.T. (2021). Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment. *Int. J. Environ. Res. Public Health., 18(3)*, 1112. https://doi.org/10.3390/ijerph18031112

Ünal, F., Tülek, N. D. H., Yüzbaşıoğlu, D., & Çelik, M. (2020). Methidathion insektisit/akarisitinin sitotoksik ve genotoksik potansiyelinin *Allium* testi ile incelenmesi. *Gazi Üniv. Fen Fak. Derg., 1-2*, 1-12. https://doi.org/10.5281/zenodo.4317924

Van't Hof, J. (1968). The action of IAA and kinetin on the mitotic cycle of proliferative and stationary phase excised root meristem. *Exp. Cell Res., 51(1),* 167-176. https://doi.org/10.1016/0014-4827(68)90167-5

Yalçın, E., Macar, O., Kalefetoğlu Macar, T., Çavuşoğlu, D., & Çavuşoğlu, K. (2021). Multi-protective role of *Echinacea purpurea* L. water extract in *Allium cepa* L. against mercury (II) chloride. *Environ. Sci. Pollut. Res., 28*, 62868-62876. https://doi.org/10.1007/s11356-021-15097-6

Yekeen, T. A., & Adeboye, M. K. (2013). Cytogenotoxic effects of cypermethrin, deltamethrin, lambdacyhalothrin and endosulfan pesticides on *Allium cepa* root cells. African *J. Biotech., 12(41),* 6000-6006. https://doi.org/10.5897/AJB2013.12802

Karaelmas Science and Engineering Journal
Journal home page: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen
DOI: 10.7212/karaelmasfen.1849045

Research Article
Received / Geliş tarihi : 25.12.2025
Accepted / Kabul tarihi : 10.04.2026

Modeling and Prediction Methods for Energy Consumption of Electric Vehicles

Elektrikli Araçların Enerji Tüketimi için Modelleme ve Tahmin Yöntemleri

Pınar Kıramanlıoğlu[1*], Begüm Erol[2], Mehmet Mutlu Yenisey[3]

[1]Istanbul Beykent University, Faculty of Engineering-Architecture, Istanbul, Türkiye
[2]Kahramanmaras Istiklal University, Faculty of Engineering, Architecture and Design, Kahramanmaraş, Türkiye
[3]Istanbul University-Cerrahpasa, Faculty of Engineering, Istanbul, Türkiye

Abstract

In recent years, growing environmental issues and concerns over energy sustainability have driven major changes in the transportation sector. Electric vehicles (EVs) have appeared as a key solution to reduce the environmental impact of fossil fuel use. Their increasing adoption makes understanding energy consumption and its determinants crucial, as it directly affects range anxiety, charging infrastructure, and ownership costs. EV energy consumption depends on vehicle characteristics, driving behavior, environmental conditions, and auxiliary systems. For instance, vehicle weight and aerodynamics influence energy use, while driver acceleration and braking patterns can substantially increase it. Declining battery performance and intensive use of heating or air conditioning also raise consumption. This study examines the factors influencing EV energy use and predicts consumption using both an analytical model and machine learning (ML) techniques. Comparative evaluation showed that the Random Forest (RF) method achieved the highest prediction accuracy, while the analytical model performed competitively. According to the RF feature importance analysis, Acceleration, Timestamp, and Elevation Smoothed were the most influential variables, emphasizing the dominant role of driving dynamics and road topography. The results demonstrate that integrating physically meaningful parameters with data-driven methods enhances prediction accuracy and supports sustainable energy use.

Keywords: Electric vehicles, energy consumption, extended electric vehicle energy dataset (E-VED), optimization

Öz

Son yıllarda, artan çevre sorunları ve enerji sürdürülebilirliği konusundaki endişeler ulaşım sektöründe büyük değişikliklere neden olmuştur. Elektrikli araçlar (EV'ler), fosil yakıt kullanımının çevresel etkisini azaltmak için kilit bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Artan benimsenmeleri, enerji tüketimini ve belirleyicilerini anlamayı çok önemli hale getiriyor, çünkü menzil kaygısını, şarj altyapısını ve mülkiyet maliyetlerini doğrudan etkiliyor. EV enerji tüketimi araç özelliklerine, sürüş davranışına, çevre koşullarına ve yardımcı sistemlere bağlıdır. Örneğin, araç ağırlığı ve aerodinamik enerji kullanımını etkilerken, sürücü hızlanması ve frenleme modelleri bunu önemli ölçüde artırabilir. Azalan pil performansı ve yoğun ısıtma veya klima kullanımı da tüketimi artırır. Bu çalışma EV enerji kullanımını etkileyen faktörleri inceler ve hem analitik bir model hem de makine öğrenimi (ML) tekniklerini kullanarak tüketimi öngörür. Karşılaştırmalı değerlendirme, Rastgele Orman (RF) yönteminin en yüksek tahmin doğruluğunu elde ettiğini, analitik modelin ise rekabetçi bir şekilde performans gösterdiğini gösterdi. RF özellik önem analizine göre, Hızlanma, Zaman Damgası ve Yükseklik Dumanlı, sürüş dinamiklerinin ve yol topografyasının baskın rolünü vurgulayan en etkili değişkenlerdi. Sonuçlar, fiziksel olarak anlamlı parametrelerin veri odaklı yöntemlerle entegre edilmesinin tahmin doğruluğunu artırdığını ve sürdürülebilir enerji kullanımını desteklediğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araçlar, enerji tüketimi, genişletilmiş elektrikli araç enerji veri seti (E-VED), optimizasyon

*Corresponding author: pinarkiramanlioglu@beykent.edu.tr

Pınar Kıramanlıoğlu orcid.org/0000-0001-5768-6400
Begüm Erol orcid.org/0000-0001-9131-3317
Mehmet Mutlu Yenisey orcid.org/0000-0002-4532-344X

This work is licensed by "Creative Commons Attribution-NonCommercial-4.0 International (CC)".

1. Introduction

Global environmental challenges, such as climate change, fossil fuel dependence, and urban air pollution, have intensified the focus on sustainable transportation. In this context, electric vehicles (EVs) have gained prominence over internal combustion engine (ICE) vehicles due to their significantly lower carbon footprint and higher energy efficiency. As EV technologies evolve and infrastructure investments expand, accurate energy consumption prediction has become a critical necessity for mitigating "range anxiety" and optimizing smart grid operations by aligning charging demand with renewable energy supply.

The factors influencing EV energy consumption are highly heterogeneous, encompassing vehicle specifications, driving behavior, road topography, and meteorological conditions. Recent studies have extensively utilized the Vehicle Energy Dataset (VED) to decode these complexities. For instance, Abd El-Latif & El-dosuky (2025) implemented explainable deep learning models for energy estimation in sustainable cities, emphasizing the importance of temporal and spatial features. However, energy consumption forecasting remains a complex, multivariate problem that requires robust modeling strategies. In this regard, various algorithms have demonstrated high performance; Hussain et al. (2025) compared 11 different models and reported that the Extra Trees Regressor achieved an R^2 of approximately 0.9592, while Zhang et al. (2025) successfully utilized XGBoost to estimate hourly charging demand in California.

Despite these advancements, a significant gap exists between purely deterministic physical models and stochastic data-driven methods. Traditional physical models, while interpretable, often struggle to capture real-world variability such as fluctuating traffic patterns. As noted by Polymeni et al. (2026), conventional linear modeling lacks the ability to represent the nonlinear relationships found in real-world scenarios, highlighting the need for comprehensive statistical frameworks. Conversely, while machine learning (ML) excels at learning hidden patterns, it often lacks physical transparency. Recent hybrid approaches have attempted to bridge this gap by combining physical simulations with ML techniques, such as Random Forest and Boosting (Huang et al., 2024), or by focusing on key physical variables like road slope and ambient temperature (Janpoom et al., 2023). A summary of recent studies, their methodologies, and objectives is presented in Table 1.

The primary contribution of this research is the integration of an analytical (physical) model based on vehicle dynamics with advanced ML techniques, providing both predictive accuracy and physical interpretability. Unlike many existing works that focus on a single paradigm, our approach ensures methodological consistency by utilizing the same physical features across both models—specifically using timestamps for derivative calculations like acceleration. Furthermore, we employ a dual interpretability framework using both RF-based feature importance and SHAP (SHapley Additive exPlanations) to pinpoint the most critical variables influencing EV energy consumption. By systematically comparing physics-based and data-driven methods, this study provides actionable guidance for vehicle design, route planning, and energy-efficient operations.

The remainder of this paper is organized as follows: Section 2 describes the dataset and the proposed methodology, including data preprocessing and analytical formulations. Section 3 reports the experimental results, performance evaluations, and a detailed discussion on feature influence. Finally, Section 4 concludes the study and outlines future research directions.

2. Material and Methods

In this section, the dataset and methodologies employed in the study are described in detail. The characteristics of the data, the preprocessing steps, and the approaches used for energy consumption prediction are presented. Furthermore, the proposed solution approach and the steps involved in the modeling process are explained.

2.1. Data Definition and Components

The dataset used in the study was created by the University of Michigan (UM), the Argonne National Laboratory and the Idaho National Laboratory to study the energy consumption behaviors of drivers and the energy-saving potential of eco-driving technologies. To create the dataset, personal vehicle owners living and/or working in Ann Arbor, Michigan were recruited into a large pool of participants and in-car diagnostics II (OBD-II) data loggers were installed in their vehicles with their consent. The installed devices collected driving records for one year, sent OBD-II signals to a database via real-time data and cellular connections, including GPS trajectories (Wu et al., 2015). The dataset spans a one-year period from November 1, 2017, to November 1, 2018. The dataset includes 27 Plug-Hybrid Electric Vehicle (PHEV)- Electric Vehicle (EV) and 357 Internal Combustion Engine (ICE) vehicles. The first set of data (VED) did not include an energy consumption metric, a subsequently expanded dataset added an energy

Table 1. Literature review.

Reference	Year	Purpose	Method	Future Research
Wu et al.	2015	Measurement and estimation of energy consumption of electric vehicles.	Physical modeling and analytical energy prediction model	Verification of the method and energy efficiency improvement studies with larger data sets.
De Cauwer et al.	2015	Estimation of electric vehicle energy consumption and examination of associated parameters based on real-world data.	Multiple linear regression, vehicle kinetic parameters analysis.	Verification of models in more vehicle types and climatic conditions.
Zhang et al.	2022	Enriching VED data and making it suitable for deep learning models.	GPS calibration, QGIS, OpenStreetMap API	Enrichment with new datasets and further traffic scenario analysis.
Rathore et al.	2023	Estimating EV energy consumption based on historical charge data.	Random Forest, XGBoost, artificial neural networks (ANN and DNN).	Enrichment of data sets and testing of more complex models.
Shen et al.	2023	Comparison of physical modeling and ML-based methods for energy prediction.	Experimental comparison of physics-based and ML methods	Development of hybrid models and optimization studies for different driving conditions.
Yılmaz and Yagmahan	2024	Estimation of energy consumption on routes unknown by combining dynamic and static data.	Deep neural networks (DNN), time series clustering (DTW)	Testing more models for estimation of route types.
Teimoori et al.	2024	Determination of the parameters affecting energy consumption in electric vehicles by transfer learning.	Deep transfer learning (DTL), collaborative learning	Application of transfer learning to wider datasets.
Ramoliya et al.	2024	Develop a smart grid-based energy management framework for electric vehicle energy consumption and charging stations.	ML, statistical analysis, 3-tier smart grid architecture.	More complex charging models and dynamic grid load balance analysis.
Zhu et al.	2025	Evaluation of prediction and model uncertainties based on field data of electric vehicle energy consumption.	ML is integrated with physical data, QRNN.	Testing models in different vehicle fleets and ensuring lower uncertainty intervals.

consumption component (Huang et al., 2024). In total, the dataset consists of 35 distinct features, which are detailed in Table 2.

Each variable in the data set shown in Table 2 captures distinct aspects of vehicle movement and context, providing a comprehensive foundation for subsequent statistical analysis. These features enable the assessment of temporal, spatial, and behavioral patterns, supporting a deeper understanding of urban mobility dynamics. Data statistics are given in Table 3.

Having these metrics recorded systematically enables elaborate quantitative analysis, primarily to identify correlations, anomalies, and patterns of urban transportation. These subsequent descriptive statistics will show the range and centrality of each feature, which would facilitate explaining the comprehensive story of vehicular activity across the city.

By systematically capturing values such as speed limits, directional data, and vehicle-specific readings, the dataset establishes a foundation for robust exploration of urban mobility. Visualization tools have been employed, includ-

Table 2. Data components.

Feature	Description
Date	The calendar date on which the data is recorded (YYY-MM-DD format)
DayNum	The day of the week is the number (for example, Monday = 1, Sunday = 7)
VehId	Vehicle-specific identification number
Trip	Defines each driving session (travel ID)
Timestamp (ms)	Expresses the timestamp in milliseconds (ms)
Trip Duration (seconds)	Shows driving time in seconds.
Latitude[deg]	The latitude degree of the vehicle position.
Longitude[deg]	The longitude degree of vehicle position.
Vehicle Speed[km/h]	Vehicle speed is in kilometers/hours.
MAF[g/sec]	Mass air flow rate is measured in grams/seconds.
Engine RPM[RPM]	Specifies the number of turns (rpm) of the motor per minute.
Absolute Load [%]	The percentage of load applied to the engine.
OAT[DegC]	The outdoor temperature is in degrees Celsius
Short Term Fuel Trim Bank 1[%]	Short-term fuel correction (for cylinder bank 1)
Short Term Fuel Trim Bank 2[%]	Short-term fuel correction (for cylinder bank 2)
Long Term Fuel Trim Bank 1[%]	Long-term fuel correction (for cylinder bank 1)
Long Term Fuel Trim Bank 2[%]	Short-term fuel correction (for cylinder bank 2)
Elevation Raw[m]	The raw height value from the GPS is in meters
Elevation Smoothed[m]	Filtered, streamlined height data
Gradient	Indicates the path slope (positive = uphill, negative = downhill)
Matchted Latitude[deg]	Corrected latitude value after map matching
Matched Longitude[deg]	Corrected longitude value after map matching
Match Type	Information showing how GPS data is mapped to the road network
Class of Speed Limit	Specifies the category of the speed limit (e. in/out of layout)
Speed Limit[km/h]	Valid legal speed limit (km/h)
Speed Limit with Direction[km/h]	Direction specific speed limit (such as one-way path)
Intersection	Specifies whether there is an intersection near the vehicle (0 = none, 1 = exist)
Bus Stops	Indicates if there is a bus stop near the vehicle (0 = none, 1 = there is)
Distance to Intersection (m)	Distance of the vehicle to the nearest intersection (meter)
Minute	The value of minutes in a day
Is_Weekend	Weekend information (1 = Saturday/Sunday, 0 = Weekdays)
Stop Duration (seconds)	Time spent when the vehicle stopped (seconds)
Distance from City Center (km)	Distance between vehicle and city center (kilometer)
Proximity to Bus Stops (m)	Distance to the nearest bus stop of the car (meter).
Energy_Consumption (Wh) (Target Variable)	The amount of energy consumed (usually in Wh or kWh)

Table 3. Data statistics.

Feature	Mean	Std	Min	Max
Timestamp(ms)	719670.30	607665.70	72700.00	80086.00
Trip Duration (seconds)	1529.59	1022.09	0.00	8291.40
Vehicle Speed[km/h]	39.27	11.31	10.18	89.50
MAF[g/sec]	11.03	4.27	0.33	34.38
Engine RPM[RPM]	1231.56	308.45	55.37	2522.61
Absolute Load [%]	30.12	23.59	0.96	642.63
OAT[DegC]	9.50	12.13	-33.04	45.32
Short Term Fuel Trim Bank 1[%]	-0.28	2.18	-10.90	14.24
Short Term Fuel Trim Bank 2[%]	-0.55	2.99	-11.39	22.95
Long Term Fuel Trim Bank 1[%]	0.73	3.46	-12.12	16.25
Long Term Fuel Trim Bank 2[%]	0.60	3.68	-8.72	16.06
Elevation Raw[m]	262.14	10.54	236.86	294.44
Elevation Smoothed[m]	262.14	10.54	236.86	294.44
Gradient	1.23E-06	0.0002	-0.001	0.001
Speed Limit[km/h]	55.60	13.23	24.00	89.00
Speed Limit with Direction[km/h]	57.41	9.94	40.00	111.56
Energy_Consumption (Wh)	0.003	0.002	-0.0001	0.019

ing heat maps and relational diagrams, to better understand how variables interact spatially and temporally across the cityscape. Figure 1 shows the spatial distribution of electric vehicle energy consumption densities across the road network within the study area. The color scale ranges from green (low energy consumption) to red (high energy consumption). In the city center, heavy traffic and frequent stop-and-go driving conditions increase energy consumption, while in the peripheral areas more streamlined traffic flow is characterized by relatively lower energy consumption. Ultimately, this visualization demonstrates that electric vehicle energy consumption should be evaluated not only by numerical values but also in a spatial context. The road network visualized by the color scale shows that energy consumption is directly related to driving conditions, traffic density and road location. Thus, the extent to which the forecasting models developed or used in the study reflect the actual field conditions is visualized.

The intensity of the heatmap shows natural log of the data density. A grid with the intensity 10 contains e^{10} times more data compared to a grid with the intensity of 0. Figure 2 is a distribution graph (scatter plot), showing the relationship between vehicle speed (Vehicle Speed) and energy consumption (Energy Consumption). In Figure 2 while x-axis shows vehicle speed (km/h), y-axis shows energy consumption (in unit). Additionally, red dots denote each observation (car speed – consumption pair).

As can be seen from the chart, a positive correlation is observed between the increase in vehicle speed and energy consumption. Consumption at lower speeds (especially 20–40 km/h) is concentrated at lower values, while consumption increases at some extreme values when the speed increases to 60 km/h and above. This suggests that vehicle speed is a significant variable that directly affects energy consumption, especially at high speeds.

2.2. Data Preprocessing

The raw dataset was originally compiled using a broad framework encompassing both electric vehicles (EVs) and internal combustion engine (ICE) vehicles. Since the scope of this research is strictly limited to EV energy consumption, 357 ICE vehicles and their unique diagnostic param-

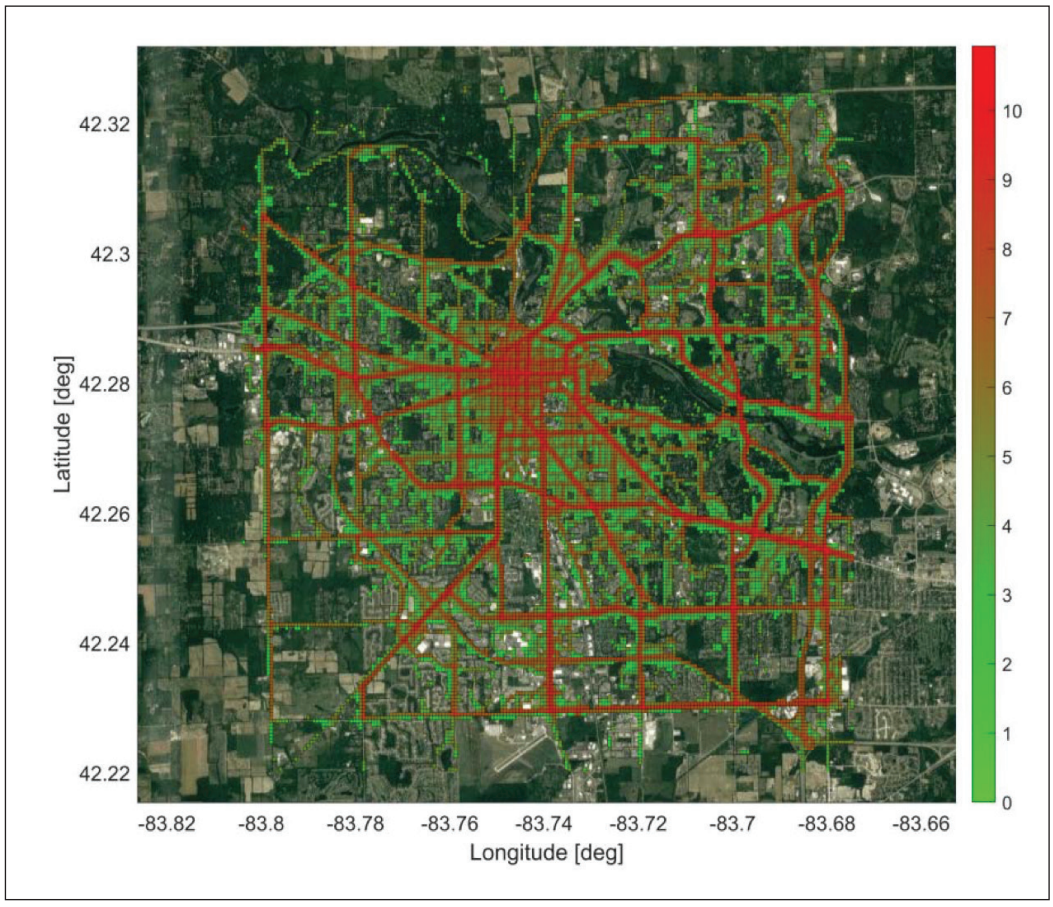


Figure 1. Heatmap of the collected data.

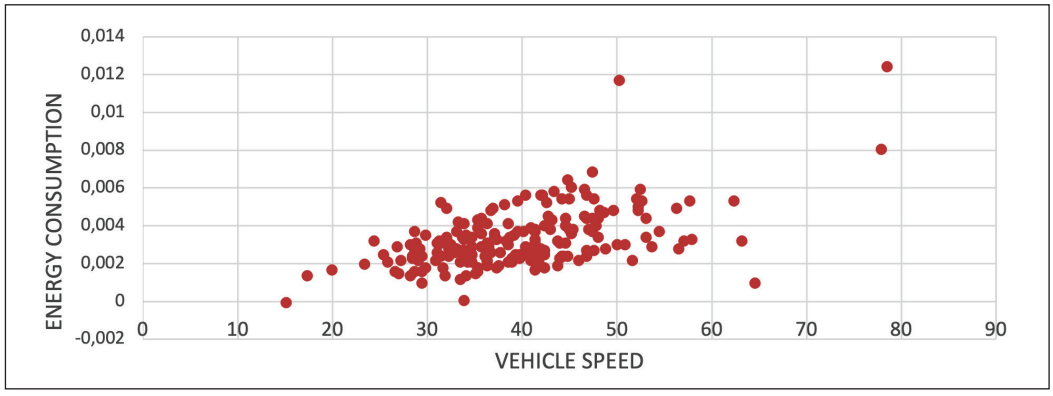


Figure 2. Vehicle speed-energy consumption relationship.

eters—such as Short-Term/Long-Term Fuel Trim Bank 1 & 2—were excluded during the preprocessing stage.

The remaining EV-only dataset focuses on variables directly governing energy consumption dynamics, including vehicle speed, acceleration, road gradient, and battery-related parameters such as HV battery current, voltage, and state of charge (SOC). Furthermore, auxiliary components like HVAC power (air conditioning and heater power) were retained to capture secondary energy demands. To avoid location-dependent bias, purely geographic identifiers (e.g., latitude and longitude) were removed, while physically significant derived features such as elevation and gradient were preserved. This rigorous filtering and selection procedure was implemented to ensure physical consistency and enhance the interpretability of the predictive models.

The final dataset consists of the following features: Timestamp (s), Latitude, Longitude, Vehicle Speed (m/s), OAT (°C), Air Conditioning Power (W), Heater Power (W), HV Battery Current (A), HV Battery SOC (%), HV Battery Voltage (V), Elevation Smoothed (m), Gradient, Class of Speed Limit, Speed Limit (km/h), and Acceleration. The inclusion of the Timestamp feature is critical for maintaining consistency between the analytical and ML models. Physically, vehicle dynamics such as acceleration are derived from the change in speed over time (a = dv/dt). By providing the timestamp, ML models are granted the same temporal reference used in the analytical equations, allowing them to better capture time-dependent patterns such as battery discharge trends and thermal effects (Polymeni et al., 2026).

The target variable used in all ML models is the original Energy_Consumption (Wh) variable provided in the dataset.

Although the dataset includes an energy consumption variable, it is reported that these values are estimated rather than directly measured (De Cauwer et al., 2015). To provide a physics-based reference, an analytical model was also developed in this study. In this analytical approach, additional features were derived and energy consumption was recalculated based on vehicle dynamics equations. Instantaneous power was computed using longitudinal dynamics, and energy consumption was obtained by integrating power over time, while regenerative braking conditions were represented as negative power/energy contributions.

It is important to note that the analytically computed energy consumption values are not used as target variables in the ML models. Instead, both the analytical model and the ML models independently estimate the same original energy consumption values provided in the dataset. Performance metrics are then calculated by comparing model predictions with these original values. This approach ensures a fair and consistent comparison between physics-based and data-driven methods using identical input features and target values.

2.3. Analytical Implementation

An analytical formula has been developed for calculating the energy consumption of electric vehicles (Wu et al., 2015). According to the basic theory of vehicle dynamics, the energy demand varies according to vehicle speed, acceleration, and road characteristics. The analytical model, expressed by Equations (1-4), serves as a physical baseline to estimate the energy consumed in the dataset.

$$P = P_t + P_m + P_g \tag{1}$$

$$P_m = \frac{r.R^2}{K^2}(ma + kv^2 + f_{rl}mg + mgsin\theta)^2 \tag{2}$$

$$P_t = v(kv^2 + f_{rl}mg + mgsin\theta) \tag{3}$$

$$P_g = mav \tag{4}$$

In Equation 1, the model calculates the total power required during the electric vehicle's movement through physical force components such as P_t, P_m, P_g (in Watt). In Equation 2, P_m denotes the power losses generated by the motor. Here, v (in m/s) denotes the vehicle speed, m (in kg) represents the vehicle mass, θ (in degree) indicates the road gradient, and a (in m/s^2) corresponds to the vehicle acceleration. Also in this context, ma is the acceleration force required for the vehicle's acceleration, kv^2 represents the aerodynamic drag coefficient which increases proportionally with the square of the speed, f_{rl} mg represents the rolling resistance resulting from friction between the tire and the road surface, and $mgsin\theta$ is the gravitational force which varies depending on the road's slope, collectively determine the instantaneous dynamic load to which the vehicle is subjected. In this equation the sum of kv^2, f_{rl} mg, $mgsin\theta$ and ma gives the traction force F_{tr} (in Newton). Together these components determine the instant dynamic load of the vehicle. In Equation 3, Pt is associated with the traction power losses arising from travel resistance. The total traction power required by the electric motor to maintain the vehicle's forward motion consists of the sum of all resistance components and inertial loads in the system. In equation the parenthesis is a force in the Newton (N) unit; when the velocity is multiplied by v(m/s) the result is watts (W), which ensures the physical/dimensionality of the model. In equation 4, Pg refers to the potential energy loss or gain associated with acceleration and deceleration. When the vehicle is operating under deceleration, negative acceleration, or inclined road conditions, (the term Pg=mav goes negative) regenerative braking takes place. Energy recovery occurs in this scenario when the electric motor switches to generator mode, and mechanical energy is converted into electrical energy and fed back into the battery and the total power P goes negative. The negative energy consumption values shown in Table 5 can be explained by this regenerative state.

While this analytical model provides a robust physical foundation, it operates under certain simplifying assumptions. It

is assumed that parameters such as the aerodynamic drag factor (k) and the rolling resistance coefficient (f_{rl}) remain constant throughout the journey. Furthermore, this deterministic approach lacks the flexibility to explicitly incorporate high-dimensional, non-linear factors such as auxiliary HVAC system loads or complex battery thermal behavior. These inherent limitations serve as the primary motivation for integrating data-driven ML methods, which can capture the complex patterns that remain outside the scope of traditional physics-based equations.

These inherent limitations of the analytical framework—specifically the difficulty in modeling dynamic auxiliary loads and varying environmental conditions—serve as the primary motivation for integrating data-driven ML methods in this study. By leveraging ML, we aim to capture the complex patterns that remain outside the scope of traditional physics-based equations, thereby enhancing overall predictive accuracy.

The total use of electricity for a trip (E) is calculated by integrating power over journey time (T) in Equation 5.

$$E = \int_0^T P(t)dt \tag{5}$$

Time discretization is employed to apply numerical integration since the measurements are recorded at discrete time intervals. The total energy consumption (E) is calculated using the following summation (Equation 6):

$$E \approx \sum_{i=1}^{N} P_i . \Delta t_i \tag{6}$$

In this equation, represents the instantaneous power at sampling step i (measured in Watts), and is the sampling interval (converted to hours). To maintain unit consistency, the power is multiplied by the time interval in hours to obtain results in Watt-hours (Wh). For standardized reporting, these values are converted to kilowatt-hours (kWh) where necessary, using the standard conversion factor of 1 kWh = 1000 Wh.

The vehicle information contained in the data set and the instant energy consumed by the vehicles were calculated using the equation above. Parameter values used to calculate energy consumption are shown in Table 4. In a study, values suggested by The Engineering Toolbox (2013) (Wu et al., 2015).

2.4. Machine Learning Methods

In this study, four ML algorithms were applied to model and predict vehicle energy consumption.

2.4.1. Linear Regression

Linear regression (LR) analysis aims to create a model that predicts the desired variable by starting from the variable (s) that can be detected more easily or earlier than the desired variable. If another normally distributed numerical variable unknown to a known normal distributed numeric variable is applied for estimation of another normally distributed numerical variable with a relationship between them, then simple LR is used to estimate a variable by using more than one variable, while LR is applied to modelling It examines the relationship between the dependent variable (y) and the independent variable(s) (x). It is formulated as Y=a+bX or $Y=B_0+B_1X$. When the value of one of the variables is known, the value of the other is found (Kilic, 2013). LR is widely used in both social sciences and engineering, especially due to its simplicity, interpretability and applicability. The electric vehicle is also preferred as the starting model in energy consumption estimation (Hussain et al., 2025).

Table 4. Parameter values.

Parameters	Values
Coefficient of rolling resistance, f_{rl}	0.006
Coefficient of aerodynamic resistance, $k = \frac{\rho}{2} C_d A_f$ [kg/m]	1.30
Armature constant and magnetic flux product, $K=K_a.\theta\Phi d$ [vs]	10.08
Motor resistance (in general), r [Ω]	0.11
Tire radius, R [m]	0.50
Gravity, g [m/s_2]	9.81

2.4.2. Random Forest

It is an ensemble learning algorithm based on decision trees. It is essentially an ensemble method formed by combining multiple decision trees. Random Forest (RF) trains each tree differently and then combines their predictions to create a more robust and balanced predictor. Each decision tree randomly samples the dataset. This ensures that each tree is trained on a different subset. Each decision tree is trained using a subset of features at each node. This ensures that each tree is trained on a different set of features. After each decision tree is trained, the predictions are combined. In the case of classification, the majority of classes are taken, while in the case of regression, the average value is taken. It generally outperforms other classification and regression algorithms. Combining multiple trees reduces the risk of overfitting and performs well on a variety of datasets and features. RF has been successfully used in many ML problems such as classification, regression, and feature selection (Aslan, 2024).

2.4.3. Extreme Gradient Boosting

Extreme Gradient Boosting (XGBoost) is a ML algorithm that uses gradient boosting and is based on decision trees. Its basic operating principle is to create a new model that minimizes the errors of the existing model. In this process, a step size is calculated based on the second derivative of the loss function. This step helps adjust the output of the new model to minimize the errors of the existing model (Şahin et al., 2025).

2.4.4. Support Vector Machine

A supervised learning model called Support Vector Machine (SVM) can be utilized for classification and regression tasks. Its primary function is to identify a hyperplane that effectively separates data points into distinct classes while maximizing the margin. These principles are extended to regression problems by Support Vector Regression (SVR). Both SVM and SVR models depend on a subset of the training data, as their cost functions ignore points beyond the margin or those with predictions close to their targets (Hussain et al., 2025).

2.5. Proposed Solution Approach

The proposed solution approach consists of three main steps. The flow chart of the energy prediction process is shown in Figure 3. The steps are summarized as follows:

Step 1. Data Preprocessing: The EVED dataset contains various features related to energy consumption. Data preprocessing was performed to ensure data quality and to prepare the dataset for modeling. The key preprocessing steps included:

- Handling Missing Data: Missing values were removed to maintain dataset integrity.
- Data Transformation: Feature values were scaled using Min-Max normalization to standardize the range of input variables.
- Feature Engineering: New features were derived from existing variables to enhance model learning and predictive capability.

Step 2. Energy Consumption Modeling: In the prediction of energy consumption, two parallel approaches were considered: an analytical model and ML models. Each of these methods has been used in this dual strategy to take full advantage of their complementary strengths: the physical principles on which the analytical model is based provide insight, while ML models can capture complex nonlinear patterns present in the data that are difficult or impossible to represent analytically.

In this study, the target variable used for training and testing all ML models is the original "Energy_Consumption (Wh)" variable provided in the EVED dataset. The analytically computed energy consumption values were not used as training targets for the ML models. Instead, both the analytical model and the machine learning models independently predict the same observed energy consumption values from the dataset, and their predictive performances are compared using performance (Root Mean Square Error, RMSE, Mean Absolute Error, MAE, and Coefficient of Determination, R^2) metrics.

Step 2.1. Analytical (Physical) Model: This approach relies on fundamental physical principles and engineering knowledge affecting energy consumption.

- Model Formulation: A mathematical model was developed considering the primary factors influencing energy consumption.
- Parameter Estimation: Model parameters were calibrated to best fit the observed data.

Step 2.2. Machine Learning Model Development: This approach applies ML algorithms to grasp complex patterns within the data:

- Model Development: Algorithms such as LR, RF, XGBoost, and SVM were implemented and trained.

- Training and Validation: The dataset was split into training, validation, and test subsets to ensure reliable performance evaluation.
- Hyperparameter Optimization: Cross-validation and predefined hyperparameter ranges for each algorithm were used to optimize the key hyperparameters that yielded optimal predictive performance.

Step 3. Energy Prediction and Performance Evaluation: The predictions of both the analytical model and the ML model were compared on the test dataset. Model performance was evaluated based on standard metrics such as RMSE, MAE, and R^2 to assess their accuracy and explanatory power.

3. Results and Discussion

This section provides an overview of the study's findings and interprets the results in the context of model performance and predictive accuracy.

3.1. Experimental Details

All models were developed and tested in the Google Colab environment using Python. For the ML applications, the Scikit-learn and XGBoost libraries were utilized, and sklearn metrics was employed for performance evaluation. The dataset was divided into 80% training and 20% testing for all methods. Hyperparameter optimization of the regression models was conducted according to the ranges presented in Table 5. Key parameters of each model were selected, and their optimal values were determined by using a grid search approach. In this respect, each model was optimized to reach the maximum explanatory power and minimum error values on the dataset. The experimental study was evaluated by three commonly accepted regression performance metrics: RMSE, MAE, and R^2. Performance metrics used in this study are defined by Equations 6–8, respectively. In these equations, y_i is the real (observed) value of the target variable for the ith sample; $\hat{y}$ is the predicted value generated by the model, $\bar{y}$ is the mean of the observed values, and n is the total number of samples in the dataset. These standard formulations are widely adopted in the literature to rigorously assess the accuracy and explanatory power of regression models.

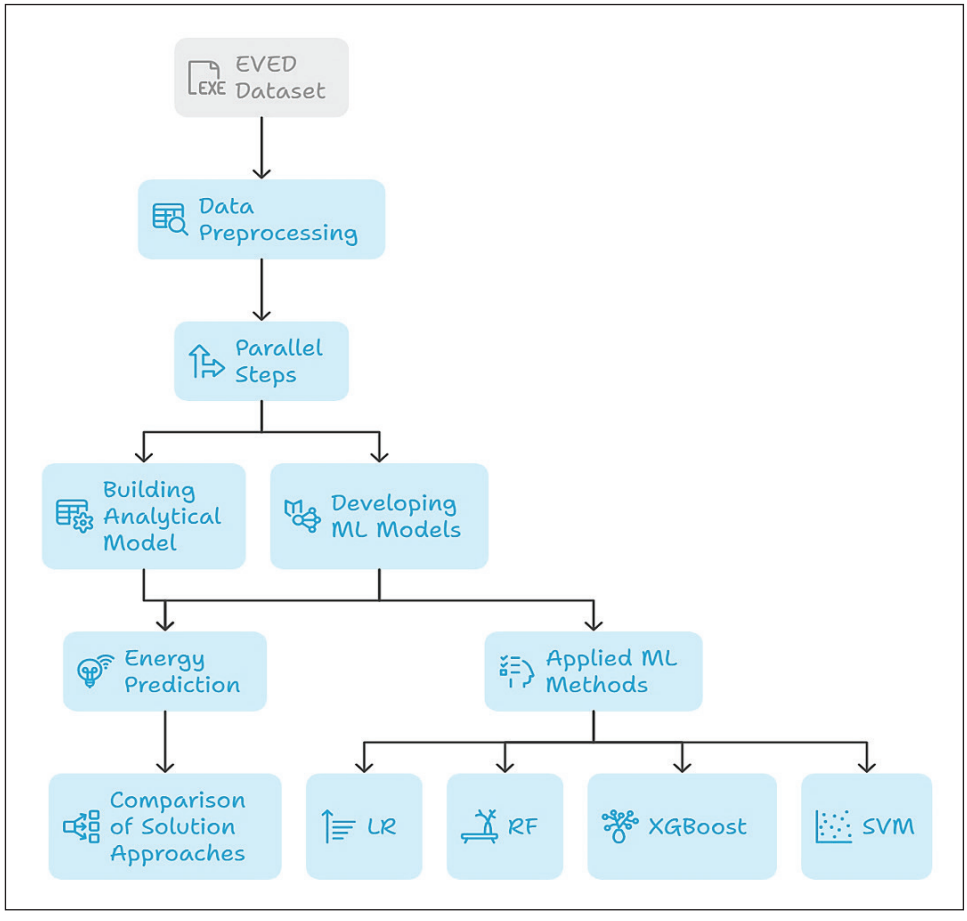


Figure 3. Flow chart of energy prediction process.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}, \quad \forall i \in D \tag{6}$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i - \hat{y}_i|, \quad \forall i \in D \tag{7}$$

$$R^2 = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \tag{8}$$

3.2. Comparison of Analytical and ML Models

In the current study, the regression performance of the analytical model was evaluated against various ML methods, including LR, RF, XGBoost, and SVM. The results of tests conducted on this dataset are summarized in Table 6. Complementing the tables, Figure 4 (a)-(b) depicts the results in detail to clearly present a comparison of performances by models. It should be noted that the comparisons presented here are based on the specific dataset and model configurations used in this study, and therefore do not constitute a universal benchmark across methods. Among the methods tested, RF gave the best performance, modeling the highly complicated relationships of the data with low error rates and high explanatory power.

The performance of the analytical model was also close to RF and fitted very strongly with a high coefficient of determination, indicating that—in addition to ML approaches—the analytical model has considerable explanatory capability and effectively captures the underlying patterns in the data. Rather than indicating a definitive superiority over data-driven approaches, this result highlights the complementary strengths of the analytical model, particularly in terms of interpretability and its ability to reflect the underlying physical relationships of the system. Meanwhile, XGBoost demonstrated competitive performance in terms of error metrics but a slightly lower ability in capturing the relationships in the dataset compared with the RF and the analytical model. The worst performances were obtained for LR and SVM. Indeed, both methods had low value in explaining the variability of the dataset. If the performance of LR was relatively poor, its linear assumptions may not be fully met by the dataset. Although hyperparameter optimization was performed for SVM over a predefined range of kernel types (linear, rbf, poly), regularization parameter (C), epsilon, and kernel coefficient (gamma), the model still exhibited limited predictive performance on this dataset. This outcome may be related to the sensitivity of SVM to feature scaling, kernel selection, and the interaction between hyperparameters. It should also be noted that the selected parameter ranges, while reasonably broad, may not fully capture the optimal

Table 5. Parameter ranges for regression algorithms.

Method	Parameter	Range
RF	Number of trees (n_estimators)	[100, 250, 500, 750, 1000]
	Maximum tree depth (max_depth)	[3, 5, 7, 10] or None
	Minimum samples to split a node (min_samples_split)	[2, 3, 5, 7, 10, 20]
	Minimum samples per leaf (min_samples_leaf)	[1, 2, 3, 5, 7]
	Features considered per split (max_features)	{“auto”, “sqrt”, “log2”}
XGBoost	Number of trees (n_estimators)	[100, 250, 500, 750, 1000]
	Maximum tree depth (max_depth)	[3, 5, 7, 10] or None
	Learning rate (learning_rate)	[0.001, 0.01, 0.1]
	Subsample ratio of training data (subsample)	[0.5, 1.0]
	Subsample ratio of features per tree (colsample_bytree)	[0.5, 1.0]
	Minimum child weight (min_child_weight)	[1, 10]
SVR	Regularization parameter (C)	[1e-3, 1e3] (log-scale)
	Epsilon-tube width (epsilon)	[1e-3, 1.0]
	Kernel type (kernel)	{“linear”, “rbf”, “poly”}
	Kernel coefficient (gamma, for rbf)	[1e-4, 10] (log-scale)

configuration for this specific problem. Therefore, more extensive tuning strategies (e.g., wider search spaces or alternative kernel formulations) could potentially improve SVM performance, which should be considered in future studies. Overall, the results suggest that RF and the analytical model provide strong performance for this particular dataset; however, these findings should be interpreted as context-dependent rather than evidence of general superiority. Generally, these results confirm that RF and the analytical model can outperform linear-assumption-based methods in capturing the complex relationships evidenced in this dataset.

When the results are considered from the point of view of training time, differences among the models become clear. The computational effort required for the analytical model is the highest because its physical formulation makes the estimation of parameters computationally complex. RF and XGBoost presented a better balance between the efficiency of training and predictive performance. For LR, being the fastest method did not ensure the desired accuracy, whereas for SVM, computational requirements are relatively high for a technique with low explanatory power. It should also be noted that computational efficiency and predictive accuracy should be evaluated together with model transparency and interpretability, especially when analytical understanding of the system is required. These results indicate that predictive performance and computational efficiency should both be considered for the selection of suitable models, especially in large-scale or real-time applications.

3.3. Feature-Based Interpretation and Discussion

In the present study, the energy consumption of electric vehicles was predicted using two different approaches: a physical-analytical model and various ML methods. The estimate of energy consumption in an analytical model is calculated by considering fundamental dynamic parameters such as vehicle speed, mass, and road gradient. In contrast, ML models use a much broader set of features, including battery state, environmental conditions, HVAC system loads, and speed limit information to generate data-driven predictions. The results reported herein offer a comparison

Table 6. Results of regression models

Regressor / Performance Metric	Analytic Model	ML Methods			
		LR	RF	XGBoost	SVM
RMSE	*4.12*	7.54	**4.1**	4.71	7.26
MAE	*1.51*	5.93	**1.51**	1.92	5.73
R^2	*0.71*	0.5	**0.72**	0.65	0.51
Computational Time (second)	*1776*	60	**357**	687	1248

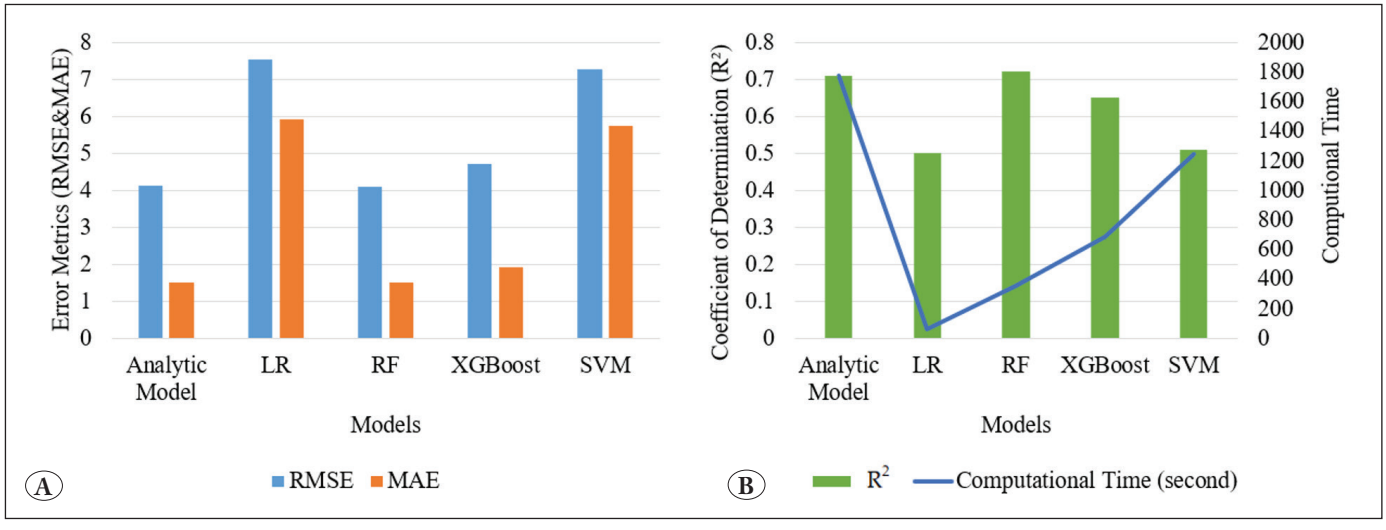


Figure 4. Performance comparison of regression models: (a) error metrics (RMSE and MAE); (b) coefficient of determination (R^2) and computational time.

of the performance between different modeling strategies in the prediction of energy consumption in electric vehicles. Ultimately, the findings reveal that each approach possesses distinct strengths regarding the physical significance and predictive contribution of their respective features.

To comprehensively interpret these strengths, a dual-stage interpretability analysis was conducted: first using RF feature importance for a global ranking, followed by for a deeper look into the direction of these effects.

3.3.1. Global Feature Importance and Physical Grounding

Feature importance was determined in this section by using RF model. Because RF is based on an ensemble of decision trees, it can quantitatively assess the relative contribution of each variable towards the prediction and highlight how different factors lead to energy consumption.

The feature importance rankings are presented in Figure 5.

The analysis reveals that Acceleration, Timestamp (s), and Elevation Smoothed (m) are the top features for energy consumption prediction. This indicates that energy usage is essentially determined by the vehicle motion dynamics characterized by speed variations and road topography.

Acceleration (0.281) has the highest importance, which indicates that sudden accelerations or decelerations strongly raise the energy demand due to increased motor torque and power. Consequently, this feature represents the impact of driver behavior -such as aggressive driving or frequent speed changes—on overall energy efficiency.

Timestamp (0.276) shows high importance as it serves as a critical proxy for temporal dynamics and maintains consistency between the analytical and data-driven models. Physically, the timestamp provides the temporal basis for calculating derivatives such as acceleration (dv/dt), a core component of vehicle dynamics equations (Polymeni et al., 2026). Furthermore, as highlighted by Abd El-Latif & El-dosuky (2025), the inclusion of temporal features allows the model to capture latent patterns such as traffic flow conditions and cumulative battery discharge trends that are not explicitly represented by instantaneous sensors.

To ensure that the high importance of the Timestamp feature did not stem from data leakage or simple indexing, an ablation study was conducted by re-training the RF model without this variable. The results showed only a minimal performance decrease, with the RMSE increasing from 4.102 to 4.114, the MAE rising from 1.510 to 1.515, and the R^2 value slightly decreasing from 0.71 to 0.70. This marginal change confirms that the model effectively relies on the underlying physical relationships (speed, torque, and topography) rather than a temporal bias, validating the integrity and generalization capability of the proposed predictive framework.

Elevation Smoothed (0.263) represents road topography. The rise of potential energy demand when the vehicle is on an

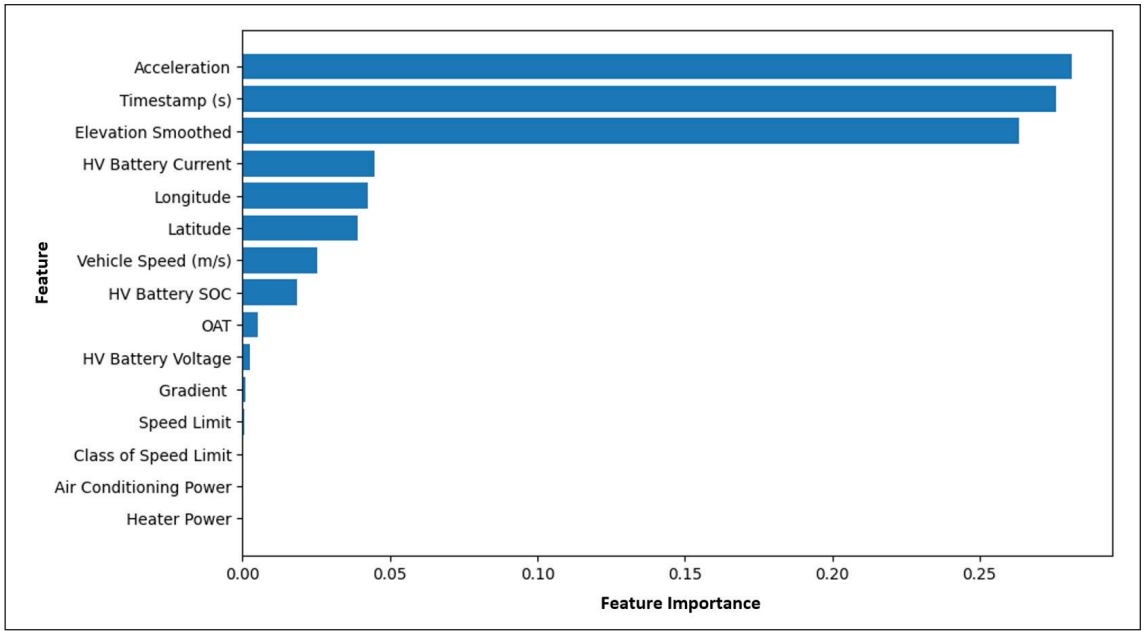


Figure 5. Relative importance of input features in predicting electric vehicle energy consumption using RF model.

uphill climb increases total energy consumption directly. This corresponds to the analytical model, which also incorporates road gradient as one of the explanatory variables. Among the lower-ranked variables, *HV Battery Current* (0.045) and *Longitude/Latitude* (≈0.04) still provide meaningful contributions. The battery current directly reflects instantaneous power draw, while spatial variables indirectly capture route characteristics that influence energy use, such as urban versus highway driving. *Vehicle Speed* (0.025) remains an essential factor in energy consumption; however, since its derivative effect is captured by the acceleration feature, its relative contribution within the model is lower. On the other hand, variables such as *OAT* (0.005), *HVAC power consumption* (≈0.0001), and *Speed Limit* parameters (≈0.0003–0.0006) have low importance, suggesting that, in the current dataset, driving dynamics and road topography play a more dominant role in determining energy demand. However, under long-term or seasonal analyses, the influence of environmental and auxiliary load variables may become more pronounced.

The analytical model, even though fully based on interpretable fundamental physical parameters such as speed, mass, and gradient, achieved an R^2 of 0.71. Thus, the results strongly support that physically interpretable variables are of utmost importance to explain the energy consumption of the vehicle. However, the model's inability to explicitly incorporate factors such as HVAC power, battery thermal behavior, or speed limit categories leads to deviations under varying driving or environmental conditions. ML methods particularly RF and XGBoost address these limitations by learning from high-dimensional data and capturing complex nonlinear interactions. Nevertheless, even in these data-driven approaches, physical variables such as acceleration, gradient, and speed remain the dominant predictors. This emphasizes that physically grounded parameters serve as the core explanatory components of accurate energy prediction models, even when combined within broader data-driven frameworks.

Overall, the physically meaningful features serve as a fundamental determinant of electric vehicle energy consumption, but their integration with data-driven learning techniques greatly enhances accuracy and the generalization capability of the model. In this context, feature-based inference can be seen as a bridge between physics-based interpretability and the flexibility of ML. While RF provides a robust global importance ranking, a more advanced SHAP analysis was also employed in order to quantitatively examine the impact of each variable and identify the directional effects on the predictions. These analyses help validate the hybrid physics-informed and data-driven models, which can achieve superior accuracy and adaptability to diverse driving conditions.

3.3.2. SHAP-Based Interpretability Analysis

Unlike traditional feature importance methods, SHAP analysis provides both magnitude and direction of feature contributions, allowing a more comprehensive interpretation of the model. While RF provides a global ranking based on impurity reduction, SHAP offers a more nuanced view by calculating the additive contribution of each feature to the final prediction. Figure 6 presents the SHAP-based interpretability analysis of the proposed model. Figure 6(a) shows the SHAP summary (beeswarm) plot, which illustrates both the magnitude and direction of each feature's contribution to the model output, while Figure 6(b) provides the global feature importance based on mean absolute SHAP values.

As shown in Figure 6(b), *Acceleration* is the most influential feature, consistent with the RF results. However, a notable difference emerges in the ranking of spatial variables (*Longitude* and *Latitude*) and battery-related parameters. This indicates that the model predictions are primarily driven by driving dynamics and geographical information. Specifically, while RF emphasized the temporal continuity via the *Timestamp* and vertical dynamics via *Elevation*, SHAP highlights the horizontal spatial context (*Longitude/Latitude*) and battery states (*SOC, Voltage*) as more decisive for individual prediction adjustments.

The SHAP summary plot in Figure 6(a) provides further insight into the direction and distribution of feature effects. The high spread of SHAP values for *Acceleration* confirms its dominant role, where high acceleration values (red points) typically lead to a significant positive contribution to energy consumption. Features such as *Longitude* and *Latitude* show a wide spread of SHAP values, indicating strong and non-linear relationships with the target variable. The presence of both positive and negative SHAP values for these features suggests that their effect on the prediction is context-dependent and varies across different observations.

The contrast between RF and SHAP rankings is particularly evident for the *Elevation Smoothed* feature. In RF, *Elevation* is ranked third due to its global correlation with energy demand in hilly terrains; however, SHAP identifies it as a secondary contributor compared to instantaneous battery

currents and spatial identifiers. This suggests that while topography is a significant global factor, the model's local decisions are more heavily influenced by the immediate energy draw and geographical location.

Battery-related variables generally have SHAP values clustered around zero with moderate spread, indicating a consistent but less dominant influence. Notably, SHAP analysis reveals that lower SOC values and higher HV Battery Currents are positively correlated with increased predicted energy consumption, a relationship that is not explicitly visible in standard RF importance charts. On the other hand, features such as Air Conditioning Power and Heater Power are concentrated near zero, confirming their minimal contribution to the model.

Overall, the SHAP analysis complements the RF findings by providing a directional and more localized perspective. It reveals that the proposed model relies predominantly on dynamic and spatial features, while auxiliary system variables have a limited effect. These findings enhance the interpretability of the model by clearly identifying both the most influential features and the nature of their contributions to the prediction process.

4. Conclusion and Suggestions

This study investigated the determinants of EV energy consumption by systematically comparing a physics-based analytical model with various ML techniques. The research focused on establishing a balance between the interpretability of physical laws and the predictive power of data-driven algorithms.

Experimental results demonstrate that the RF model and the proposed analytical model provide the most robust performances, with RF achieving the highest accuracy by effectively capturing the nonlinear interactions within the EVED dataset. A key finding of the study is the strong alignment between physical principles and ML outputs. The high explanatory power (R^2 = 0.71) of the analytical model, which relies solely on fundamental dynamics, confirms that energy consumption is primarily governed by observable physical variables. The ML models further enhanced this baseline by integrating high-dimensional features such as HVAC loads and battery states, which are traditionally difficult to represent in closed-form analytical equations.

Interpretability analyses, conducted through both RF-based global importance and SHAP-based directional evaluation,

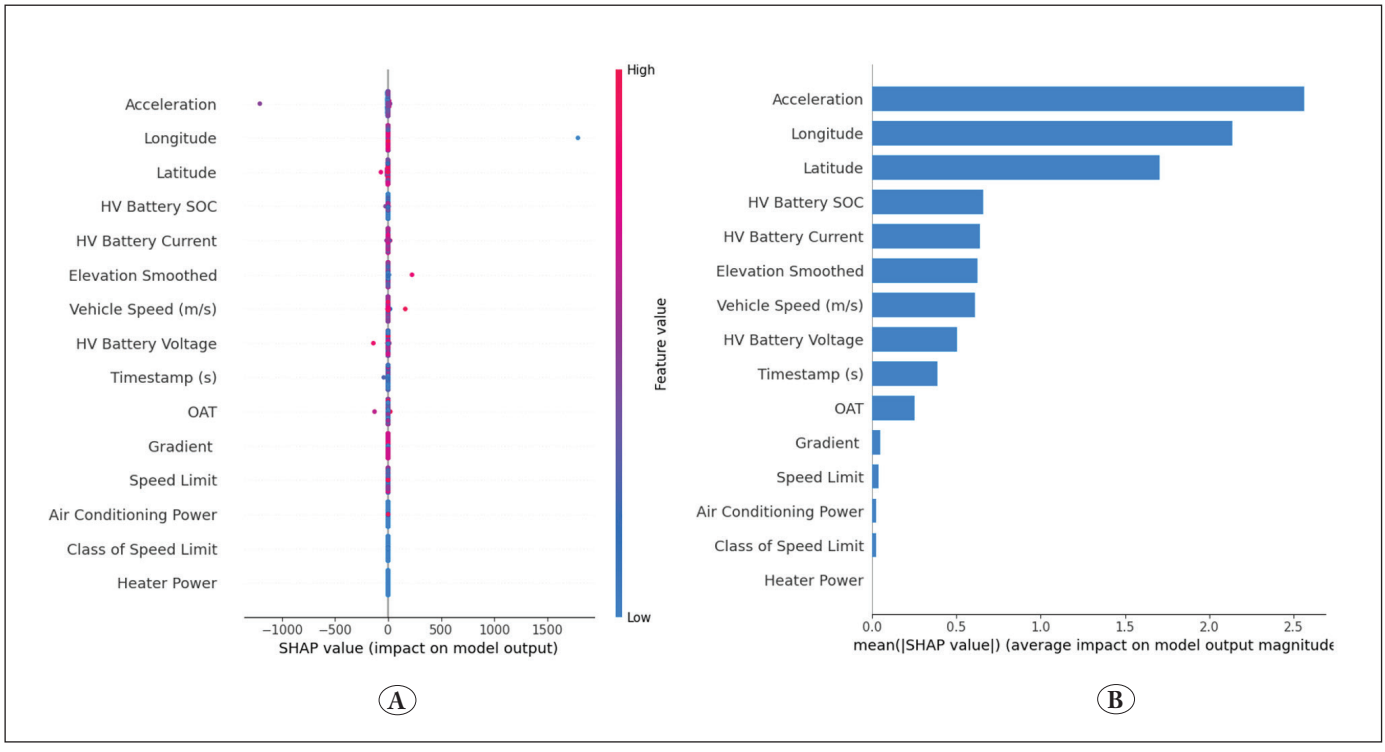


Figure 6. SHAP-based model interpretability: (a) summary plot showing the impact and direction of each feature on model output, (b) global feature importance measured by mean absolute SHAP values.

identified Acceleration, Timestamp, and Elevation as the primary drivers of energy demand. The significance of the Timestamp was further validated through an ablation study, which revealed only a marginal performance degration (a 0.29% increase in RMSE and a 0.33% increase in MAE) upon its removal. The R^2 value remained stable at 0.70-0.71, thereby confirming that the model effectively relies on the underlying vehicle dynamics rather than temporal indexing. Furthermore, SHAP analysis provided deeper insights into the directional impact of these features, revealing how instantaneous driving behaviors and spatial contexts non-linearly influence energy consumption across diverse driving scenarios.

Despite these contributions, the study has certain limitations. The findings are based on a specific geographical region and vehicle dataset, which may limit immediate generalizability to diverse climates or different EV architectures. Additionally, while the models capture short-term dynamics, long-term factors such as battery degradation and inter-driver variability were not within the scope of this analysis.

Future research will focus on extending this hybrid framework to larger, multi-regional datasets and exploring deep learning architectures, such as LSTMs, to better capture long-term temporal dependencies. In conclusion, this work demonstrates that a dual strategy—coupling analytical modeling with interpretable ML—not only improves predictive accuracy but also ensures that the results remain physically grounded, providing actionable insights for energy-efficient route planning and sustainable transportation management.

Acknowledgments: There are no conflicts of interest among the authors.

Author Contributions: Author Pınar Kıramanlıoğlu: Data curation, Writing – original draft, Methodology, Formal analysis. Author Begüm Erol: Conceptualization, Software, Methodology, Writing – review & editing. Author Mehmet Mutlu Yenisey: Supervision, Conceptualization, Writing – review & editing.

Ethics Committee Approval: There is no need to approved by Ethics committee.

References

Abd El-Latif, E. I., & El-dosuky, M. (2025). Explainable energy consumption and speed prediction in sustainable cities using deep learning. *Neural Computing and Applications*, *37*(8), 6233-6249. https://doi.org/10.1007/s00521-024-10850-7

Aslan, E. (2024). Elektrikli araçların enerji tüketimini tahmin etmede makine öğrenimi algoritmalarının performanslarının karşılaştırılması. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *14*(2), 518–530. https://doi.org/10.21597/jist.1448216

De Cauwer, C., van Mierlo, J., & Coosemans, T. (2015). Energy consumption prediction for electric vehicles based on real-world data. *Energies*, *8*(8), 8573–8593. https://doi.org/10.3390/en8088573

Huang, Y.-W., Prehofer, C., Lindskog, W., Puts, R., Mosca, P., & Kauermann, G. (2024). Predictive energy management for battery electric vehicles with hybrid models. *arXiv preprint*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.10984

Hussain, I., Ching, K. B., Uttraphan, C., Tay, K. G., & Noor, A. (2025). Evaluating machine learning algorithms for energy consumption prediction in electric vehicles: A comparative study. *Scientific Reports*, *15*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-025-94946-7

Janpoom, K., Suttakul, P., Achariyaviriya, W., Fongsamootr, T., Katongtung, T., & Tippayawong, N. (2023). Investigating the influential factors in real-world energy consumption of battery electric vehicles. *Energy Reports*, *9*, 316–320. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.10.012

Kilic, S. (2013). Linear regression analysis. *Journal of Mood Disorders*, *3*(2), 90. https://doi.org/10.5455/jmood.20130624120840

Ramoliya, F., Trivedi, C., Darji, K., Kakkar, R., Gupta, R., Tanwar, S., Polkowski, Z., Alqahtani, F., & Tolba, A. (2024). ML-based energy consumption and distribution framework analysis for EVs and charging stations in smart grid environment. *IEEE Access*, *12*, 23319–23337. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3365080

Rathore, H., Meena, H. K., & Jain, P. (2023). Prediction of EV energy consumption using random forest and XGBoost. *Proceedings of the 2nd International Conference on Power Electronics and Energy (ICPEE 2023)*. IEEE. pp. 1-6, India. https://doi.org/10.1109/ICPEE54198.2023.10060798

Polymeni, S., Spanos, G., Pitsiavas, V., Lalas, A., Votis, K., & Tzovaras, D. (2026). Analyzing energy consumption in battery electric vehicles: A statistical-based approach. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, *12(1),* 529-541 https://doi.org/10.1109/TTE.2025.3618308

Şahin, D. Ö., Çandırlı, M., Erşen, A., & Akar, M. H. (2025). Elektrikli araba veri kümesi üzerinde makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmaları kullanarak şarj durumu tahmini. *Mühendis ve Makina*, *66*(719), 361–387. https://doi.org/10.46399/muhendismakina.1728570

Shen, H., Zhou, X., Yu, A., Lamantia, M., Chen, P., & Wang, J. (2023). An experimental comparison of physics-based and machine-learning-based electric vehicle energy consumption estimation methods. *IFAC-PapersOnLine*, *56*, 8672–8677. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.045

Teimoori, Z., Yassine, A., & Lu, C. (2024). Deep transfer learning for detecting electric vehicles highly correlated energy consumption parameters. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence, 5(8),* 4087–4100. https://doi.org/10.1109/TAI.2024.3358796

The Engineering Toolbox. (2013). Rolling friction resistance. Available at: http://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html (Accessed: 15 November 2013).

Wu, X., Freese, D., Cabrera, A., & Kitch, W. A. (2015). Electric vehicles' energy consumption measurement and estimation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *34,* 52–67. https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.10.007

Yılmaz, H., & Yagmahan, B. (2024). Electric vehicle energy consumption prediction for unknown route types using deep neural networks by combining static and dynamic data. *Applied Soft Computing*, 167. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.112336

Zhang, S., Fatih, D., Abdulqadir, F., Schwarz, T., & Ma, X. (2022). Extended vehicle energy dataset (eVED): An enhanced large-scale dataset for deep learning on vehicle trip energy consumption. *arXiv preprint*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.08630v

Zhang, T., Peng, Q., & Zeng, S. (2025). Predicting EV charging demand in renewable-energy-powered grids using explainable machine learning. *Sustainability (Switzerland)*, *17(9).* https://doi.org/10.3390/su17094158

Zhu, Q., Huang, Y., Lee, C. F., Liu, P., Zhang, J., & Wik, T. (2025). Predicting electric vehicle energy consumption from field data using machine learning. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, *11(1),* 2120–2132. https://doi.org/10.1109/TTE.2024.3416532

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi
Dergi web sayfası: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen
DOI: 10.7212/karaelmasfen.1849674

Araştırma Makalesi
Geliş tarihi / Received : 26.12.2025
Kabul tarihi / Accepted : 09.02.2026

Zonguldak Kömüründen Üretilen Aktif Karbonların Yüzey Alanı ve Gözenek Boyutunun H_2 Adsorpsiyonu İle İlişkisinin Araştırılması

Investigation of The Relationship Between Surface Area and Pore Size Of Activated Carbons Produced From Zonguldak Coal And H_2 Adsorption

Atakan Toprak

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Çaycuma Gıda ve Tarım MYO, Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri, Zonguldak, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, artan küresel enerji gereksinimi ve çevre kirliliğine karşı temiz bir enerji kaynağı olarak hidrojenin verimli bir şekilde depolanması için Zonguldak kömüründen farklı gözenek ve yüzey özelliklerine sahip aktif karbonların geliştirilmesi ve optimizasyonu yapılmıştır. Deneysel aşamada, kül içeriği giderilen kömür numunesi H_3PO_4 ile impregne edilerek 800˚C ve 900˚C sıcaklıklarda N_2 ve N_2-H_2O buharı altında iki farklı yöntemle aktivasyon işlemi ile aktif karbonlar üretilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, H_2O buharı aktivasyonunun yüzey alanı ve gözenek özelliklerinin geliştirmede etkili bir yöntem olduğu göstermiştir. En yüksek BET yüzey alanı ve mikro gözenek hacmi H900-H_2O numunesinde elde edilmiştir. 77 K ve 1 atm'de H_2 depolama kapasitesi ağırlıkça %1.58 ile H900-H_2O numunesinde elde edilmiştir. H_2 adsorpsiyonunun yüzey alanı ve mikro gözenek boyutları ile arasındaki korelasyon çalışmalarına göre, H_2 adsorpsiyon kapasitesinin BET yüzey alınından ziyade belirli gözenek boyutlarıyla ilişkili olduğunu belirlenmiştir. Özellikle aktif karbonların 5-10 Å aralığındaki ultra mikro gözenek hacmi ile H_2 kapasitesi arasında belirleme katsayısı (R^2) 0.999 gibi oldukça yüksek bir doğrusal ilişki tespit edilmiştir. Sonuç olarak, kömürlere uygulanan hibrit (fiziksel ve kimyasal) aktivasyon yönteminin, H_2 depolama için ideal olan ultra mikro gözenekli yapının oluşturulmasında son derece etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Elde edilen H_2 adsorpsiyon sonuçlarının literatürdeki COF-102, ZIF-8 ve MOF-5 gibi bazı gelişmiş gözenekli yapılar ile rekabet edebildiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aktif karbon, Hidrojen depolama, H_2O aktivasyonu, kömür, ultra mikro gözenek

Abstract

In this study, the development and optimization of activated carbons with varying pore and surface properties derived from Zonguldak coal were conducted to efficiently store hydrogen as a clean energy source, addressing the increasing global energy demand and environmental pollution. In the experimental section, activated carbons were produced by impregnating coal samples with ash content removed using H_3PO_4, and then activating them at 800˚C and 900˚C under N_2 and N_2-H_2O vapor, using two different methods. According to the results, H_2O vapor activation was shown to be an effective method for improving surface area and pore properties. The highest BET surface area and micropore volume were obtained in the H900-H_2O sample. The H_2 storage capacity at 77 K and 1 atm was obtained in the H900-H_2O sample, which contained 1.58% by weight of H_2. According to the correlation studies between H_2 adsorption and surface area and micropore size, it was determined that the H_2 adsorption capacity is related to specific pore sizes rather than the BET surface area. Specifically, a very high linear relationship of correlation coefficient (R^2) 0.999 was found between the ultra-micropore volume (5-10 Å range) of activated carbons and their H_2 capacity. Consequently, it was concluded that the hybrid (physical and chemical) activation method applied to coals is highly effective in creating the ultra-micropore structure ideal for H_2 storage. It was determined that the obtained H_2 adsorption results were competitive with those of some advanced porous structures reported in the literature, such as COF-102, ZIF-8, and MOF-5.

Keywords: Activated carbon, hydrogen storage, H_2O activation, coal, ultra micropore.

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: atakantoprak@beun.edu.tr

Atakan Toprak orcid.org/0000-0003-0008-1456

Bu eser "Creative Commons Alıntı-GayriTicari-4.0 Uluslararası Lisansı" ile lisanslanmıştır.

1. Giriş

Artan küresel enerji gereksinimi ve fosil yakıt kullanımı nedeniyle meydana gelen çevre kirliliği, alternatif enerji kaynakları üzerinde kapsamlı araştırmaların yapılmasına yol açmıştır. Bu araştırmaların en başında gelen Hidrojen (H_2), birim başına yüksek enerji yoğunluğuna sahip, hafif ve temiz bir enerji kaynağıdır. Ancak H_2 uygulanabilir bir enerji çözümü haline gelebilmesi için yeterli ağırlıkça depolama veya gravimetrik H_2 depolama kapasitesine ihtiyacı vardır (Edwards vd., 2020). Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa'daki Enerji Bakanlıkları, 2025 yılına kadar H_2 depolama sistemleri için belirli hedefler belirlemiştir. Bu hedefler 40 kg/m^3 hacimsel yoğunluk ve %5.5 gravimetrik yoğunluk olarak belirlenmiştir (Kumar vd., 2024).

H_2'nin teorik gravimetrik enerji yoğunluğu, geleneksel yakıtlara göre 120 MJ/kg ile olağanüstü yüksek olsa da, düşük hacimsel enerji yoğunluğu sebebiyle verimli depolama çözümlerini gerektirmektedir (Rivard vd., 2019; Samantaray vd., 2021). H_2'nin gaz silindirlerinde sıkıştırma ve kriyojenik tanklarda sıvılaştırma gibi geleneksel H_2 depolama yöntemleri, sıkıştırma için düşük hacimsel enerji yoğunluğu ve sıvılaştırma için ise yüksek enerji tüketimi gibi önemli dezavantajlardan mustariptir. Bu nedenle, araştırmalar metal hidritler, metal-organik çerçeveler (MOF'lar) ve nanoyapılı karbonlar gibi katı malzemeler üzerinde emilim veya adsorpsiyon dahil olmak üzere alternatif stratejilere odaklanmıştır (Masika & Mokaya, 2012; Ramírez-Vidal vd., 2021). Bunlar arasında, aktif karbon gibi gözenekli malzemeler üzerine fiziksel adsorpsiyon, tersinir olması, hızlı kinetiği ve zayıf van der Waals etkileşimleri yoluyla meydana gelen H_2 adsorpsiyonu ve desorpsiyonu için nispeten düşük enerji gereksinimleri nedeniyle özellikle ilgi çekicidir (López vd., 2025).

Aktif karbonlar ile yapılan H_2 depolama çalışmalarında, ortam sıcaklığına yakın sıcaklıklarda ağırlıkça %1-2 oranında, kriyojenik sıcaklıklarda ve yüksek basınçlarda ise ağırlıkça %5-7 oranına ulaştığını görülmüştür (Yang vd., 2023). Yüksek yüzey alanlı ve mikro gözenekli bu aktif karbonlar kömür, odun, turba, tarımsal atıklar ve polimerler gibi çeşitli karbon içerikli başlangıç malzemelerinden üretilmektedir. Aktif karbonların ayarlanabilir gözenek yapıları, kriyojenik sıcaklıklarda fiziksel adsorpsiyon yoluyla H_2 kapsitesini artırmak için çok önemlidir (Sdanghi vd., 2020). Aktif karbonlar içindeki özellikle mikro gözenek dağılımı, H_2 depolama performansını etkileyen faktörlerin başında gelmektedir. Mikro gözenek yapıları, hem H_2 molekülleri için adsorpsiyon bölgelerinin erişilebilirliğini hem de bunların gelişmiş afinitesini belirlemede önemli bir rol oynamaktadırlar (Huang vd., 2018). Yapılan çalışmalarda, benzer yüzey alanlarına sahip malzemeler H_2 depolama kapasitesini artırmada birincil etkenin yüzey alanından ziyade gözenek boyut ve dağılımının olduğu ve ultra mikro gözeneklerin (1 nm<) verimliliği önemli ölçüde etkilediği vurgulanmıştır (Masika & Mokaya, 2012). H_2 molekülü ile ultramikro gözenekli karbonlar arasındaki van der Waals etkileşimleri, özellikle de 0.5-0.7nm aralığında etkili olduğu belirlenmiştir (Vergara-Rubio vd., 2022). Bu etkileşimler, H_2-adsorban afinitesini önemli ölçüde artırmakta ve adsorpsiyon ısısını yükseltmektedir. Bu tür ultramikro gözenekler, özellikle 1MPa'nın altındaki düşük basınçlarda ve 77K civarındaki sıcaklıklarda önemli H_2 adsorpsiyonu depolamada gereklidir (Sdanghi vd., 2020; Naheed vd. 2021). Bu durum, H_2 depolanmasının en üst düzeye çıkarmak ve pratik depolama yoğunluklarına ulaşmak için aktif karbonun mikro gözenek özelliklerinin geliştirilmesi gerektiği anlamına gelir (Ramesh vd., 2015). Diğer taraftan mezo gözenekliliğe sahip aktif karbonlar genellikle H_2 adsorpsiyon performansını olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Bazı çalışmalarda, 1.5-2.5 nm arasındaki küçük mezo gözeneklerin özellikle yüksek basınçlarda H_2 depolamasına katkıda bulunabileceğini belirlenmişse de, mezo gözeneklerin mikro gözeneklere kıyasla H_2 depolamasında çok az katkıda sağladığı anlaşılmıştır (Gogotsi vd., 2009). Yaklaşık 1.5 nm'den daha büyük gözenekler H_2 adsorpsiyonunda minimum düzeyde katkıda bulunsa da, 2.5 nm'yi aşan mezo gözenekler genellikle H_2 depolamasına hiç katkıda bulunmadığı düşünülmektedir. Mezo gözeneklerin H_2 adsorpsiyonundaki bu azalan verimliliği, daha zayıf van der Waals etkileşimlerinin olması ve bununla birlikte H_2 molekülleri için adsorpsiyon bölgelerinde afinitesinin azalması ve sonuç olarak genel depolama kapasitesini düşmesiyle sonuçlanmaktadır (Huang vd., 2018).

Literatürde çok sayıda çeşitli başlangıç malzemelerinden türetilen aktif karbonların H_2 adsorpsiyonu çalışmaları incelemiştir. Ramesh ve arkadaşları, demirhindi tohumlarından mikrodalga ve KOH kimyasal aktivasyonu ile aktif karbonlar üretmiş ve 1785m^2/g'lık yüksek bir yüzey alanı, 0.94cm^3/g'lık bir mikro gözenek hacmi ve yaklaşık 0.8-1.1nm arasında değişen gözenek boyutları bildirmişlerdir. Bu karbonlar, oda sıcaklığında ve 4 MPa basınçta maksimum ağırlıkça %4.73 H_2 depolama kapasitesi göstermiştir ve bu da ABD Enerji Bakanlığı'nın hedefinin yaklaşık %80'ine ulaşmışlardır (Ramesh vd., 2015). Benzer şekilde Sultana vd. kapsamlı literatür çalışmasında, tipik olarak 10 Å'nin altında ultra mikro gözenekler ve 1.5 cm^3/g'ı aşan mikro gözenek

hacimlerine sahip aktif karbonlar, H_2 adsorpsiyonunu en üst düzeye çıkarmak için ideal olarak tanımlanmışladır (Sultana vd., 2021). Mısır koçanından elde edilen aktif karbon üzerine 77K'de hem düşük hem de yüksek basınçta H_2 depolama çalışmasında, 1 bar'da ağırlıkça %3.21 kapasite sergilerken, 40bar'da ağırlıkça %5.80 kapasiteye çıktığı belirlenmiştir (Liu vd., 2014). Biokütle atığından elde edilen aktif karbonun oksijen ve azot gibi yüzey modifikasyonları, üstün gözenek boyutları ve hacimlerinin geliştirilmesi sayesinde 77K ve 1 bar'da ağırlıkça %2.62 H_2 adsorpsiyonuna ulaşarak depolama kapasitesini daha da artırdığı görülmüştür (Anuchitsakol vd., 2023). Sonuç olarak, elde edilen bulgular H_2 depolama kapasitesini ultra mikro gözeneklerin hacmiyle doğrudan ilişkili olduğu ve iyi gelişmiş mikro gözenekli yapıların H_2 depolama kapasitesini artırmadaki kritik rolünü göstermektedir (Texier-Mandoki vd., 2004).

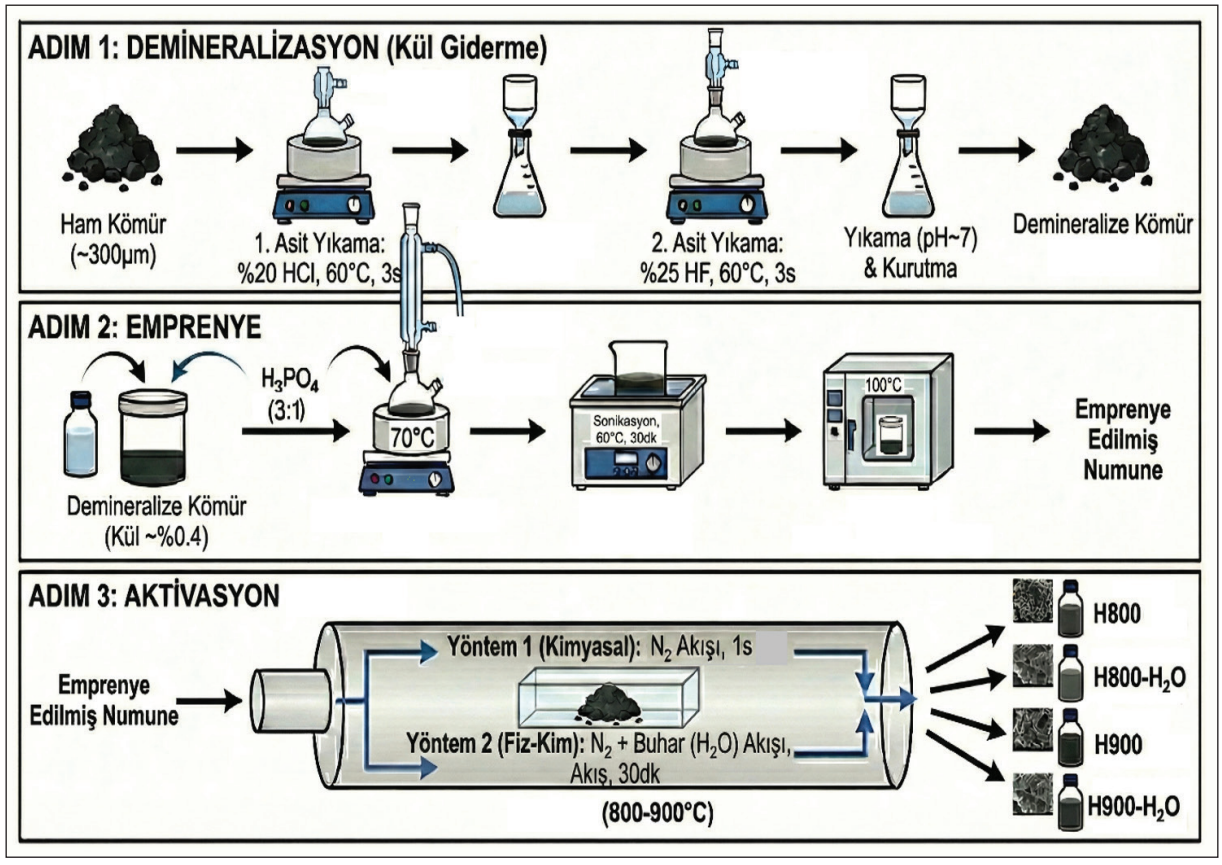
Bu çalışmanın amacı, Zonguldak kömürden elde edilen aktif karbonun mikro gözenek boyut dağılımının H_2 adsorpsiyon kapasitesi üzerindeki etkisini araştırmak ve böylece gelişmiş depolama performansı için optimum gözenek özelliklerini belirlemektir.

Bu çalışmanın temel amacı, Zonguldak kömüründen elde edilen aktif karbonların gözenek boyutu dağılımı ile H_2 adsorpsiyon kapasitesi arasındaki ilişkiyi sistematik olarak araştırmaktır. Bu kapsamda, külü giderilen kömür numuneleri H_3PO_4 ile emprenye edilmiştir ve 800˚C ve 900˚C sıcaklıklarda N_2 ve N_2-H_2O buharı ile aktivasyon uygulanarak farklı yüzey özelliklerine sahip aktif karbonlar sentezlenmiştir. Çalışma, özellikle ultra mikro gözenek hacminin (5-10Å) H_2 depolaması arasındaki belirleyici etkiyi ortaya koymayı ve bu parametreler arasındaki korelasyonu literatürdeki gelişmiş gözenekli yapılarla karşılaştırmalı olarak değerlendirmeyi hedeflemektedir.

2. Gereç ve Yöntem(ler)

2.1. Kömürden Aktif Karbon Üretimi

Aktif karbon üretimi daha önce bildirilen metoda göre gerçekleştirilmiştir (Toprak, 2020). Bu yönteme göre kısaca Şekil 1'de gösterildiği gibi, birinci basmakta yaklaşık 300 µm boyutuna getirilen Zonguldak kömürünün inorganik içeriğinin giderilmesi amacıyla sırasıyla 60˚C'de %20 HCl ile 3saat (sa) muamele edildi. Devamında aynı işlem %25'lik HF ile gerçekleştirilmiştir. Her asit işleminden sonra nu-



Şekil 1. Aktif karbon üretim şeması.

mune pH~7 olana kadar yıkanıp kurutulmuştur. Bu sayede kömürün kül içeriği yaklaşık %0.4'e kadar düşürülmüştür. İkinci basamakta, külü giderilmiş kömür ağırlıkça 3:1 oranında H_3PO_4 ile 70°C'de geri soğutucu altında 2sa karıştırılmıştır. Ardından 60°C'de 30 dakika (dk) sonikasyon ile iyice homojenizasyon ve 100°C'de bir gece kurutularak emprenye ürün elde edilmiştir. Üçüncü basamakta emprenye edilen örnek, tüp fırında 800 ve 900°C sıcaklıklarda iki farklı yöntemle aktive edilmiştir. Binci yöntemde, sadece N_2 akışı altında 1sa kimyasal aktivasyon ile H800 ve H900 elde edilmiştir. İkinci yöntemde ise 800 ve 900°C sıcaklıkta N_2 ve H_2O buharı karışımı ile 30dk fiziksel ve kimyasal aktivasyon birlikte gerçekleştirilerek H800-H_2O ve H900-H_2O üretilmiştir. Elde edilen numunelere H_3PO_4 kalıntılarını uzaklaştırmak için sıcak saf su ile pH 7 olana kadar yıkama işlemleri gerçekleştirilmiştir.

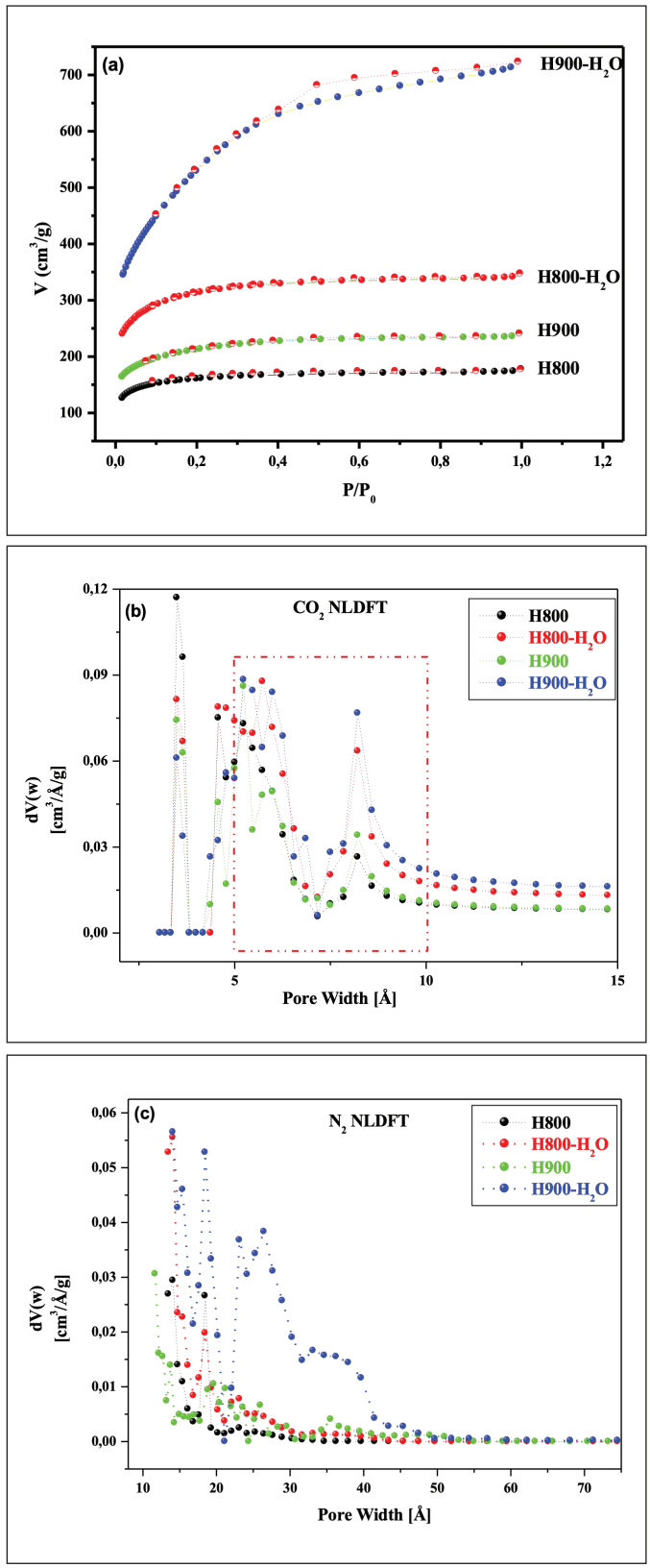
2.2. Karakterizasyon

Elde edilen aktif karbonların kapsamlı fiziksel ve yapısal özellikleri, Quantachrome AS 1C otomatik gaz adsorpsiyon cihazı kullanılarak belirlendi. Bu cihaz, 77 K'de N_2 ve H_2, 273 K'de CO_2 adsorpsiyon-desorpsiyon izotermlerini, bağıl basıncın (P/P_0) 0.01-0.995 arasında kullanılmıştır. Tüm gaz adsorpsiyon ölçümlerinden önce, AC numuneleri, gözenek yapısından adsorbe edilmiş nemi veya uçucu kirleticileri gidermek için 150°C'de vakum altında 2 saat kurutma işleminden geçirildi. 77 K'deki N_2 adsorpsiyon-desorpsiyon izotermlerinden ve 273 K'deki CO_2 adsorpsiyon izotermlerinden, Brunauer-Emmett-Teller (BET) yüzey alanı, gözenek boyutu dağılımları, mikrogözenek hacmi (V_{micro}) mezogözenek hacmi (V_{meso}) ve toplam gözenek hacmi (V_T) belirlendi. Detaylı yüzey morfolojisi ve elementel bileşim analizi için, Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDS) ile donatılmış FEI QUANTA FEG 450 Taramalı Elektron Mikroskobu kullanıldı.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Aktif Karbonların Yüzey Alanı ve Gözenek Yapıları

Şekil 2a-c'de sentezlenen H800-900 ve H800-900-H_2O aktif karbonların 77 K N_2 adsorpsiyon-desorpsiyon izotermleri, gözenek boyut dağılımları ve 273 K'de CO_2 mikro gözenek boyut dağılımları detaylı bir şekilde karakterize edilmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 1'de verilmiştir. Şekil 2a, 77 K'de N_2 adsorpsiyon-desorpsiyon izoterminde tüm numuneler, IUPAC sınıflandırmasına göre mikro gözenekli malzemeler için karakteristik olan Tip I izotermleri sergilemektedir (Gregg & Sing, 1991). Düşük P/P_0 (< 0.1)'daki adsorbe edilen N_2 hacimdeki keskin bir artış, ya-



Şekil 2. Aktif karbonların (a)77K N_2 adsorpsiyon-desorpsiyon izotermleri, (b) 273 K'deki CO_2 NLDFT gözenek boyut dağılımları ve (c) 77 K N_2 NLDFT gözenek boyut dağılımları.

Çizelge 1. Aktif karbonların yüzey alanı, gözenek hacmi ve H_2 adsorpsiyon kapasiteleri

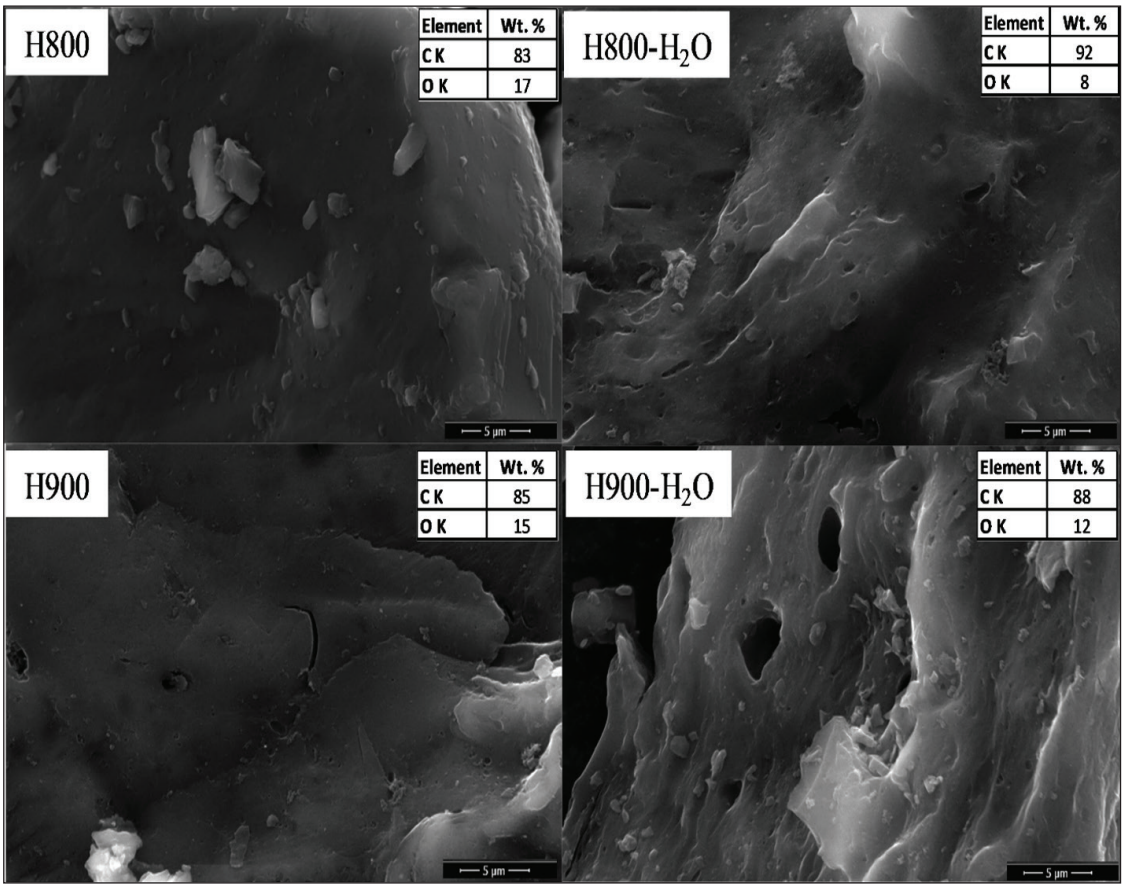
Örnekler	BET Yüzey Alanı (m^2/g)	Gözenek Hacmi (NLDFT, cm^3/g)			H_2 kapasite (1 atm, 77K, %wt.)
		V_{N2} < 20Å	5Å < V_{CO2} < 10Å	V_{CO2} < 10Å	
H800	610	0.228	0.122	0.20	1.12
H800-H_2O	1175	0.417	0.193	0.27	1.43
H900	790	0.278	0.104	0.18	1.05
H900-H_2O	1880	0.572	0.223	0.28	1.58

pıdaki mikro gözeneklerin hızlı bir şekilde dolduğunu ifade etmektedir. Özellikle, H_2O buharı ile aktive edilen H800-H_2O ve H900-H_2O, özellikle en yüksek adsorpsiyon kapasitesini gösteren H900-H_2O, H800 ve H900 kıyasla önemli ölçüde daha yüksek N_2 adsorpsiyonu göstermişlerdir. Ayrıca P/P_0'ın 0.4-1.0 basınç aralığında H800, 900-H_2O örneklerinde histerisin olduğu görülmektedir. Histerisin genellikle gazın mezo gözeneklere dolup boşalırken kanallarda yoğunlaşması sonucunda oluşurlar. Şekil 2a'dan hesaplanan BET yüzey alanları Çizelge 1'de verilmiştir. Buna verilere bakıldığında, H800 yüzey alanı 610 m^2/g'dan H800-H_2O'da 1175m^2/g'a yaklaşık iki kat yükselmiştir. H900 yüzey alanı 790m^2/g'dan 1880m^2/g'a 2.5 kat artırmıştır. Sıcaklığın artışıyla birlikte su buharı aktivasyonunun, yüzey alanını geliştirmede önemli ölçüde etkili olduğu görülmüştür.

Şekil 2b ve c'de gözenek yapısının daha ayrıntılı incelenmesi için, Yerel Olmayan Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi (NLDFT) modeli kullanılmıştır. Şekil 2b'de ultra mikro gözenekleri ve dar mikro gözenekleri karakterize etmek için oldukça etkili olan ve kinetik sınırlamalar nedeniyle 77K'deki N_2'ye kıyasla bu daha küçük gözenekler hakkında daha güvenilir bilgiler sunan 273 K'deki CO_2 NLDFT gözenek dağılımları gösterilmiştir (Toprak, 2020; Lozano-Castelló vd., 2004; Meng & Park, 2012). Tüm aktif karbonlar, 5-10Å aralığında belirgin gözenek hacimleri göstermektedir. Özellikle, H_2O buharı ile aktive edilmiş H800-H_2O ve H900-H_2O, 5-10Å aralığında belirgin şekilde daha yüksek gözenek hacmi katkıları sergilemektedir. Çizelge 1'deki 5Å < V_{CO2} < 10Å arasındaki gözenek hacimleri H800'de 0.122cm^3/g'den H800-H_2O'da 0.193cm^3/g'a arttığı; H900'de ise 0.104cm^3/g'dan 0.223cm^3/g'a yükseldiği görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, sıcaklığın yükselmesi ultra mikro gözenek gelişiminde katkısı olmadığı, H_2O buharı aktivasyonunu ise artırdığı anlaşılmıştır. Gözenekli adsorbentlerde 5-10Å arasındaki ultra mikro gözenekler, H_2 molekülleri ile gözenek duvarları arasındaki güçlü van der Waals etkileşimleri yoluyla H_2 depolamasını artırmak için uygun aralık olarak kabul edilmektedir (López vd., 2025; Vergara-Rubio vd., 2022). Bu sonuçlar, H_2O buharı aktivasyonunun mikro gözenekli ağı etkili bir şekilde geliştirdiği ve özellikle bu kritik ultra mikro gözeneklerin oluşumunu desteklediğini güçlü bir şekilde göstermektedir. Şekil 1c'de daha geniş mikro ve mezo gözeneklerin dağılımını gösteren 77K'deki N_2 NLDFT PSD'leri verilmiştir. H800-H_2O ve H900-H_2O daha geniş mikro gözenek bölgesinde (10-20Å) ve mezo gözenek aralığında (~40Å'a kadar) önemli ölçüde daha büyük gözenek hacimleri sergilemiştir. Bu sonuçlar, H_2O buharı aktivasyonunun yalnızca ultra mikro gözenekliliği iyileştirmekle kalmayıp, aynı zamanda daha erişilebilir ve kapsamlı bir daha geniş mikro gözenekli ve dar mezo gözenekli yapılar oluşturduğunu göstermektedir.

3.2. SEM-EDS Analizi

N_2 ve H_2O buharıyla ile sentezlenen aktif karbonların SEM görüntüleri ve EDS verileri Şekil 3'de gösterilmiştir. H800 numunesinde yüzey nispeten pürüzsüz olduğu ve gözenekli bir oluşumun sınırlı geliştiğini ifade etmektedir. H900'de sıcaklığın artması ile küçük düzensizlikler ve bazı yeni oluşan gözenekli yapılar gözlemlenmiştir. H800-H_2O'da H_2O buharı aktivasyonu ile morfolojisinde belirgin şekilde daha gözenekli ve pürüzlü hale gelmiştir. H800'e göre, gözenek açıklıklarının ve daha düzensiz bir yüzeyin ortaya çıkması, H_2O buharının 800°C'de karbon matrisiyle aşındırma reaksiyonlarını başlatan etkili bir aktive edici madde görevi gördüğünü düşündürmektedir. Bu durum H900-H_2O'da daha belirgin ve gelişmiş gözenekli yapıyı sergilemiştir. 900°C'de H_2O buharıyla birlikte yüzey yoğun bir şekilde aşındırılmış ve çeşitli boyutlarda çok sayıda iyi tanımlanmış, açık gözenek görülmüştür. H900-H_2O'da diğer örneklere göre önemli ölçüde daha pürüzlü ve daha kıvrımlıdır; bu da son derece verimli gözenek gelişimini ve artan yüzey alanını göstermektedir.



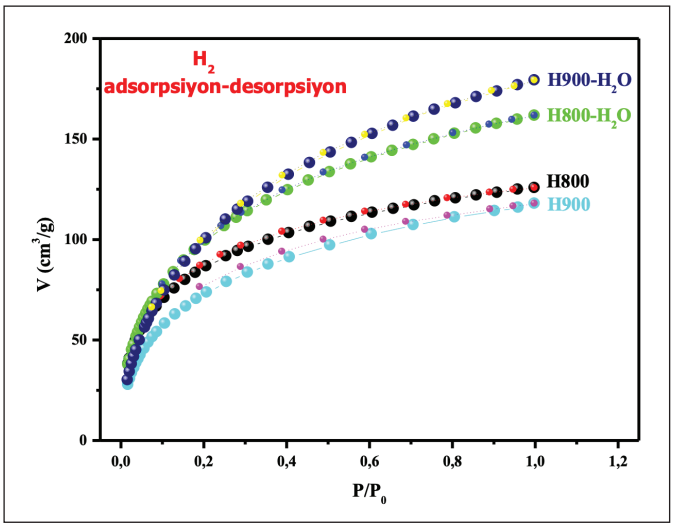
Şekil 3. Aktif karbonların SEM-EDS görüntüleri.

EDS sonuçları incelediğinde, H800-H_2O ve H900-H_2O, H800 ve H900'e kıyasla daha yüksek karbon içeriği ve daha düşük oksijen içeriği sergilemiştir. H800-H_2O oksijen içeriği %17'den H800'de %8'e önemli bir azalma gösterirken, H900-H_2O'da %15'ten H900'da %12'ye bir azalma göstermiştir. Bu durum, H_2O buharının gözenekler oluştururken aynı zamanda bazı oksijen içeren fonksiyonel grupları uzaklaştırmada ve daha karbonlu bir yüzeyin oluşabildiğini göstermiştir.

3.3. Aktif Karbonların H_2 Adsorpsiyon-Desorpsiyonu ve Gözenek İlişkisi

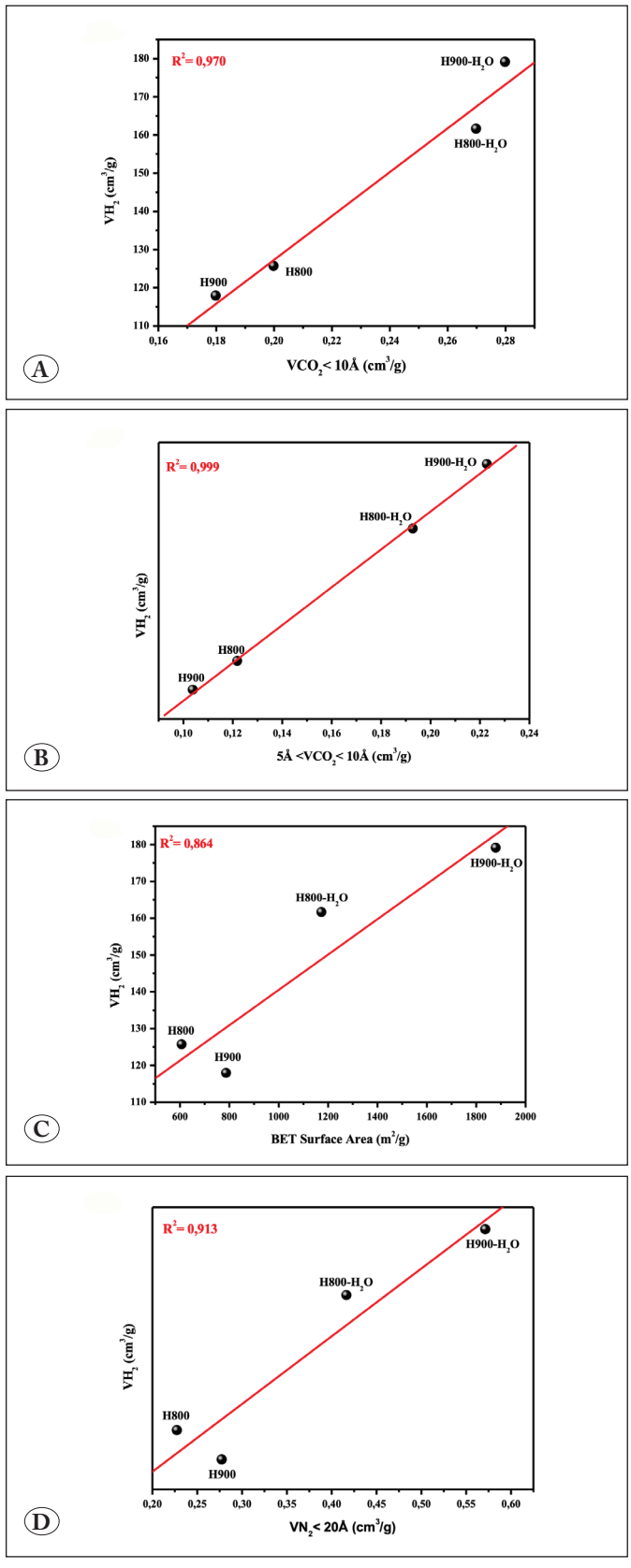
Şekil 4'de aktif karbonların 77K H_2 adsorpsiyon-desorpsiyon izotermleri verilmiştir. Bu izotermler, özellikle fiziksel sorpsiyonun etkili olduğu kriyojenik sıcaklıklarda, pratik H_2 depolama uygulamaları için adsorban malzemelerin performansını değerlendirilmesinde önemli bilgiler verir. Şekil 4'deki izotermlerinin hepsi mikro gözenekli aktif karbonların H_2 adsorpsiyonun tipik bir özelliği olan Tip I izotermini sergilemişlerdir. Aktif karbonların düşük P/P_0 (0.01-0.4) basınçlarında H_2'nin yüksek bir hacimde depoladığı ve ardından daha yüksek P/P_0'da bir plato sergilediği görülmektedir. Düşük basınçlardaki bu yüksek H_2 alımı, H_2 moleküllerinin gözenek duvarlarıyla artan van der Waals etkileşimleri nedeniyle mikro gözenekler içinde öncelikli olarak adsorbe edildiğini gösterir (Bicil & Doğan, 2021; Schaefer vd., 2016). Aktif karbonların H_2 izotermlerinin adsorpsiyon-desorpsiyonları genellikle çok az veya hiç histerezis göstermemiştir. Bu durum hızlı kinetik ve tersinir anlamına gelmektedir ve pratik depolama ve salınım uygulamaları için arzu edilen özelliklerdir (Bader & Ouederni, 2016; Kahilu vd., 2023).

Kömürden elde edilen aktif karbonlarda H_2 adsorpsiyonunu etkileyen faktörleri belirlemek amacıyla, Şekil 5 a-d'de görüldüğü gibi adsorbe edilen H_2 hacmi (VH_2, cm^3/g) ile çeşitli gözenek boyutları ve yüzey alanı gibi parametreler arasındaki ilişkiyi inceleyen ayrıntılı bir korelasyon analizi yapılmıştır. Şekil 5(a)'da, adsorbe edilen H_2 hacmi ile (VCO_2 < 10Å) küçük gözenek boyutlarına (ultra-mikro gözenek) sahip hacimlerin arasındaki korelasyonu göstermektedir. R^2 = 0.970 değeriyle güçlü bir pozitif doğrusal korelasyon gözlemlenmiştir. Şekil 5(b)'de ise 5Å < VCO_2 < 10Å arasında değiş-



Şekil 4. Aktif karbonların 77 K'deki H_2 adsrospsiyon-desorpsiyon izotermi.

şen ultra mikro gözenek hacmi ile adsorbe edilen H_2 hacmi arasındaki korelasyonu göstermektedir. Şekil 5(b)'deki korelasyon Şekil 5(a)'a göre de yüksek olup $R^2 = 0.999$ değerini elde edilmiştir. Bu yüksek korelasyon, spesifik ultra mikro gözenek aralığındaki gözenek hacminin, elde edilen aktif karbonlar için H_2 adsorpsiyon kapasitesini oldukça doğru bir şekilde tahmin ettiğini göstermiştir. Elde edilen sonuçlar, özellikle 5-10Å arasındaki ultra mikro gözeneklerin, güçlü van der Waals etkileşimleri nedeniyle H_2 depolamasını artırmak için en uygun olduğunu vurgulayan literatür ile mükemmel bir uyum içindedir (López vd., 2025; Vergara-Rubio vd., 2022). Şekil 5(c)'de, VH_2 hacmi ile BET yüzey alanı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. $R^2 = 0.864$ değeriyle iyi bir pozitif korelasyon göstermiş olmakla birlikte, ultra mikro gözenek hacimleri için gözlemlenenlerden belirgin şekilde daha düşüktür. Bu durum, yüksek yüzey alanının genel olarak H_2 adsorpsiyonu için önemli parametre olmasına rağmen, belirli mikro gözenek boyutlarının dağılımı ve hacmi kadar kritik bir belirleyici olmadığını göstermektedir. Yapılan çalışmalarda da yüzey alanından ziyade ultra mikro gözeneklerin H_2 adsorpsiyon verimliliğini önemli ölçüde artırdığı belirlenmiştir (Gogotsi vd., 2009; Masika & Mokaya, 2012). Şekil 5(d)'de, VN_2 < 20Å küçük gözenek boyutlarına sahip aktif karbonların VH_2 hacmi arasındaki korelasyonu göstermektedir. $R^2 = 0.913$ değerinde güçlü bir pozitif korelasyon gözlemlense de, ultra mikro gözenek hacimleri ile olan korelasyonlardan biraz daha az uyumludur. Bunun sebebi olarak, 7K'deki N_2 adsorpsiyonun kinetik sınırlamalardan dolayı çok dar mikro gözenekleri belirlemede eksik kalmasıdır. 273K'deki CO_2 adsorpsiyonun ultra mikro



Şekil 5. Aktif karbonların gözenek hacimleri ve BET yüzey alanları ile H_2 adsorpsiyonu arasındaki ilişkileri.

Çizelge 2. Çeşitli adsorbentlerin 77 K 1 atm'deki ağırlıkça % H_2 kapasitesi.

Numuneler	Adsorpsiyon kapasitesi (% H_2)	Kaynaklar
H800	1.12	Bu çalışma
H800-H_2O	1.43	Bu çalışma
H900	1.05	Bu çalışma
H900-H_2O	1.58	Bu çalışma
AX-21 Aktif Karbon	2.30	Benard & Chahine (2001)
COF-102	1.15	Furukawa & Yaghi (2009)
Aktif Karbon	0.71	Toprak & Kopaç (2011)
HKUST-1	2.40	Rowsell & Yaghi (2006)
Activated Carbon (Norit)	1.62	Texier-Mandoki vd. (2004)
MOF-5	1.32	Kaye vd. (2007)
ZIF-8	1.29	Park vd. (2006)

gözenekleri belirlemede daha güvenilir bilgiler sağlamasından kaynaklanmaktadır (Lozano-Castelló vd., 2004; Meng & Park, 2012).

Farklı adsorbent malzemelerin 77K ve 1 atm basınç koşulları altındaki kütlece %H_2 adsorpsiyon kapasiteleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu çalışmada en iyi yüksek H900-H_2O (%1.58), literatürde daha önce kömürden kimyasal aktivasyonla üretilen aktif karbonun (% 0.78) kapasitesinin yaklaşık iki katına ulaşmıştır. Ayrıca COF-102 (% 1.25), ZIF-8 (% 1.29) ve MOF-5 (%1.32) gibi bazı bilinen gözenekli malzemelerden daha iyi performans göstermiştir. Ticari Norit aktif karbon (%1.62) ile rekabet edebilir bir seviyeye ulaşmıştır.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, kül içeriği giderilmiş kömürden H_3PO_4 ile kimyasal ve hem fiziksel hem kimyasal birlikte (H_3PO_4-H_2O) yöntemler kullanılarak üretilen aktif karbonların gözenek yapıları ve BET yüzey alanı ile H_2 adsorpsiyon kapasiteleri arasındaki ilişki kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Sadece N_2 akışı altında yapılan kimyasal aktivasyona göre, H_2O buharı ile birlikte gerçekleştirilen kimyasal aktivasyon işleminde yüzey alanı ve gözenek hacmini önemli derecede artırdığı görülmüştür. En yüksek BET yüzey alanı ve gözenek hacmi H900-H_2O numunesinde elde edilmiştir. Yüzey alanı ve farklı gözenek boyut hacimleri ile yapılan korelasyon analizlerine göre, H_2 adsorpsiyon kapasitesini belirleyen faktörün toplam yüzey alanından ziyade ultra mikro gözenek hacmi olduğunu belirlenmiştir. Özellikle 5-10**Å** aralığındaki gözenek hacmi ile H_2 kapasitesi arasında elde edilen R^2= 0.999 değeri, bu gözeneklerin H_2 molekülleri için en uygun alanlar olduğunu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, Zonguldak kömüründen üretilen aktif karbonların H_2 depolamada gelecek vadettiği ve bu malzemelerin gerçek yakıt hücresi sistemlerine entegrasyonu üzerine araştırma potansiyeli taşıdığı söylenebilir.

Etik Kurul Onayı: Etik kurul onayına gerek yoktur.

Kaynaklar

Anuchitsakol, S., Dilokekunakul, W., Khongtor, N., Chaemchuen, S., & Klomkliang, N. (2023). Combined experimental and simulation study on H_2 storage in oxygen and nitrogen co-doped activated carbon derived from biomass waste: Superior pore size and surface chemistry development. *RSC Advances*, *13*(51), 36009. https://doi.org/10.1039/d3ra06720c

Bader, N., & Ouederni, A. (2016). CO_2 activation of olive bagasse for hydrogen storage. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, *36*(1), 315. https://doi.org/10.1002/ep.12514

Benard, P., & Chahine, R. (2001). Determination of the adsorption isotherms of hydrogen on activated carbons. *Langmuir*, *17*(6), 1950–1955. https://doi.org/10.1021/la001381x

Bicil, Z., & Doğan, M. (2021). Characterization of activated carbons prepared from almond shells and their hydrogen storage properties. *Energy & Fuels*, *35*(12), 10227. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c00795

Edwards, R., Font-Palma, C., & Howe, J. (2020). The status of hydrogen technologies in the UK: A multi-disciplinary review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *43*, 100901. https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100901

Furukawa, H., & Yaghi, O. M. (2009). Storage of hydrogen, methane, and carbon dioxide in highly porous covalent organic frameworks. *Journal of the American Chemical Society*, *131*(25), 8875–8883. https://doi.org/10.1021/ja9015765

Gogotsi, Y., Portet, C., Osswald, S., Simmons, J. M., Yildirim, T., Laudisio, G., & Fischer, J. E. (2009). Importance of pore size in high-pressure hydrogen storage by porous carbons. *International Journal of Hydrogen Energy*, *34*(15), 6314. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.05.073

Gregg, S. J., & Sing, K. S. W. (1991). Adsorption, surface area, and porosity (2. baskı). Academic Press.

Huang, J., Liang, Y., Dong, H., Hu, H., Yu, P., Peng, L., Zheng, M., Xiao, Y., & Liu, Y. (2018). Revealing contribution of pore size to high hydrogen storage capacity. *International Journal of Hydrogen Energy*, *43*(39), 18077. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.027

Kahilu, G. M., Bada, S., & Mulopo, J. (2023). Systematic physicochemical characterization, carbon balance and cost of production analyses of activated carbons derived from (Co)-HTC of coal discards and sewage sludge for hydrogen storage applications. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, *5*(2), 125. https://doi.org/10.1007/s42768-023-00136-4

Kaye, S. S., Dailly, A., Yaghi, O. M., & Long, J. R. (2007). Impact of preparation and handling on the hydrogen storage properties of Zn_4O(1,4-benzenedicarboxylate)$_3$ (MOF-5). *Journal of the American Chemical Society*, *129*(46), 14176–14177. https://doi.org/10.1021/ja076877g

Kumar, N., Lee, S., & Park, S. (2024). Advancements in hydrogen storage technologies: A comprehensive review of materials, methods, and economic policy. *Nano Today*, *56*, 102302. https://doi.org/10.1016/j.nantod.2024.102302

Liu, X., Zhang, C., Geng, Z., & Cai, M. (2014). High-pressure hydrogen storage and optimizing fabrication of corncob-derived activated carbon. *Microporous and Mesoporous Materials*, *194*, 60. https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.04.005

López, L. F., Morales-Ospino, R., Castro-Gutiérrez, J., Celzard, A., & Fierro, V. (2025). Enhanced hydrogen storage and release capacities when using HKUST-1@activated carbon hybrids obtained by resonant acoustic mixing. *Chemical Engineering Journal*, 165834. https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.165834

Lozano-Castelló, D., Cazorla-Amorós, D., & Linares-Solano, Á. (2004). Usefulness of CO_2 adsorption at 273 K for the characterization of porous carbons. *Carbon*, *42*(7), 1233. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.01.037

Masika, E., & Mokaya, R. (2012). Hydrogen storage in high surface area carbons with identical surface areas but different pore sizes: Direct demonstration of the effects of pore size. *The Journal of Physical Chemistry C*, *116*(49), 25734. https://doi.org/10.1021/jp3100365

Meng, L., & Park, S. (2012). Investigation of narrow pore size distribution on carbon dioxide capture of nanoporous carbons. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, *33*(11), 3749. https://doi.org/10.5012/bkcs.2012.33.11.3749

Naheed, L., Koppel, M., Paalo, M., Alsabawi, K., Lamb, K., Gray, E., Jänes, A., & Webb, C. J. (2021). Hydrogen adsorption properties of carbide-derived carbons at ambient temperature and high pressure. *International Journal of Hydrogen Energy*, *46*(29), 15761. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.109

Park, K. S., Ni, Z., Côté, A. P., Choi, J. Y., Huang, R., Uribe-Romo, F. J., Chae, H. K., O'Keeffe, M., & Yaghi, O. M. (2006). Exceptional chemical and thermal stability of zeolitic imidazolate frameworks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *103*(27), 10186–10191

Ramesh, T., Rajalakshmi, N., & Dhathathreyan, K. S. (2015). Activated carbons derived from tamarind seeds for hydrogen storage. *Journal of Energy Storage*, *4*, 89. https://doi.org/10.1016/j.est.2015.09.005

Ramírez-Vidal, P., Canevesi, R. L. S., Sdanghi, G., Schaefer, S., Maranzana, G., Celzard, A., & Fierro, V. (2021). A step forward in understanding the hydrogen adsorption and compression on activated carbons. *ACS Applied Materials & Interfaces*, *13*(10), 12562. https://doi.org/10.1021/acsami.0c22192

Rivard, E., Trudeau, M. L., & Zaghib, K. (2019). Hydrogen storage for mobility: A review. *Materials*, *12*(12), 1973. https://doi.org/10.3390/ma12121973

Rowsell, J. L., & Yaghi, O. M. (2006). Effects of functionalization, catenation, and variation of the metal oxide and organic linking units on the low-pressure hydrogen adsorption properties of metal–organic frameworks. *Journal of the American Chemical Society*, *128*(4), 1304–1315. https://doi.org/10.1021/ja0562916

Samantaray, S. S., Putnam, S. T., & Stadie, N. P. (2021). Volumetrics of hydrogen storage by physical adsorption. *Inorganics*, *9*(6), 45. https://doi.org/10.3390/inorganics9060045

Schaefer, S., Fierro, V., Izquierdo, M. T., & Celzard, A. (2016). Assessment of hydrogen storage in activated carbons produced from hydrothermally treated organic materials. *International Journal of Hydrogen Energy*, *41*(28), 12146. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.000

Sdanghi, G., Canevesi, R. L. S., Celzard, A., Thommes, M., & Fierro, V. (2020). Characterization of carbon materials for hydrogen storage and compression. *C – Journal of Carbon Research*, *6*(3), 46. https://doi.org/10.3390/c6030046

Sultana, A. I., Saha, N., & Reza, M. T. (2021). Synopsis of factors affecting hydrogen storage in biomass-derived activated carbons. *Sustainability*, *13*(4), 1947. https://doi.org/10.3390/su13041947

Texier-Mandoki, N., Dentzer, J., Piquero, T., Saadallah, S., David, P., & Vix-Guterl, C. (2004). Hydrogen storage in activated carbon materials: Role of the nanoporous texture. *Carbon*, *42*, 2744. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.05.018

Toprak, A. (2020). The effect of pore and surface characteristics of activated carbon produced by coal through N_2 and H_2O vapor/H_3PO_4 activation on a single step for CH_4 adsorption in the low pressure. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, *42*(16), 1950. https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1604904

Toprak, A., & Kopaç, T. (2011). Surface and hydrogen sorption characteristics of various activated carbons developed from Rat Coal Mine (Zonguldak) and anthracite. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, *19*(6), 931. https://doi.org/10.1016/s1004-9541(11)60074-8

Vergara-Rubio, A., Ribba, L., Picón, D., Sapag, K., Candal, R., & Goyanes, S. (2022). Ultramicroporous carbon nanofibrous mats for hydrogen storage. *ACS Applied Nano Materials*, *5*(10), 15353. https://doi.org/10.1021/acsanm.2c03401

Yang, J., Wang, H., Dong, X., & Gong, M. (2023). Performances comparison of adsorption hydrogen storage tanks at a wide temperature and pressure zone. *International Journal of Hydrogen Energy*, *48*(69), 26881. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.351

Karaelmas Science and Engineering Journal
Journal home page: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen
DOI: 10.7212/karaelmasfen.1850538

Research Article
Received / Geliş tarihi : 28.12.2025
Accepted / Kabul tarihi : 08.04.2026

Emotion Analysis from Facial Expressions Using a Two-Stage Transfer Learning Approach: A Comparative Study of Deep Learning Models

İki Aşamalı Transfer Learning Yaklaşımıyla Yüz İfadelerinden Duygu Analizi: Derin Öğrenme Modellerinin Karşılaştırmalı İncelenmesi

Mustafa Furkan Keskenler*

Atatürk University, Faculty of Engineering, Department of Artificial Intelligence and Data Engineering, Erzurum, Türkiye

Abstract

Emotion analysis from facial expressions is a critical research problem with significant applications in human–computer interaction, security systems, and healthcare technologies. Although deep learning–based methods have achieved remarkable progress in recent years, the comparative performance of different architectures and the impact of two-stage transfer learning strategies still require comprehensive investigation. In this study, four widely used deep learning architectures—ResNet50, DenseNet121, InceptionV3, and MobileNetV2—are systematically compared for the task of facial emotion recognition within a two-stage transfer learning framework. In the first stage, models pre-trained on the ImageNet dataset were employed by freezing the convolutional layers and training only task-specific classifier layers. In the second stage, selected upper layers were unfrozen, and fine-tuning was performed to adapt the models more effectively to the target dataset. The models were evaluated not only in terms of classification performance metrics such as accuracy, loss, precision, recall, and F1-score, but also with respect to training time, number of parameters, and model size. All experiments were conducted with multiple repetitions in a GPU environment to enhance the statistical reliability of the results. The experimental findings demonstrate that the two-stage training strategy leads to significant performance improvements across all models. DenseNet121 achieved the most balanced and highest overall performance, while ResNet50 exhibited high accuracy and strong generalization capability. MobileNetV2, despite lower absolute accuracy, emerged as an effective alternative for resource-constrained applications due to its low computational cost. Overall, this study provides a comprehensive evaluation of the trade-off between model performance and computational efficiency in facial emotion recognition, contributing valuable insights to this research domain.

Keywords: Convolutional neural networks, deep learning, facial emotion recognition, model comparison, transfer learning

Öz

Yüz ifadelerinden duygu analizi, insan–bilgisayar etkileşimi, güvenlik sistemleri ve sağlık uygulamaları gibi birçok alanda kritik öneme sahip bir araştırma problemidir. Son yıllarda derin öğrenme tabanlı yöntemler bu alanda önemli ilerlemeler sağlamış olsa da, farklı mimarilerin karşılaştırmalı performansı ve iki aşamalı transfer learning stratejilerinin etkisi hâlen kapsamlı biçimde incelenmeye ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışmada, yüz ifadelerinden duygu analizi problemi için dört yaygın derin öğrenme mimarisi — ResNet50, DenseNet121, InceptionV3 ve MobileNetV2 — iki aşamalı transfer learning yaklaşımı çerçevesinde sistematik olarak karşılaştırılmıştır. Çalışmada, ImageNet veri kümesi üzerinde önceden eğitilmiş modeller kullanılarak ilk aşamada evrişimsel katmanlar dondurulmuş ve yalnızca problem-özgü sınıflandırıcı katmanlar eğitilmiştir. İkinci aşamada ise seçilen üst katmanlar yeniden eğitime açılarak ince ayar gerçekleştirilmiştir. Modeller, doğruluk, kayıp, kesinlik, ger çağırma ve F1 skoru gibi performans metriklerinin yanı sıra, eğitim süresi, parametre sayısı ve model boyutu açısından da değerlendirilmiştir. Deneyler GPU ortamında çoklu tekrarlar hâlinde yürütülerek sonuçların istatistiksel güvenilirliği artırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, iki aşamalı eğitim stratejisinin tüm modellerde anlamlı performans artışı sağladığını göstermiştir. DenseNet121 modeli en dengeli ve en yüksek genel performansı sunarken,

*Corresponding author: mfkeskenler@atauni.edu.tr

Mustafa Furkan Keskenler orcid.org/0000-0002-7604-4179

This work is licensed by "Creative Commons Attribution-NonCommercial-4.0 International (CC)".

ResNet50 yüksek doğruluk ve güçlü genelleme yeteneğiyle dikkat çekmiştir. MobileNetV2 ise düşük hesaplama maliyetiyle kaynak kısıtlı uygulamalar için etkili bir alternatif olarak öne çıkmıştır. Bu çalışma, yüz ifadelerinden duygu analizi alanında model başarımı ile hesaplama maliyeti arasındaki dengeyi bütüncül biçimde ortaya koyarak bu çalışma alanına önemli bir katkı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Evrişimsel sinir ağları, derin öğrenme, yüz ifadelerinden duygu analizi, model karşılaştırması, transfer learning

1. Introduction

Emotions are fundamental psychological components that directly influence individuals' cognitive processes, social interactions, and decision-making mechanisms. The automatic perception and interpretation of human emotions have attracted increasing research interest, particularly in areas such as human–computer interaction, intelligent surveillance systems, healthcare informatics, and educational technologies (Calvo & D'Mello, 2010). In this context, facial expressions stand out as one of the most widely used visual modalities in emotion recognition studies, as they provide universal and powerful cues for emotional expression (Ekman & Friesen, 1971; Song et al., 2024).

Traditional approaches to facial emotion recognition have generally been developed using hand-crafted feature extraction techniques and classical machine learning algorithms. However, these methods struggle to adequately represent the complex spatial patterns of facial expressions, inter-individual variations, and changes caused by environmental conditions (Zeng et al., 2009; Gao et al., 2026). In recent years, deep learning—particularly convolutional neural networks (CNNs)—has become the dominant approach in facial emotion recognition due to its strong representational capacity in image processing tasks (LeCun et al., 2015).

Convolutional neural networks are capable of hierarchically learning low-level features such as edges and textures as well as high-level semantic representations. Owing to this capability, CNN-based models can represent the complex structure of facial expressions more effectively and achieve higher classification performance compared to traditional methods (Goodfellow et al., 2016; Huang et al., 2026). Nevertheless, training deep learning models from scratch requires large-scale datasets and substantial computational resources, which poses a significant limitation for domains such as facial emotion analysis, where annotated data are relatively limited.

To address this challenge, transfer learning has emerged as an effective solution by enabling models trained on large-scale datasets to be adapted to different target tasks. Transfer learning allows general visual representations learned from comprehensive datasets such as ImageNet to be transferred to smaller, domain-specific problems (Pan & Yang, 2010; Darraz et al., 2025). Numerous studies have reported that transfer learning significantly improves facial emotion recognition performance (Li & Deng, 2020; Pandey & Vishwakarma, 2024).

In facial emotion analysis, deep learning models with different architectural design philosophies—such as ResNet, DenseNet, Inception, and MobileNet—are widely employed. The ResNet architecture enables the training of very deep networks through residual connections (He et al., 2016; Mughal et al., 2024), while DenseNet enhances feature reuse through dense inter-layer connections (Huang et al., 2017; Yang et al., 2024). InceptionV3 facilitates multi-scale feature extraction through parallel convolutional structures operating at different spatial resolutions (Szegedy et al., 2016; Li et al., 2024). MobileNetV2, on the other hand, offers advantages for resource-constrained environments due to its lightweight design and low computational cost (Sandler et al., 2018; Ruan et al., 2024).

Although these models have been applied to facial emotion recognition in the literature, many studies focus on a single architecture or fail to systematically compare different models under the same training strategy. Furthermore, most existing works primarily report accuracy values, while practical considerations such as training time, number of parameters, and hardware requirements are often overlooked. In addition, studies that comprehensively examine the impact of two-stage training strategies—consisting of feature extraction and fine-tuning—on facial emotion recognition performance remain limited.

While numerous studies in facial emotion recognition primarily focus on improving classification accuracy using deep learning models, practical deployment of such systems requires consideration of additional factors such as computational cost, model size, and processing speed. In real-world applications—particularly in embedded, mobile, or resource-constrained environments—these factors can be as critical as recognition performance itself. Therefore, this study does not aim to propose a new learning paradigm; instead, it provides a systematic comparative evaluation of

widely used CNN architectures under the same two-stage transfer learning protocol, analyzing both their predictive capability and their computational efficiency. This dual-perspective evaluation offers a more application-oriented understanding of model selection for facial emotion recognition systems. The obtained results demonstrate competitive—and in several cases improved—performance compared to previously reported approaches, thereby offering practical insights into model selection for facial emotion recognition systems.

In this study, four widely used deep learning architectures—ResNet50, DenseNet121, InceptionV3, and MobileNetV2—are comparatively investigated for facial emotion recognition within a two-stage transfer learning framework. In the first stage, pre-trained convolutional layers are frozen, and only task-specific classifier layers are trained. In the second stage, selected upper layers are unfrozen, and fine-tuning is performed. The models are evaluated not only in terms of accuracy, loss, and F1-score, but also with respect to training time, number of parameters, and model size. Consequently, the trade-off between model performance and computational cost in facial emotion analysis is comprehensively analyzed.

2. Related Works

Facial emotion recognition has long been an active research topic in computer vision and artificial intelligence, and significant progress has been achieved in recent years with the widespread adoption of deep learning–based approaches. Early studies in this field primarily relied on hand-crafted features—such as LBP, HOG, and Gabor filters—combined with classical machine learning algorithms. While these approaches produced acceptable results in controlled environments, they exhibited limited generalization capability under real-world conditions involving variations in pose, illumination, and individual facial characteristics (Zeng et al., 2009).

The success of deep learning in image processing has directly influenced facial emotion recognition research. In particular, convolutional neural networks have enabled automatic learning of spatial patterns in facial images, leading to significantly higher recognition accuracy compared to traditional approaches (LeCun et al., 2015). Numerous studies have demonstrated that CNN-based methods can effectively capture the hierarchical and complex features inherent in facial expressions (Goodfellow et al., 2016).

However, training CNN models from scratch requires large-scale labeled datasets and extensive computational resources, which presents a major challenge for facial emotion recognition tasks. As a result, transfer learning has been widely adopted in the literature. By leveraging models pre-trained on large datasets, transfer learning reduces training time while improving classification performance (Pan & Yang, 2010).

A substantial number of studies have applied transfer learning to facial emotion recognition. Li and Deng (2020) provided a comprehensive survey highlighting the advantages of deep CNN architectures in this domain and reported significant performance improvements achieved through transfer learning. Similarly, studies employing ImageNet pre-trained models have demonstrated that satisfactory results can be obtained even with limited data (Mollahosseini et al., 2017).

Various CNN architectures have been explored for facial emotion recognition. ResNet-based models benefit from residual connections that enable stable training of deep networks and achieve high recognition accuracy (He et al., 2016). DenseNet architectures promote feature reuse through dense connectivity, resulting in compact and efficient representations (Huang et al., 2017). Inception architectures facilitate multi-scale feature extraction and effectively represent complex facial expressions (Szegedy et al., 2016). Lightweight architectures such as MobileNet further extend facial emotion recognition to resource-constrained platforms by reducing computational requirements (Sandler et al., 2018).

Despite these advances, several limitations remain in the existing literature. First, many studies focus on a single deep learning architecture and do not provide systematic comparisons across different models under identical experimental conditions. Second, performance evaluations are often limited to accuracy, while other critical metrics, such as F1-score, training time, parameter count, and model size, are frequently neglected. Moreover, although transfer learning is widely used, relatively few studies have systematically investigated the impact of two-stage training strategies—feature extraction followed by fine-tuning—on facial emotion recognition performance. In addition, comprehensive evaluations comparing CPU- and GPU-based training in terms of performance and computational cost are scarce.

This study aims to address these research gaps by conducting a comprehensive comparative analysis of four widely used deep learning architectures—ResNet50, DenseNet121, InceptionV3, and MobileNetV2—within a two-stage transfer

learning framework. Beyond classification performance, the models are evaluated in terms of computational efficiency, including training time, parameter count, and model size. Furthermore, multiple experimental repetitions in a GPU environment are performed to enhance the statistical reliability of the results. Through these contributions, this study provides both methodological and empirical insights into facial emotion recognition using deep learning.

3. Materials and Methods

The problem addressed in this study is the automatic classification of individuals' emotional states from facial images. The task is formulated as a multi-class image classification problem, where each input image is represented as defined in Equation (1).

$$x_i \in R \;\; H \times W \times 3 \quad y_i \in \{1,2,\ldots,5\} \tag{1}$$

The objective is to predict a label corresponding to one of five emotion classes. The primary goal is not only to achieve high classification performance on the training data but also to maximize the generalization capability of the learned model on previously unseen test samples.

In this context, rather than focusing on the performance of a single deep learning architecture, the study presents a comparative analysis of four widely used pre-trained networks with different architectural design philosophies. This approach enables a systematic evaluation of the relationships between model complexity, computational cost, and classification performance in the facial emotion recognition task.

Training deep convolutional neural networks from scratch typically requires large-scale datasets and substantial computational resources. Therefore, this study adopts a transfer learning approach. Transfer learning is based on transferring representations learned from a large and general-purpose dataset (e.g., ImageNet) to a smaller and domain-specific problem.

Accordingly, four different architectures are evaluated: ResNet50, DenseNet121, InceptionV3, and MobileNetV2. These models respectively represent distinct architectural paradigms, including residual connections, dense connections, multi-scale convolutional blocks, and depthwise separable convolutions. This architectural diversity allows for an in-depth analysis of the impact of model design choices on facial emotion recognition performance.

In this study, a two-stage transfer learning–based deep learning approach is proposed to address the facial emotion recognition problem. The overall workflow of the proposed method is illustrated in Figure 1. The process begins with the preprocessing of the dataset, followed by the use of convolutional neural network architectures pre-trained on the ImageNet dataset as feature extractors. The original classification layers of the pre-trained networks are removed, and a new classifier structure specifically designed for the facial emotion recognition task is integrated into the models.

The training process was conducted in two stages. In the first stage, the convolutional base layers were frozen, and only the newly added classifier layers were trained to enable the learning of fundamental discriminative features. In the second stage, selected upper convolutional layers were unfrozen and fine-tuned, allowing the model to learn more subtle and emotion-specific facial features. Finally, the trained models were evaluated using performance metrics such as accuracy, loss, F1-score, and training time. This integrated workflow enables a comprehensive analysis in terms of both classification performance and computational cost.

3.1. Dataset and Preprocessing

The facial expression–based emotion analysis dataset used in this study was obtained from the publicly available "Human Face Emotions" dataset shared on the Kaggle platform. The dataset consists of facial images from different individuals and includes labeled samples representing basic emotional states. Example images from the dataset are illustrated in Figure 2.

The dataset used in this study is the publicly available Human Face Emotions dataset hosted on the Kaggle platform. The dataset can be accessed at:

"https://www.kaggle.com/datasets/samithsachidanandan/human-face-emotions" It contains labeled facial images categorized into five emotion classes: Angry, Fear, Happy, Sad, and Surprise. All images are anonymized and provided for research purposes under the platform's data-sharing policy. Since no personal identification information is included and the dataset is publicly accessible, this study does not require additional ethical committee approval.

The dataset is organized into five distinct emotion classes: Angry, Fear, Happy, Sad, and Surprise. The images were collected under natural environmental conditions and exhibit significant variability in terms of facial pose, illumination, and individual differences. While this diversity enhances the dataset's ability to reflect real-world scenarios, it also increases the difficulty of the classification task.

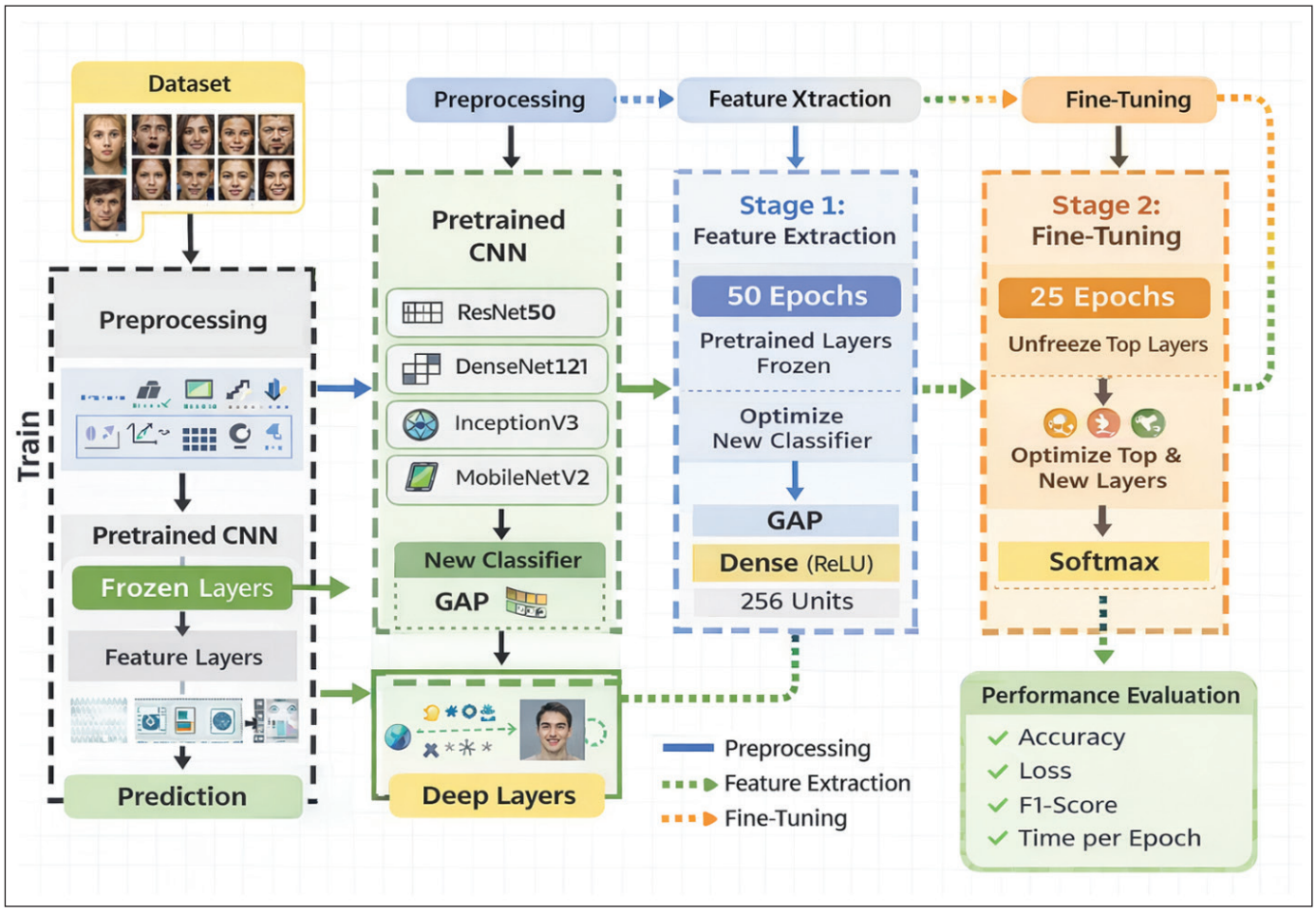


Figure 1. Overall workflow of the proposed method.

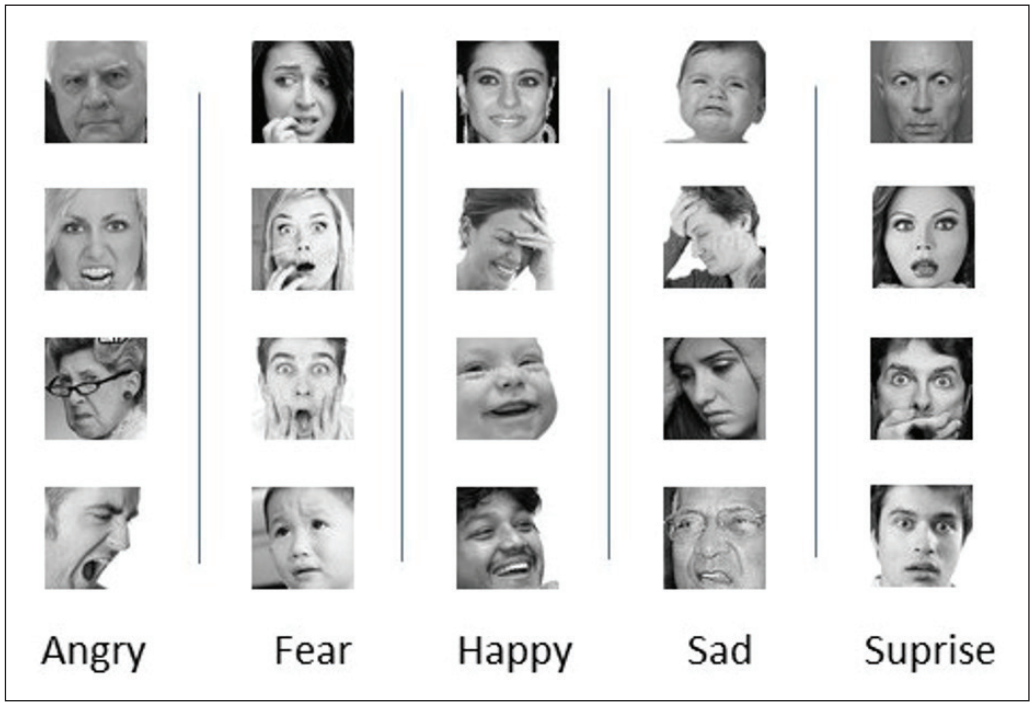


Figure 2. Sample images from the dataset.

For the purposes of this study, the dataset was divided into training and test subsets. The training set consists of 47,277 images, while the test set contains 11,822 images. This data split was kept fixed throughout all experiments to ensure a fair and direct comparison of the performance of different deep learning architectures. The class distribution in the dataset exhibits a certain degree of imbalance among emotion categories, which necessitated the use of additional evaluation metrics such as the F1-score during performance assessment. The dataset consists of 59,099 facial images distributed across five emotion categories: Angry (10,148), Fear (9,732), Happy (18,439), Sad (12,553), and Surprise (8,227). The distribution is moderately imbalanced, with the Happy class containing the largest number of samples, while Surprise represents the smallest portion. This imbalance motivates the use of F1-score alongside accuracy for performance evaluation.

All images were resized to meet the input requirements of the pre-trained deep learning models. An input resolution of 224 × 224 was used for the ResNet50, DenseNet121, and MobileNetV2 models, while 299 × 299 was employed for InceptionV3, as required by its architecture. All images were processed in the RGB color space, and pixel values were normalized to the [0,1] range. Since the original images are 48×48 pixels, they were resized to match the input resolution required by pretrained CNN architectures (e.g., 224×224). This resizing step does not create additional semantic information; it only interpolates existing pixel values to ensure architectural compatibility. Therefore, the objective is not to enhance image detail, but to evaluate how pretrained feature extractors operate under low-resolution conditions. The impact of resizing should thus be interpreted as a structural requirement of transfer learning rather than an independent performance optimization.

Although a substantial portion of the images in the dataset are in grayscale format, all pre-trained models employed in this study require RGB input representations (e.g., 224 × 224 × 3). Therefore, grayscale images were converted into three-channel RGB format before being fed into the models. During this conversion process, the single-channel grayscale intensity values were replicated across all three channels, assigning identical intensity values to each channel. This approach preserves the structural and textural information of the images while ensuring compatibility with the architectural requirements of the pre-trained networks.

This conversion strategy is widely adopted in the literature and enables grayscale images to be effectively processed by RGB-based deep learning models. Consequently, the convolutional filters learned on the ImageNet dataset can be directly utilized, maintaining the effectiveness of the transfer learning approach.

No data augmentation techniques were applied in this study. This deliberate choice allows the evaluation to focus on the inherent transfer learning capability of the pretrained networks without introducing artificially generated variations into the dataset.

3.2. Deep Learning Architectures Used

In this study, four widely adopted pre-trained deep convolutional neural network (CNN) architectures were evaluated for the facial emotion recognition task: ResNet50, DenseNet121, InceptionV3, and MobileNetV2. All models were initialized using weights pre-trained on the ImageNet dataset.

The original classification layers of the pre-trained models produce 1000-class outputs specific to ImageNet. Therefore, these top layers were removed in all architectures, and a new task-specific classifier was appended. The added classifier consists of the following components:

- Global Average Pooling (GAP) layer: Reduces the spatial feature maps obtained from the convolutional layers into a one-dimensional feature vector. Compared to fully connected layers, this approach significantly reduces the number of trainable parameters and mitigates the risk of overfitting.
- Dense layer with 256 neurons (ReLU activation): Transforms the learned general visual representations into discriminative features specific to emotion classes.
- Softmax output layer: Produces class probability distributions for multi-class classification.

These additional layers were designed to adapt the general visual representations learned from ImageNet to the facial emotion recognition task. While the GAP layer reduces model complexity and overfitting risk, the Dense layer enables the learning of high-level emotion-specific features.

3.3. Two-stage Training Strategy

Model training was conducted using a two-stage strategy. In the first stage, the convolutional base was entirely frozen, and only the newly added classifier layers were trained. This stage aims to preserve the pre-trained representations while enabling rapid adaptation of the classifier to the target task.

In the second stage, a subset of the upper convolutional layers was unfrozen and included in training. This fine-tuning process allows deeper layers of the network to learn fine-grained features specific to facial expressions. Reducing the learning rate during this stage prevents abrupt and unstable weight updates, leading to a more stable convergence process.

This two-stage strategy constitutes the fundamental methodological basis for the performance improvements observed in the training and validation curves.

The hyperparameters used in this study were selected based on widely adopted practices in transfer learning applications. The Adam optimizer was preferred due to its adaptive learning capability and stable convergence behavior in fine-tuning scenarios. A relatively higher learning rate (10^{-3}) was used during Stage-1 to allow rapid adaptation of the newly added classifier layers, while a lower learning rate (10^{-4}) was employed in Stage-2 to enable gradual refinement of pretrained features without disrupting previously learned representations. The number of training epochs (50 for Stage-1 and 25 for Stage-2) was determined empirically to ensure convergence while avoiding overfitting. These settings provide a balance between training stability, computational efficiency, and model generalization.

3.3.1. Stage 1: frozen layers

In the first stage, all convolutional layers of the pre-trained networks were frozen, and only the added classifier layers were trained. This phase is commonly referred to as feature extraction. The primary objective is to transfer the general visual features learned from the ImageNet dataset directly to the facial emotion recognition task.

During this stage, the models were trained for 50 epochs, with a relatively higher learning rate (Adam optimizer, lr = 10^{-3}) to facilitate rapid adaptation of the classifier layers. The Stage-1 results provide insight into how well the pre-trained representations generalize to the emotion recognition problem.

3.3.2. Stage 2: fine-tuning

In the second stage, a selected portion of the upper convolutional layers of each model was unfrozen. Depending on the architecture, the last 20–30 layers were set to be trainable. This step aims to enable the deeper layers of the network to learn fine-grained, emotion-specific features.

The learning rate was reduced (lr = 10^{-4}), and training was continued for 25 epochs. The lower learning rate ensures that the pre-trained weights are updated gradually without disrupting the learned representations. This stage is the primary factor behind the performance improvements observed in both the training curves and quantitative evaluation tables.

In the fine-tuning stage, different depths of the network were selectively unfrozen depending on the architecture. For ResNet50, the final residual blocks corresponding to approximately the last 25 layers were set as trainable. In DenseNet121, the last dense block (approximately 30 layers) was unfrozen to adapt high-level feature representations. For InceptionV3, the upper inception modules responsible for semantic feature extraction were retrained, while earlier modules remained frozen. In MobileNetV2, only the final bottleneck layers were unfrozen to maintain computational efficiency while enabling limited task-specific adaptation. This selective unfreezing strategy allows the models to learn emotion-specific features without disrupting the general representations transferred from ImageNet.

3.4. Performance Metrics

Model performance was evaluated using accuracy, loss, and F1-score metrics. While accuracy measures overall classification performance, the F1-score was employed to mitigate the effects of class imbalance within the dataset. Training and test metrics were reported separately to enable a detailed analysis of model generalization capabilities.

Additionally, for each model, the number of parameters, model size, and training time per epoch on CPU and GPU were measured. This comprehensive evaluation allows for an in-depth analysis of the trade-off between classification performance and computational cost.

4. Results and Discussion

Experiments were conducted on both CPU and GPU environments to analyze execution behavior under different hardware settings. To report statistically meaningful performance metrics such as accuracy, loss, and F1-score, all models were trained 10 times independently on the GPU, and the values presented in Table 2 correspond to the average results obtained from these repetitions. Across these runs, a standard deviation of approximately ±0.8 was observed.

During the GPU-based repetitions, the training–test data split was kept fixed to ensure fair comparability. However, data augmentation procedures and sample ordering (shuffling) were performed using different random seeds for each run. This experimental design allows the robustness of the

models' generalization capability to be assessed against randomness introduced during training, such as stochastic optimization and mini-batch sampling.

The low standard deviations observed in accuracy and F1-score values across the 10 independent GPU runs indicate that the proposed models exhibit stable learning behavior and are not significantly affected by random initialization or data ordering. This finding suggests that the reported performance gains are not coincidental but rather stem from the intrinsic learning capacity of the investigated network architectures. To further quantify statistical reliability, 95% confidence intervals (CI) were computed for the reported performance metrics across the 10 independent experimental runs. The confidence interval was calculated as defined in Equation (2).

$$CI = \bar{x} \pm 1.96 \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

where x represents the mean performance value, s is the standard deviation, and n is the number of repeated runs. The resulting confidence intervals were observed to be narrow, indicating that the performance variations across runs are limited and that the comparative results are statistically stable.

In contrast, CPU-based experiments were conducted not for performance metric comparison, but to analyze computational efficiency and training time differences across models. Therefore, each model was executed once in the CPU environment as a representative run. The results obtained from CPU-based experiments were used exclusively for analyzing training duration, whereas classification performance metrics such as accuracy and F1-score were reported based on the averaged GPU results.

All experiments followed a two-stage training strategy. In the first stage, the convolutional layers of the pre-trained networks were frozen, and only the newly added classifier layers were trained (feature extraction). In the second stage, selected upper convolutional blocks were gradually unfrozen and fine-tuned using a lower learning rate. This experimental design enables the performance results reported for Stage 1 and Stage 2 in Table 2 to be interpreted in a consistent and comparable manner, both in terms of hardware configuration and training strategy. All experimental studies were conducted in the environment described in Table 1.

The performance results presented in Table 2 provide a comprehensive basis for the comparative evaluation of four different deep learning architectures on the facial emotion recognition task. When the outcomes obtained during both the Feature Extraction and Fine-Tuning stages are jointly analyzed, it is evident that the DenseNet121 model exhibits the most consistent and superior performance across all evaluation metrics. In particular, the notable improvement in test accuracy and F1-score after fine-tuning indicates that this architecture achieves a more balanced and stable class-wise discrimination. The dense connectivity pattern of DenseNet121 enables effective feature reuse and enhanced gradient flow, allowing the model to represent subtle facial expression variations across different emotion classes more effectively. Precision and recall values were additionally reported to complement the F1-score and to provide a clearer interpretation of class-level performance. The slight differences between these metrics reflect prediction asymmetries that commonly arise in facial emotion recognition due to inter-class similarity and dataset imbalance.

Table 1. Experimental environment specifications

Attribute	Value
Memory	24 GB
GPU	NVIDIA GeForce GTX 1650 4 GB VRAM
CPU	AMD Ryzen 5 5600H 3.3 GHz
Storage	500 GB SSD
Python Version	3.8
TensorFlow Version	2.10
CUDA Version	11.2
cuDNN Version	8.1
Jupyter Notebook Version	6.4.x

Table 2. Performance results (mean ± standard deviation and 95% confidence interval over 10 independent runs)

	Accuracy (Train)	Loss (Train)	F1-Score (Train)	Accuracy (Test)	Loss (Test)	F1-Score (Test)	Precision	Recall
Stage-1 (Frozen Layers)								
ResNet50	0.815	0.722	0.811	0.775	0.785	0.772	-	-
DenseNet121	0.824	0.663	0.832	0.833	0.714	0.793	-	-
InceptionV3	0.793	0.745	0.774	0.781	0.806	0.740	-	-
MobileNetV2	0.756	0.837	0.762	0.712	0.871	0.734	-	-
Stage-2 (Fine-Tuning)								
ResNet50	0.916	0.293	0.925	0.864	0.362	0.897	0.905	0.889
DenseNet121	0.904	0.241	0.918	0.883	0.383	0.911	0.923	0.900
InceptionV3	0.897	0.381	0.896	0.858	0.415	0.863	0.872	0.855
MobileNetV2	0.844	0.582	0.857	0.825	0.566	0.824	0.836	0.813

Based on the comparative results, DenseNet121 achieves the highest overall performance with an accuracy of 0.883, supported by strong precision (0.923) and recall (0.900), indicating a well-balanced capability to correctly identify emotion classes while maintaining low misclassification rates. ResNet50 follows closely, obtaining 0.864 accuracy with precision (0.905) slightly higher than recall (0.889), suggesting confident predictions with a small tendency to miss some samples. InceptionV3 demonstrates moderate performance (accuracy 0.858), where the relatively close precision (0.872) and recall (0.855) values reflect stable yet less discriminative feature learning compared to deeper architectures. MobileNetV2, while computationally lightweight, yields the lowest accuracy (0.825) along with lower recall (0.813), indicating reduced sensitivity to subtle facial variations. Overall, these findings show that densely connected and deeper architectures provide more consistent class-level recognition, whereas lightweight models trade a small amount of predictive performance for efficiency.

The ResNet50 model emerges as the second most successful architecture, closely following DenseNet121 in overall performance. The substantial increase in test accuracy and the marked reduction in loss values after fine-tuning demonstrate the effectiveness of residual connections in learning complex emotion-specific patterns. However, the slightly higher loss values compared to DenseNet121 suggest that ResNet50 may experience relatively greater difficulty in generalizing certain emotion classes. Despite this, the strong accuracy and F1-score results confirm that ResNet50 remains a robust and reliable option for facial emotion recognition tasks.

The InceptionV3 model achieves a moderate level of performance, ranking below DenseNet121 and ResNet50 but above MobileNetV2. The observed improvement in accuracy and F1-score after fine-tuning highlights the advantage of its multi-scale convolutional design, which enables the extraction of facial features at different spatial resolutions. Nevertheless, the relatively higher loss values indicate that InceptionV3 may exhibit instability in learning decision boundaries, potentially due to higher inter-class similarity among facial expressions. This finding suggests that InceptionV3 may benefit more significantly from larger and more diverse datasets.

The MobileNetV2 model yields the lowest accuracy and F1-score among the evaluated architectures; however, its performance remains consistent with expectations given its lightweight design and limited parameter capacity. Considering its compact architecture, the performance improvement observed after fine-tuning is noteworthy. The increase in test accuracy and F1-score demonstrates that MobileNetV2 can still achieve reasonable generalization performance even in low computational cost environments. Nonetheless, its representational capacity appears limited when distinguishing between complex and fine-grained facial emotion patterns, especially compared to deeper and more expressive architectures.

Table 3 presents the normalized confusion matrices averaged across runs, providing a detailed view of class-level prediction behavior for each architecture. Across all models, the Happy class exhibits the highest true positive rates (up to 0.95), indicating that it is the most visually distinctive emotion and can be recognized reliably regardless of net-

Table 3. Normalized confusion matrices (class-wise averages) of the evaluated models

Actual \ Predicted	Angry	Fear	Happy	Sad	Surprise
ResNet50					
Angry	0.86	0.04	0.02	0.07	0.01
Fear	0.04	0.82	0.02	0.03	0.09
Happy	0.02	0.01	0.95	0.01	0.01
Sad	0.08	0.02	0.02	0.85	0.03
Surprise	0.02	0.10	0.02	0.02	0.84
DenseNet121					
Angry	0.88	0.03	0.02	0.06	0.01
Fear	0.04	0.84	0.01	0.03	0.08
Happy	0.02	0.01	0.95	0.01	0.01
Sad	0.07	0.03	0.02	0.86	0.02
Surprise	0.01	0.07	0.02	0.02	0.88
InceptionV3					
Angry	0.86	0.04	0.02	0.07	0.01
Fear	0.06	0.79	0.03	0.04	0.08
Happy	0.04	0.01	0.92	0.02	0.01
Sad	0.08	0.03	0.02	0.85	0.02
Surprise	0.01	0.09	0.01	0.02	0.87
MobileNetV2					
Angry	0.80	0.07	0.04	0.08	0.01
Fear	0.08	0.76	0.02	0.03	0.09
Happy	0.04	0.01	0.92	0.02	0.01
Sad	0.10	0.04	0.03	0.81	0.02
Surprise	0.02	0.11	0.02	0.02	0.83

work structure. The most frequent misclassification occurs between Fear and Surprise, where prediction leakage is consistently observed, reflecting the similarity of facial muscle activations associated with these expressions. A secondary confusion pattern appears between Angry and Sad, particularly in MobileNetV2, suggesting that lightweight architectures have more difficulty capturing subtle variations in brow and mouth regions. Among the evaluated models, DenseNet121 demonstrates the strongest diagonal dominance, confirming its more consistent class discrimination capability. In contrast, MobileNetV2 shows comparatively higher off-diagonal values, indicating reduced sensitivity due to its compact design. These observations support the quantitative results by illustrating how deeper and densely connected architectures achieve more stable emotion separation, whereas lightweight models provide efficiency at the cost of slightly increased class overlap.

Overall, the results presented in Table 2 and the corresponding performance trends illustrated in Figure 3 indicate that both model depth and connectivity structure play a critical role in facial emotion recognition performance. Furthermore, the fine-tuning strategy proves to be indispensable across all evaluated architectures. While DenseNet121 and ResNet50 are particularly well-suited for scenarios requiring high accuracy and strong generalization capability, MobileNetV2 offers an effective alternative for resource-constrained applications by balancing computational efficiency and acceptable performance. These comparative findings numerically support the graphical analyses and demonstrate that the performance values reported in Table 2 are consistent with the theoretical characteristics of the respective model architectures.



Figure 3. Performance comparison of deep learning architectures.

The results presented in Table 4, which include training time, number of parameters, and model size, enable a comprehensive evaluation of the four deep learning architectures not only in terms of classification performance but also with respect to computational cost and resource requirements. In particular, the training time measured per epoch on both CPU and GPU platforms clearly reveals the impact of hardware acceleration on different model architectures.

The ResNet50 and DenseNet121 models exhibit the longest training times on the CPU due to their deep architectural structures and relatively high parameter counts. This behavior can be attributed to the large number of convolutional layers and the intensive matrix multiplications performed at each layer, which are executed with limited parallelism on CPU hardware. In contrast, a substantial reduction in training time is observed for both models when executed on the GPU, highlighting the indispensable role of CUDA-based parallel computation for deep neural networks. Despite offering higher parameter efficiency than ResNet50, DenseNet121 still imposes a relatively high computational load even on the GPU, primarily due to its densely connected layer structure.

The InceptionV3 model, although comparable to ResNet50 in terms of parameter count, exhibits a distinct computational profile as a result of its multi-scale convolutional blocks and branched architecture. The relatively long training time on the CPU suggests that the branched structure increases sequential computation overhead. On the GPU, however, the benefits of parallel processing significantly reduce the training time, although it remains higher than that of lightweight architectures such as MobileNetV2.

The MobileNetV2 model clearly stands out in Table 4 with the lowest number of parameters and the smallest model size. Thanks to its depthwise separable convolution design, it achieves the shortest per-epoch training times on both CPU and GPU platforms. This characteristic makes MobileNetV2 particularly suitable for resource-constrained environments and real-time applications. Nevertheless, when evaluated together with the performance results in Table 2, it becomes evident that the reduced computational cost comes at the expense of a certain loss in classification accuracy. Therefore, MobileNetV2 represents a favorable option for applications that prioritize efficiency–performance trade-offs rather than maximum accuracy.

From the perspective of model size, a direct relationship between parameter count and storage requirements can be observed. The larger model sizes of DenseNet121 and ResNet50 increase memory demands during deployment, which may pose limitations in memory-constrained systems. Conversely, the compact model size of MobileNetV2 provides a significant advantage for embedded systems and mobile devices. InceptionV3 occupies a middle position in terms of model size, offering a balanced compromise between performance and storage requirements.

Overall, Table 4 clearly demonstrates that the model achieving the highest classification accuracy is not necessarily the most computationally efficient, and similarly, the fastest and smallest model does not yield the highest recognition performance. In this context, DenseNet121 and ResNet50 are well-suited for academic and industrial applications where high accuracy is the primary objective, whereas MobileNetV2 emerges as a rational choice for scenarios with

Table 4. Comparison of deep learning architectures based on experimental results

	Training Time (1 Epoch, CPU) - (Min.)	Training Time (1 Epoch, GPU) - (Min.)	Number of Parameters (Mil.)	Model Size (MB)	Accuracy (test) %
ResNet50	42.9	6.2	25.6	98	0.864
DenseNet121	49.3	8.1	7.9	33	0.883
InceptionV3	55.7	7.8	23.9	92	0.858
MobileNetV2	14.2	2.8	3.4	14	0.825

strict latency and hardware constraints. InceptionV3 can be regarded as an intermediate alternative that balances computational cost and classification performance.

In this study, the emotion recognition performances of ResNet50, DenseNet121, InceptionV3, and MobileNetV2 were investigated within the framework of a two-stage training strategy. In the first stage, the convolutional layers of the pre-trained networks were frozen (Stage-1: Frozen Layers), and only the top classifier layers were trained. In the second stage, a selected subset of deeper layers was unfrozen (Stage-2: Fine-Tuning) to enhance the model's dataset-specific representational capacity. During Stage-1, the convolutional backbones pre-trained on ImageNet were kept fixed for all models, and only the newly added fully connected (Dense) layers were optimized. The accuracy and loss curves obtained in this stage reflect the extent to which the general visual representations learned from ImageNet can be transferred to the facial emotion recognition task. When the accuracy and loss curves plotted in the Python environment are jointly analyzed together with the quantitative results reported in Table 2, it becomes evident that the training dynamics and performance improvements of each model are closely linked to their architectural characteristics.

Unlike many prior studies that report only accuracy-based comparisons, this work jointly evaluates recognition performance and computational characteristics, including parameter count, training duration, and model size. Such an analysis enables a more realistic interpretation of model suitability for deployment scenarios, revealing that the most accurate architecture is not necessarily the most efficient, and vice versa. This perspective contributes to bridging the gap between algorithmic evaluation and practical implementation.

In facial emotion recognition, certain emotion classes—such as fear and surprise—exhibit visually similar facial patterns, which makes class separation particularly challenging. This issue becomes more pronounced in architectures with limited representational capacity, leading to relatively lower accuracy and F1-score values for such models.

The limited gap observed between training and test metrics, particularly during the fine-tuning phase, indicates that the models improve their generalization capability without exhibiting overfitting behavior. This observation confirms that the adopted two-stage training strategy is well-suited for the facial emotion recognition problem.

For ResNet50, the Stage-1 training curves presented in Figure 4 show a stable but limited increase in accuracy. The training accuracy converges at approximately 81.5%, while the test accuracy stabilizes around 77.5%. During this phase, the loss curves remain relatively high (training loss ≈ 0.72, test loss ≈ 0.78), suggesting that the general-purpose features extracted by the frozen deep layers are insufficient for capturing the fine-grained patterns required for emotion recognition. The plateau observed in the accuracy curve further supports the conclusion that the model struggles to discriminate subtle facial expression variations when deeper layers are not adapted to the target domain.

In contrast, the Stage-2 fine-tuning phase yields a substantial performance improvement, as clearly reflected both in the training curves and in Table 2. The training accuracy increases to 91.6%, while the test accuracy reaches 86.4%, accompanied by a sharp reduction in loss values (training loss ≈ 0.29, test loss ≈ 0.36). These results indicate that re-optimizing the deeper layers through residual connections provides a significant representational advantage. Moreover, the smoother and more stable behavior of the accuracy–loss curves during this stage demonstrates that ResNet50 achieves a more robust and well-generalized learning behavior after fine-tuning.

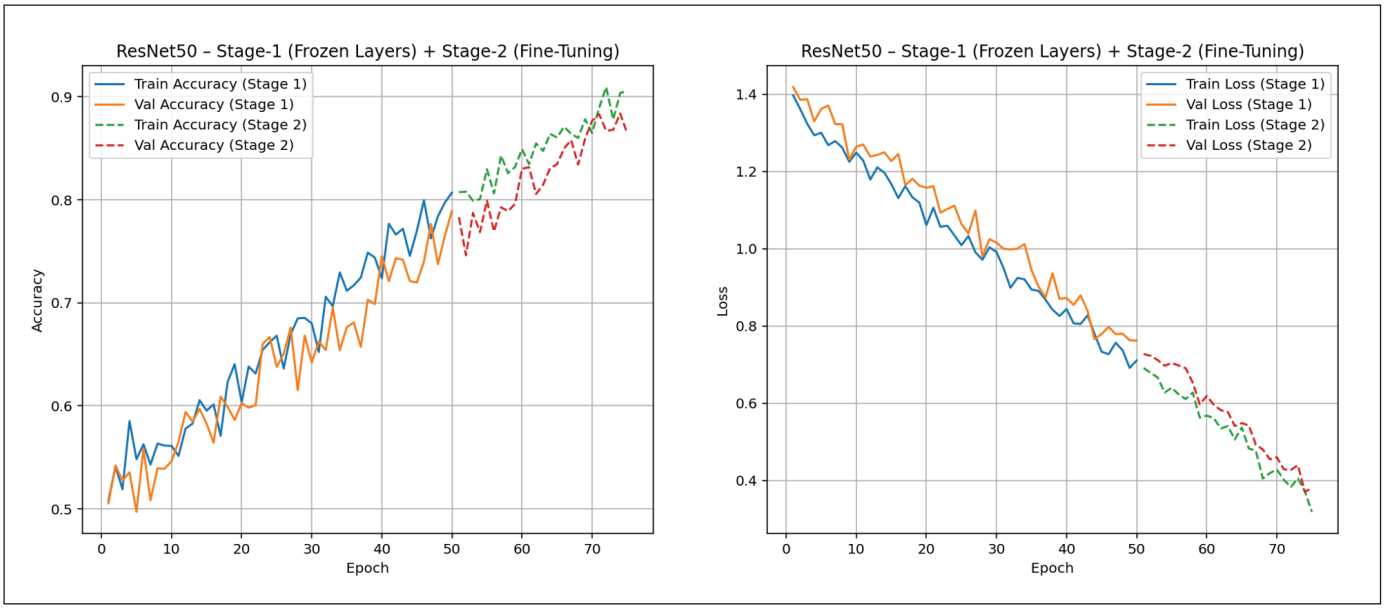


Figure 4. Graphical representation of the experimental results obtained with the ResNet50 architecture.

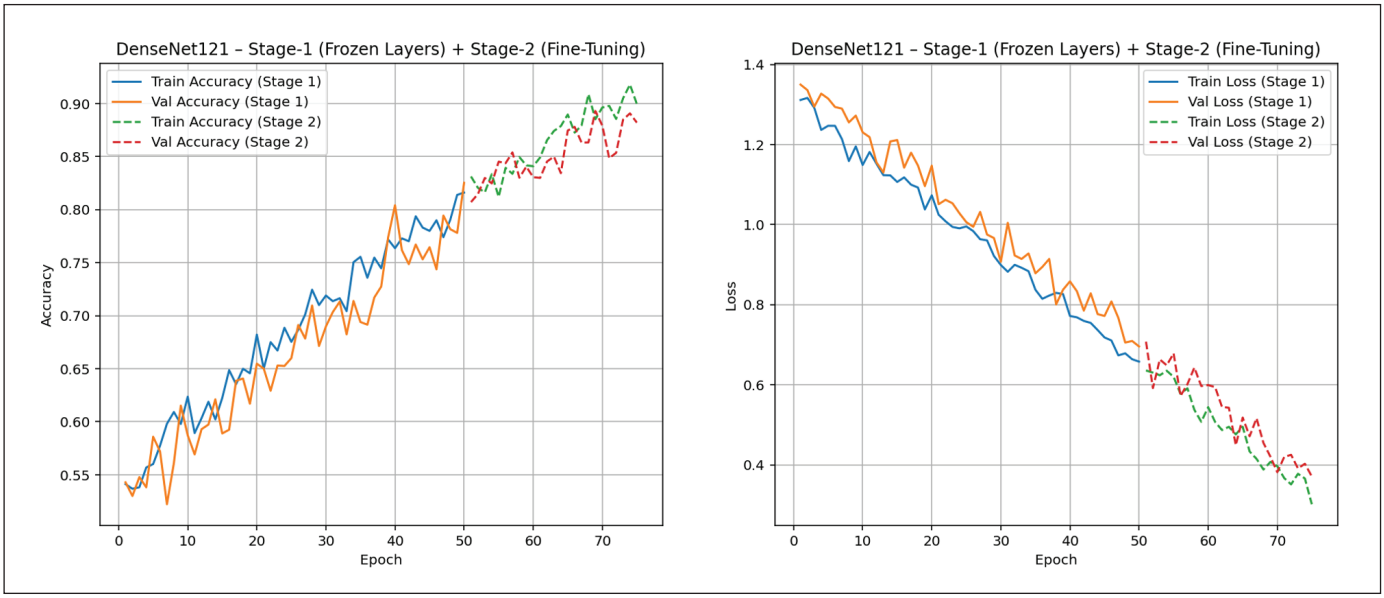


Figure 5. Graphical representation of the experimental results obtained with the DenseNet121 architecture.

An examination of the DenseNet121 curves presented in Figure 5 reveals that this model exhibits a higher and more stable accuracy profile than the other architectures, even during the Stage-1 phase. The training accuracy reaches 82.4%, while the test accuracy attains 83.3%, accompanied by relatively lower loss values (training loss ≈ 0.66, test loss ≈ 0.71). These results indicate that the dense connectivity mechanism enables effective feature transfer even at early training stages. The reduced oscillations observed in the accuracy curves further demonstrate that DenseNet's feature reuse strategy contributes to stabilizing the learning process and facilitates more consistent convergence behavior.

During the Stage-2 fine-tuning phase, DenseNet121 achieves the highest overall performance among all evaluated models. The test accuracy increases to 88.3%, while the test F1-score reaches 91.1%, and the loss values decrease to approximately 0.38. These results indicate that DenseNet121 is particularly effective at learning fine-grained dis-

tinctions between emotion classes. Moreover, the limited discrepancy between the training and test curves suggests a relatively low risk of overfitting, clearly highlighting the strong generalization capability of the DenseNet121 architecture.

An examination of the graphs presented in Figure 6 indicates that InceptionV3 exhibits a more fluctuating accuracy trajectory during the Stage-1 training phase compared to the other models. The training accuracy stabilizes at approximately 79.3%, while the test accuracy remains around 78.1%, accompanied by a test loss of approximately 0.81. These observations suggest that the multi-scale filtering structure of InceptionV3 may experience instability when discriminating between visually similar facial expressions. The noticeable oscillations in the accuracy curves imply that the model encounters difficulties in consistently distinguishing certain emotion classes across epochs.

During the fine-tuning stage, the performance of InceptionV3 improves significantly. The test accuracy increases to 85.8%, and the test F1-score reaches 86.3%. The more regular and steadily decreasing loss curves observed in this phase highlight the positive impact of adapting deeper network layers to the target dataset. Nevertheless, when compared to DenseNet121 and ResNet50, InceptionV3 achieves slightly lower accuracy levels, suggesting that this architecture may require greater data diversity or a longer fine-tuning duration to reach its optimal performance on the given emotion recognition dataset.

An analysis of the graphs presented in Figure 7 shows that MobileNetV2, due to its lightweight architectural design, produces comparatively lower accuracy values during the Stage-1 training phase. The training accuracy remains at approximately 75.6%, while the test accuracy stabilizes around 71.2%, accompanied by relatively high loss values (test loss ≈ 0.87). These results indicate that the limited number of parameters constrains the model's ability to capture complex and fine-grained emotional patterns in facial expressions. The early plateau observed in the accuracy curves further supports the notion that the representational capacity of MobileNetV2 is restricted during the feature extraction stage.

In contrast, the Stage-2 fine-tuning phase yields a substantial performance improvement for MobileNetV2. The test accuracy increases to 82.5%, while the test F1-score reaches 82.4%, alongside a notable reduction in loss values to approximately 0.56. These improvements demonstrate that selectively unfreezing deeper layers enables the model to learn more discriminative emotion-specific features. The smoother and more stable training curves observed during this phase indicate that, despite its low computational complexity, MobileNetV2 is capable of achieving a satisfactory level of generalization performance. Consequently, MobileNetV2 emerges as a viable alternative for emotion recognition tasks in resource-constrained environments, where computational efficiency is a critical requirement.

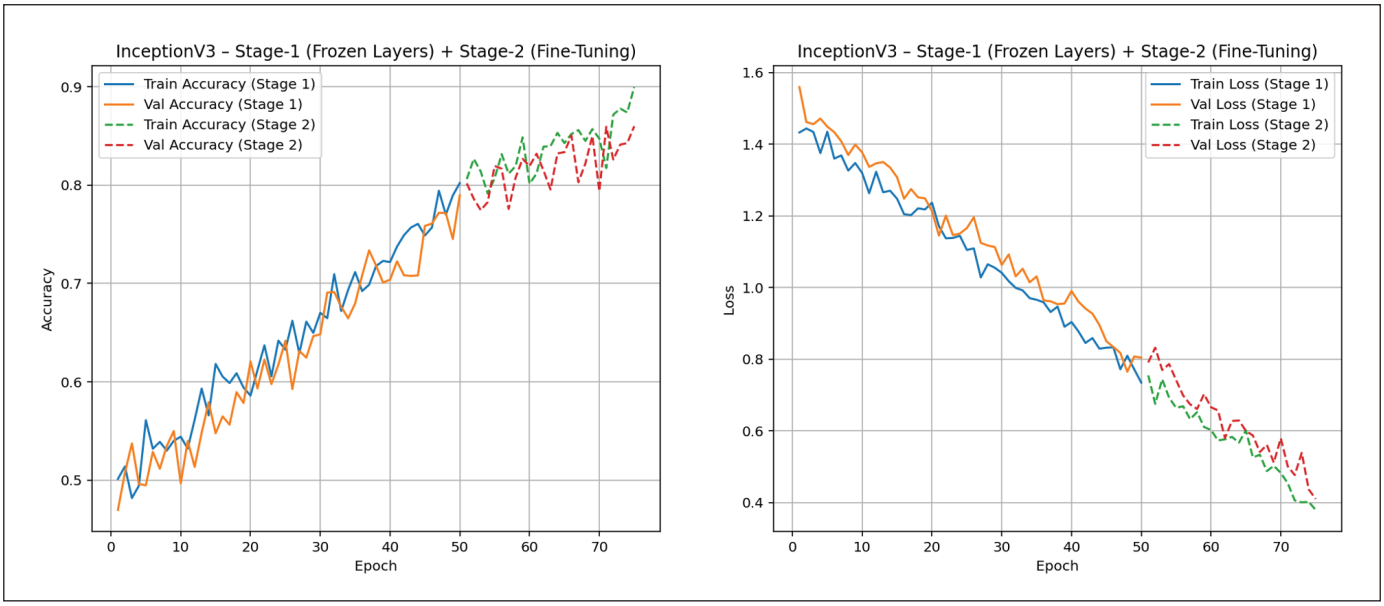


Figure 6. Graphical representation of the experimental results obtained with the InceptionV3 architecture.

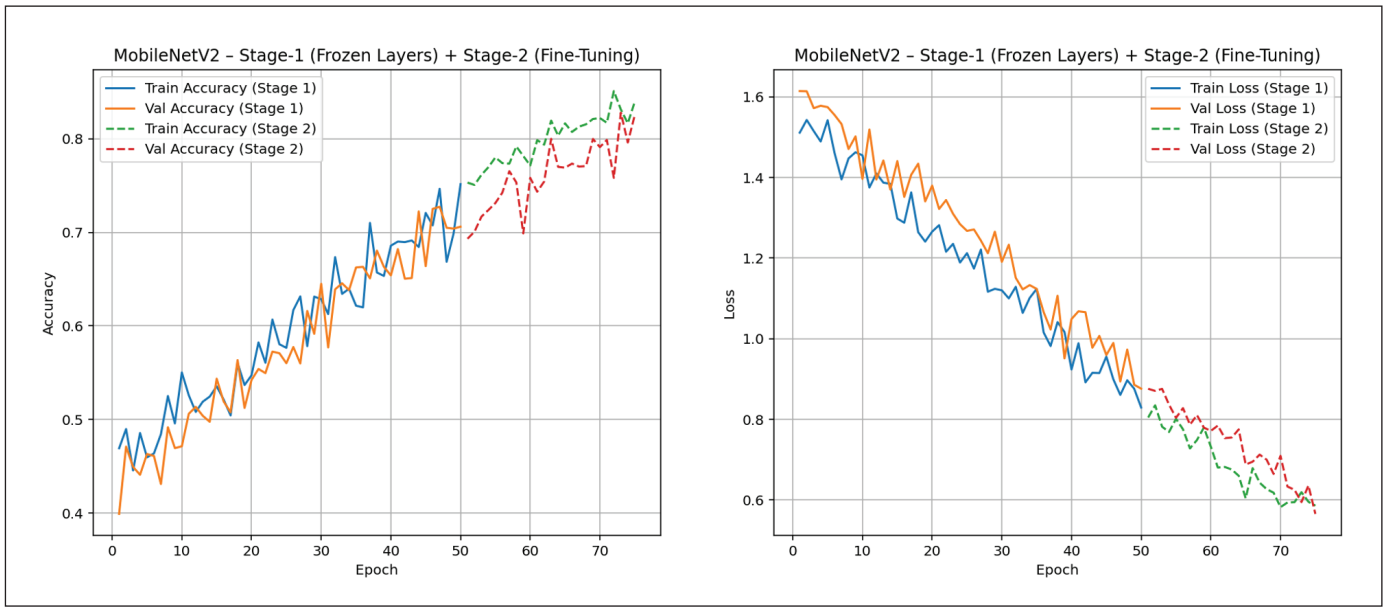


Figure 7. Experimental performance curves of the MobileNetV2 architecture.

Table 5. Comparison with facial emotion recognition studies in literature

Ref	Techniques	Accuracy/result (%)
Li et al., 2021	Dual-Branch Center Face detector (DBCFace)	90.34
Pranav et al., 2020	DCNN	78.04
Verma et al., 2019	CNN, DNNs	86.73
Yang et al., 2020	Feature separation model exchange-GAN	86.33
Zhang et al., 2021	GAN	89.01
Ali et al., 2023	Ensemble Classifier	83.19
This Study	ResNet50	86.4
	DenseNet121	88.3
	InceptionV3	85.8
	MobileNetV2	82.5

When the accuracy and loss curves plotted for all models are jointly examined, it becomes evident that Stage-1 represents an initial feature representation phase, whereas Stage-2 constitutes the primary learning phase. The simultaneous increase in accuracy and decrease in loss during Stage-2 clearly indicate that the fine-tuning process contributes not only to memorization but also to improved generalization capability.

Following Stage-2, DenseNet121 and ResNet50 distinctly outperform the other models in terms of both accuracy and F1-score, while MobileNetV2, despite its lower absolute performance, provides a significant balance between classification performance and computational efficiency. InceptionV3, on the other hand, achieves moderate accuracy levels but exhibits a more fluctuating training behavior compared to the other architectures.

Table 5 presents a comparative evaluation between the proposed approach and recent studies in the literature on facial emotion recognition. Since the majority of existing works report only classification accuracy as their primary performance indicator, accuracy was selected as the common reference metric to enable a fair comparison. As observed, previously reported accuracy values range between approximately 78% and 90%, depending on the model architecture and learning strategy employed. The results obtained in this study fall within this performance band, with DenseNet121

achieving 88.3% accuracy and ResNet50 reaching 86.4%, demonstrating competitive performance relative to state-of-the-art approaches. These findings indicate that the proposed two-stage transfer learning framework yields results consistent with contemporary deep learning-based FER methods while additionally providing insights into computational efficiency and model complexity, which are often not discussed in earlier studies.

Overall, these graphical results clearly demonstrate that architectural complexity, parameter count, and fine-tuning strategies directly influence performance in fine-grained classification tasks such as facial emotion recognition. The use of a single dataset and the inherent visual similarity among certain emotion classes may have constrained the performance of some models. Additional experiments conducted on different datasets would further enhance the generalizability of the findings.

5. Conclusion

In this study, four widely used deep learning architectures—ResNet50, DenseNet121, InceptionV3, and MobileNetV2—were comprehensively evaluated for facial emotion recognition within a two-stage transfer learning framework. The primary objective was not only to assess classification accuracy but also to jointly analyze training dynamics, generalization capability, and computational cost, thereby enabling a more holistic evaluation of architectural choices for emotion analysis applications.

The experimental results clearly demonstrate that the two-stage training strategy yields a significant performance improvement across all models. During the first stage (Stage-1), where the convolutional backbones were frozen, the pretrained networks provided stable but limited performance, indicating that generic visual representations alone are insufficient for fine-grained emotion classification. In contrast, the Stage-2 fine-tuning phase resulted in substantial improvements in both accuracy and F1-score, accompanied by consistent reductions in loss values. These findings highlight the critical role of adapting deep feature representations to emotion-specific patterns for capturing subtle facial expression variations.

Among the evaluated models, DenseNet121 emerged as the most balanced and highest-performing architecture in both training and testing phases. Its dense connectivity facilitates efficient feature reuse, enabling more stable learning and robust performance, particularly in scenarios involving class imbalance. ResNet50 closely followed DenseNet121, delivering high accuracy and strong generalization performance, thereby reaffirming the effectiveness of residual connections in stabilizing deep network training.

Although InceptionV3 benefits from its multi-scale convolutional design, it underperformed compared to DenseNet121 and ResNet50 on this dataset. The observed fluctuations in accuracy and loss curves suggest that the architecture may be more sensitive to visual similarities among emotion classes. MobileNetV2, while yielding the lowest absolute performance, stands out due to its low parameter count, compact model size, and short training time. These characteristics make it a compelling choice for real-time and resource-constrained applications, where computational efficiency is a primary concern.

When the experimental findings, performance tables, and training curves are jointly considered, it becomes evident that model performance should not be evaluated solely based on accuracy. Training time, parameter count, and hardware requirements must also be taken into account. The multiple GPU-based experimental repetitions confirmed the stability and robustness of the reported results, while the representative CPU-based experiments clearly demonstrated the importance of hardware acceleration for deep learning-based emotion recognition.

This study also has certain limitations. First, the experiments were conducted on a single dataset, and no cross-dataset validation was performed to assess robustness across different cultural and demographic contexts. Additionally, data augmentation techniques were not employed, and the analysis focused exclusively on static facial images, excluding temporal information from video sequences.

Another limitation is the restricted number of emotion categories in the dataset. Future work will extend the analysis to benchmark datasets containing neutral and additional expressions to further validate the findings.

It should be noted that most studies in the literature report results using different datasets, preprocessing pipelines, and evaluation protocols, making direct comparison inherently challenging. Therefore, the purpose of Table 5 is not to claim superiority over prior works, but rather to position the obtained results within the commonly reported performance range. In addition to this contextualization, the present study aims to offer an alternative evaluation perspective to existing approaches by jointly analyzing recognition performance together with training cost, parameter size, and computational behavior—factors that are often overlooked

in earlier studies. This comparison demonstrates that the proposed framework achieves competitive accuracy while providing a more comprehensive understanding of model selection criteria for practical applications. Future work will extend this evaluation to multiple benchmark datasets to further validate generalizability.

Future research may extend this work by conducting cross-dataset evaluations to further assess generalization performance. Incorporating multimodal cues such as head pose, eye movements, or facial muscle activations may further enhance recognition accuracy. Moreover, exploring Vision Transformers (ViT) and hybrid CNN–Transformer architectures could provide valuable insights into architectural advancements for emotion analysis. Finally, investigating model compression, quantization, and knowledge distillation techniques would significantly broaden the applicability of these models in real-time and embedded systems.

Recent studies have explored transformer-based architectures such as Vision Transformers (ViT) for facial emotion recognition, offering an alternative to convolutional models through global attention mechanisms. While such architectures may provide advantages in large-scale datasets, the present study focuses on widely adopted CNN backbones to analyze performance–efficiency trade-offs under limited-resolution conditions. Future work may extend this framework to include transformer-based models and cross-dataset validation to further examine generalizability. Additionally, visualizing computational cost–performance relationships using Pareto-style analysis could provide further insights into model selection for deployment-oriented scenarios.

In conclusion, this study presents a comprehensive and comparative analysis of deep learning architectures for facial emotion recognition under a two-stage transfer learning paradigm. By explicitly addressing the trade-off between classification performance and computational cost, the findings offer valuable guidance for both academic research and real-world deployment scenarios.

Acknowledgement: The authors acknowledge the use of Grammarly, Instatext, and generative artificial intelligence tools during the language editing process of this manuscript. In addition, the authors would like to thank Andrea Piacquadio for her contributions to the creation of the dataset used in this study.

Author contributions: All authors contributed equally to the preparation of this study.

Declaration of ethical code: All procedures conducted in this study comply with the principles and regulations stated in the Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive. None of the actions defined under the title Actions Contrary to Scientific Research and Publication Ethics in the directive were committed during the preparation of this study.

Ethics committee approval: This study does not involve any ethical violations and does not require ethics committee approval.

Conflicts of interest: The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this study.

References

Ali, G., Ali, A., Ali, F., Draz, U., Majeed, F., Yasin, S., & Haider, N. (2023). Artificial neural network-based ensemble approach for multicultural facial expressions analysis. *IEEE Access, 8,* 134950–63.

Calvo, R. A., & D'Mello, S. (2010). Affect detection: An interdisciplinary review of models, methods, and their applications. *IEEE Transactions on Affective Computing, 1(1),* 18–37. https://doi.org/10.1109/T-AFFC.2010.1

Darraz, N., Karabila, I., El-Ansari, A., Alami, N., & El Mallahi, M. (2025). Integrated sentiment analysis with BERT for enhanced hybrid recommendation systems. *Expert Systems with Applications, 261,* Article 125533. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.125533

Ekman, P., & Friesen, W. V. (1971). Constants across cultures in the face and emotion. *Journal of Personality and Social Psychology, 17(2),* 124–129. https://doi.org/10.1037/h0030377

Gao, X., Liu, F., Zhuang, X., Zhang, Y., Tian, X., Dong, Y., & Yang, H. (2026). A unified dual-view knowledge-guided sentiment interaction networks for aspect-based sentiment analysis. *Neural Networks, 194,* Article 108159. https://doi.org/10.1016/j.neunet.2025.108159

Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep learning. MIT Press, 800 pp.

He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. In Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) pp. 770–778, USA. https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90

Huang, G., Liu, Z., Van Der Maaten, L., & Weinberger, K. Q. (2017). Densely connected convolutional networks. In Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 4700–4708, USA. https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.243

Huang, X., Sun, H., Liu, X., Wu, J., & He, L. (2026). Text-dominant speech-enhanced network for multimodal aspect-based sentiment analysis. *Information Fusion, 126*, Article 103543. https://doi.org/10.1016/j.inffus.2025.103543

LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature, 521(7553),* 436–444. https://doi.org/10.1038/nature14539

Li, S., & Deng, W. (2020). Deep facial expression recognition: A survey. *IEEE Transactions on Affective Computing, 13(3),* 1195–1215. https://doi.org/10.1109/TAFFC.2020.2981446

Li, X., Lai, S., & Qian, X. (2021). DBCFace: towards pure convolutional neural network face detection. I*EEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, *32(4),* 1792-1804,. https://doi.org/10.1109/TCSVT.2021.3082635

Li, Z., Huang, Z., Pan, Y., Yu, J., Liu, W., Chen, H., & Wang, H. (2024). Hierarchical denoising representation disentanglement and dual-channel cross-modal-context interaction for multimodal sentiment analysis. *Expert Systems with Applications, 252(B),* Article 124236. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124236

Mollahosseini, A., Hasani, B., & Mahoor, M. H. (2017). AffectNet: A database for facial expression, valence, and arousal computing in the wild. *IEEE Transactions on Affective Computing, 10(1),* 18–31. https://doi.org/10.1109/TAFFC.2017.2740923

Mughal, N., Mujtaba, G., Shaikh, S., Kumar, A., & Daudpota, S. M. (2024). Comparative analysis of deep neural networks and large language models for aspect-based sentiment analysis. *IEEE Access, 12,* 60943–60959. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3386969

Pan, S. J., & Yang, Q. (2010). A survey on transfer learning. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 22(10)*, 1345–1359. https://doi.org/10.1109/TKDE.2009.191

Pandey, A., & Vishwakarma, D. K. (2024). Progress, achievements, and challenges in multimodal sentiment analysis using deep learning: A survey. *Applied Soft Computing, 152,* Article 111206. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.111206

Pranav, E., Kamal, S., Chandran, C. S., & Supriya, M. H. (2020). Facial emotion recognition using deep convolutional neural network. 6th International conference on advanced computing and communication Systems (ICACCS), IEEE. pp. 317–20, Indiana.

Ruan, S., Zhang, K., Wu, L., Xu, T., Liu, Q., & Chen, E. (2024). Color enhanced cross correlation net for image sentiment analysis. *IEEE Transactions on Multimedia, 26*, 4097–4109. https://doi.org/10.1109/TMM.2021.3118208

Sandler, M., Howard, A., Zhu, M., Zhmoginov, A., & Chen, L. C. (2018). MobileNetV2: Inverted residuals and linear bottlenecks. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 4510–4520, USA. https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00474

Song, L., Chen, S., Meng, Z., Sun, M., & Shang, X. (2024). FMSA-SC: A fine-grained multimodal sentiment analysis dataset based on stock comment videos. *IEEE Transactions on Multimedia, 26,* 7294–7306. https://doi.org/10.1109/TMM.2024.3363641

Szegedy, C., Vanhoucke, V., Ioffe, S., Shlens, J., & Wojna, Z. (2016). Rethinking the inception architecture for computer vision. Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) pp. 2818–2826, USA. https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.308

Verma, A., Singh, P., & Alex, J. S. R. (2019). Modified convolutional neural network architecture analysis for facial emotion recognition. 26th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP 2019), pp. 169–173, Croatia.

Yang, L., Tian, Y., Song, Y., Yang, N., Ma, K., & Xie, L. (2020). A novel feature separation model exchange-GAN for facial expression recognition. *Knowledge-Based Systems, 204,* 106217.

Yang, J., Xiao, Y., & Du, X. (2024). Multi-grained fusion network with self-distillation for aspect-based multimodal sentiment analysis. *Knowledge-Based Systems, 293,* 111724. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2024.111724

Zhang, X., Zhang, F., & Xu, C. (2021). Joint expression synthesis and representation learning for facial expression recognition. *IEEE Trans Circuits Syst Video Technol., 32(3),* 1681–95.

Zeng, Z., Pantic, M., Roisman, G. I., & Huang, T. S. (2009). A survey of affect recognition methods: Audio, visual, and spontaneous expressions. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 31(1),* 39–58. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2008.52

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi
Dergi web sayfası: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen
DOI: 10.7212/karaelmasfen.1870923

Araştırma Makalesi
Geliş tarihi / Received : 24.01.2026
Kabul tarihi / Accepted : 04.06.2026

Gecikmeli Diferansiyel Denklemin Nümerik Çözümü İçin Etkili Bir Yaklaşım

An Efficient Approach for Numerical Solution of Delay Differential Equation

Erkan Çimen[1*], Neslişah Tekin[2]

[1]Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Matematik Bölümü, Van, Türkiye
[2]Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Matematik Bölümü, Van, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, birinci mertebeden lineer gecikmeli diferansiyel denklemler için başlangıç değer probleminin çözümü için yeni bir nümerik şema önerilmiştir. Bu şema, kalan terimleri integral formda olan quadratür kuralları kullanarak düzgün bir şebeke üzerinde sonlu farklar yöntemi ile oluşturulmuştur. Şemanın ayrık maksimum normda ikinci mertebeden yakınsamaya ulaştığı kanıtlanmıştır. Son olarak, yöntemin doğruluğunu ve performansını göstermek için bir test problemi ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Gecikmeli diferansiyel denklem, hata analizi, sonlu fark metodu, yakınsaklık

Abstract

In this paper, a new numerical scheme for solving the initial value problem for first order linear delay differential equations is proposed. This scheme is constructed using the finite difference method on a uniform mesh using quadrature rules, with the remaining terms in integral form. The scheme is proven to achieve second-order convergence in the discrete maximum norm. Finally, a test problem is considered to demonstrate the accuracy and performance of the method.

Keywords: Convergence, delay differential equation, error analysis, finite difference method

1. Giriş

Zamana (t'ye) bağlı bir diferansiyel denklemde, bilinmeyen fonksiyon ve türevlerinin (en yüksek mertebeden türev hariç) t ve t'den önceki anlara bağlı olan denklem gecikmeli diferansiyel denklem olarak adlandırılmaktadır. Bu tür denklemler temel bilimlerin birçok uygulamalarında model denklem olarak ortaya çıkmaktadır (Driver, 1977; Beuter vd., 1993; Kuang, 1993; Baker vd., 1998; Villasana & Radunskaya, 2003; Balachandran vd., 2009; Foley & Mackey, 2009; Kyrychko & Hogan, 2010; Liz & Röst, 2013; Getto & Waurick, 2016; Guo & Ma, 2016; Rihan vd., 2019). Kanser hücrelerindeki tümör popülasyonu, köprü inşası, trafik kontrolü, robot teknolojisi, iklim sistemleri bunlardan bazılarıdır (Kolmanovskii & Myshkis, 1999; Balachandran vd., 2009; Keane vd., 2017; Rihan vd., 2019;). Bundan dolayı gecikmeli diferansiyel denklemler için yapılan çalışmalar her geçen gün artmaktadır. Bu çalışmaların çoğunluğunu kararlık analizi ve çözümün salınım özelliklerinin incelenmesinden meydana gelmektedir (Hopfield, 1984; Gopalsamy, 1992; Hairer vd., 2008; Li vd., 2010; Berezansky vd., 2015; Zeng vd., 2016; Zhao vd., 2017). Bununla birlikte nümerik yaklaşımlar da bulunmaktadır. Literatüre bakıldığında gecikmeli diferansiyel denklemlerin nümerik çözümleri için çeşitli metotlar kullanılarak araştırıldığı gözlenmektedir (Bellen & Zennaro, 2003; Bellen vd., 2009; Cimen & Ekinci, 2017; Cimen & Uncu, 2021; Obut vd., 2023).

Bu çalışmada, aşağıdaki birinci mertebeden lineer gecikmeli diferansiyel denklemi için başlangıç değer problemi ele alınmaktadır:

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: cimenerkan@homail.com

Erkan Çimen orcid.org/0000-0002-7258-192X
Neslişah Tekin orcid.org/0009-0008-5834-7425

Bu eser "Creative Commons Alıntı-GayriTicari-4.0 Uluslararası Lisansı" ile lisanslanmıştır.

$$u'(t) + a(t)u(t) + b(t)u(t-r) = f(t), 0 < t \le T, \quad (1.1)$$

$$u(t) = \varphi(t), -r \le t \le 0\,, \quad (1.2)$$

burada $a(t) \ge \alpha > 0, b(t), f(t)$ ve başlangıç fonksiyonu $\varphi(t)$ yeterince düzgün, reel değerli fonksiyonlar ve $r > 0$ reel sabittir. $a(t), b(t), f(t)$ fonksiyonları $[0,T]$ aralığında ve $\varphi(t)$ fonksiyonu $[-r,0]$ aralığında sürekli ise (1.1)-(1.2) probleminin bir tek çözümü vardır (Kolmanovskii & Myshkis, 1999; Bellen & Zennaro, 2003). İncelenen problem lineer olsa bile problemin analitik çözümünü bulmak her zaman mümkün olmadığından bu tür problemlerin çözümü için etkili nümerik yöntemler geliştirmek önemlidir.

Çalışmanın amacı (1.1)-(1.2) probleminin çözümü için etkili bir nümerik yöntem sunmaktır. Sunulacak metot, düzgün şebeke üzerinde kalan terimi integral biçiminde olan interpolasyon quadratür formülleri yardımıyla elde edilen sonlu fark şemasını içermektedir. Metodun bir avantajı, Euler, Runge-Kutta gibi klasik yöntemlere göre bilinmeyen fonksiyonun ($u(t)$'nin) sadece 2. mertebeye kadar türevlerinin sınırlı olmasının yeterli olmasıdır. Dahası, nümerik yöntemin analitik çözüme 2. mertebeden yakınsaması, herhangi bir ekstrapolasyon yöntemi kullanılmadan, doğrudan elde edilmektedir, bu ise metodun diğer avantajıdır.

Çalışmanın 2. bölümünde (1.1)-(1.2) problemindeki bilinmeyen fonksiyonun ve türevleri için bazı analitik sonuçlarını incelenmektedir. Sonraki bölümde, düzgün şebeke üzerinde sonlu fark şeması inşa edilmektedir. 4. bölümde, bu şema üzerinde hata değerlendirmesi yapılarak yakınsaklık sonuçları verilmektedir. Teorik sonuçları destekleyen nümerik sonuçlar 5. bölümde yer almaktadır. Son bölümde ise elde edilen sonuçların bir özeti sunulmaktadır.

$v(t)$, $t \in [0,T]$ aralığında sürekli bir fonksiyon için aşağıda tanımlanan normlar çalışmada kullanılacaktır: $\|v\|_\infty = \max_{t\in[0,T]}|v(t)|$, $\|v\|_1 = \int_0^T |v(t)|dt$. Ayrıca, tüm çalışma boyunca C ve indisleri, şebeke adımından bağımsız pozitif genel sabitlerdir.

2. Bazı Ön Değerlendirmeler

Bu kısımda nümerik metot sunulmadan önce (1.1)-(1.2) probleminin çözümünün ve türevlerinin bazı özellikleri verilecektir. Çalışmanın sonraki kısımlarında bu özelliklere ihtiyaç duyulacaktır.

Lemma 2.1. (Mitrinovic vd., 1991) $p(t)$ ve $v(t)$ negatif olmayan sürekli fonksiyonlar olsun. Eğer $C > 0$ reel sabit ve

$$v(t) \le C + \int_0^t p(s)v(s)\,ds,$$

ise bu durumda

$$v(t) \le Ce^{\int_0^t p(s)ds}.$$

Lemma 2.2. $a, b, f \in C^1[0,T]$, $\varphi \in C[-r,0]$ olsun. Bu durumda aşağıdaki değerlendirmeler doğrudur:

$$\|u\|_\infty \le C_0\,, \quad (2.1)$$

$$\left\|u^{(k)}\right\|_\infty \le C, k = 1,2, \quad (2.2)$$

$$C_0 = [|\varphi(0)| + \|f\|_1 + \|b\|_\infty\|\varphi\|_1]e^{\|b\|_\infty T}.$$

İspat: (1.1) denklemi düzenlenirse

$$u'(t) + a(t)u(t) = F(t),$$

$$F(t) = f(t) - b(t)u(t-r)$$

yazılabilir. Bu denklemin çözümünden

$$u(t) = u(0)e^{-\int_0^t a(s)ds} + \int_0^t F(\tau)e^{-\int_\tau^t a(s)ds}\,d\tau$$
$$= \varphi(0)e^{-\int_0^t a(s)ds} + \int_0^t [f(\tau) - b(\tau)u(\tau-r)]e^{e^{-\int_\tau^t a(s)ds}}\,d\tau$$

elde edilir. Buradan

$$|u(t)| \le |\varphi(0)|e^{-\alpha t} + \int_0^t [|f(\tau)| + |b(\tau)||u(\tau-r)|]e^{-\alpha(t-\tau)}\,d\tau$$
$$\le |\varphi(0)| + \int_0^t |f(\tau)|d\tau + \|b\|_\infty \int_0^t u(\tau-r)d\tau$$

elde edilir. Bu eşitsizliğin ikinci integrali için $x = \tau - r$ dönüşümü uygulanırsa,

$$|u(t)| \le |\varphi(0)| + \|f\|_1 + \|b\|_\infty \int_{-r}^{t-r} |u(x)|dx$$

$$\le |\varphi(0)| + \|f\|_1 + \|b\|_\infty \int_{-r}^{0} |\varphi(x)|dx + \|b\|_\infty \int_0^{t-r} |u(x)|dx$$

$$\le |\varphi(0)| + \|f\|_1 + \|b\|_\infty ||\varphi||_1 + \|b\|_\infty \int_0^t |u(x)|dx$$

bulunur. Gronwall eşitsizliği (Lemma 2.1) bu son eşitsizlikte dikkate alınırsa,

$$|u(t)| \leq [|\varphi(0)| + \|f\|_1 + \|b\|_\infty ||\varphi||_1] e^{\|b\|_\infty t}$$

$$\leq [|\varphi(0)| + \|f\|_1 + \|b\|_\infty ||\varphi||_1] e^{\|b\|_\infty T}$$

sonucuna ulaşılır, bu ise (2.1) eşitsizliğini doğrular. Şimdi (1.1) denkleminden

$$u'(t) = -a(t)u(t) - b(t)u(t-r) + f(t)$$

yazılır ve buradan

$$|u'(t)| \leq |a(t)||u(t)| + |b(t)||u(t-r)| + |f(t)|$$

elde edilir. Lemmanın şartlarından ve (2.1)'den

$$|u'(t)| \leq \|a\|_\infty C_0 + \|b\|_\infty C_0 + \|f\|_\infty \qquad (2.3)$$

sonucuna varılır, bu ise $k = 1$ için (2.2) eşitsizliğini doğrular. Şimdi de $k = 2$ durumunda (2.2) eşitsizliğinin doğruluğunun gösterilmesi için (1.1) denklemi bir kez türetilirse:

$$u''(t) = a'(t)u(t) + a(t)u'(t) + b'(t)u(t-r) + b(t)u'(t-r) + f'(t),$$

elde edilir. Buradan da

$$|u''(t)| \leq |a'(t)||u(t)| + |a(t)||u'(t)| + |b'(t)||u(t-r)| + |b(t)||u'(t-r)| + |f'(t)|$$

yazılabilir. Yine lemmanın şartlarından, (2.1) ve (2.3) eşitsizliklerinden,

$$|u''(t)| \leq \|a'\|_\infty C_0 + \|a\|_\infty C + |\|b'\|_\infty C_0 + \|b\|_\infty C + \|f'\|_\infty$$

sonucuna ulaşılır. Böylece ispat tamamlanır.

3. Fark Şemasının Kurulması

ω_{N_0}, $[0, T]$ aralığında düzgün bir şebeke olsun:

$$\omega_{N_0} = \left\{ t_i = ih, i = 1,2, \dots, N_0;\ h = \frac{T}{N_0} = \frac{r}{N} \right\}.$$

Her $I_k = \{t: r_{k-1} < t \leq r_k;\ r_k = kr; T = mr\} (1 \leq k \leq m)$

alt aralığında N adet düğüm noktası içeren

$$\omega_k = \{t_i : (k-1)N + 1 \leq i \leq kN, 1 \leq k \leq m\}$$

şebekesi tanımlansın. Sonuç olarak,

$$\omega_{N_0} = \cup_{k=1}^{m} \omega_k$$

olacaktır. Dahası $\bar{\omega}_{N_0} = \omega_{N_0} \cup \{t_0 = 0\}$. Gösterimi basitleştirmek için, herhangi bir $v(t)$ fonksiyonu için $v_i = v(t_i)$ olarak alınacaktır. Buna ilave olarak, y_i ise $u(t)$'nin t_i'deki yaklaşımını ifade etmektedir. Ayrıca, ω_{N_0} üzerinde tanımlanan herhangi bir v_i şebeke fonksiyonu için,

$$v_{\bar{t},i} = \frac{v_i - v_{i-1}}{h},\ \|v\|_\infty = \max_{t_i \in \omega_{N_0}} |v(t_i)|,\ \|v\|_1 = h \sum_{k=1}^{N_0} |v(t_k)|$$

gösterimleri kullanılacaktır.

(1.1)-(1.2) probleminin fark şemasını oluşturmak için, ilk olarak (1.1) denklemi $\phi_i(t)$ fonksiyonu ile çarpılarak, $[t_{i-1}, t_i]$ aralığında integrallenir ve sonrasında bazı terimler eklenip çıkartılarak,

$$X_i^{-1} h^{-1} \int_{t_{i-1}}^{t_i} u'(t)\phi_i(t)dt + X_i^{-1} h^{-1} \int_{t_{i-1}}^{t_i} a(t_i)u(t)\phi_i(t)dt$$

$$+ X_i^{-1} h^{-1} \int_{t_{i-1}}^{t_i} b(t_i)u(t-r)\phi_i(t)dt = X_i^{-1} h^{-1} \int_{t_{i-1}}^{t_i} f(t_i)\phi_i(t)dt + R(u) \qquad (3.1)$$

eşitliği elde edilir. Burada

$$R(u) = X_i^{-1} h^{-1} \int_{t_{i-1}}^{t_i} [a(t) - a(t_i)]u(t)\phi_i(t)dt$$

$$+ X_i^{-1} h^{-1} \int_{t_{i-1}}^{t_i} [b(t) - b(t_i)]u(t-r)\phi_i(t)dt - X_i^{-1} h^{-1} \int_{t_{i-1}}^{t_i} [f(t) - f(t_i)]\phi_i(t)dt \qquad (3.2)$$

biçimindedir. Daha sonra, (3.1) eşitliğinin solundaki ilk iki integrale, sırasıyla Amirali & Amirali, (2018)'deki (8) ve (7) formülleri uygulanarak

$$X_i^{-1} h^{-1} \int_{t_{i-1}}^{t_i} u'(t)\phi_i(t)dt + X_i^{-1} h^{-1} a(t_i) \int_{t_{i-1}}^{t_i} u(t)\phi_i(t)dt = + R^{**}(u)$$

$$\theta_i u_{\bar{t},i} + a(t_i)u(t_i) + R^*(u)$$

elde edilir. Burada

$$X_i = h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}\phi_i(t)\,dt,$$

$$\theta_i = 1 + X_i^{-1}h^{-1}a_i\int_{t_{i-1}}^{t_i}(t-t_i)\phi_i(t)dt,$$

$$R^*(u) = -X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}\phi'_i(t)dt\int_{t_{i-1}}^{t_i}u'(s)K_0(t,s)ds,$$

$$R^{**}(u) = X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}a_i\phi_i(t)dt\int_{t_{i-1}}^{t_i}u'(s)K_0(t,s)ds,$$

$$K_0(t,s) = 1 - h^{-1}(t-t_{i-1})$$

biçimindedir. $R^*(u) + R^{**}(u) = 0$ seçilirse, $\phi(t_i)$ fonksiyonu için

$$-\phi_i'(t) + a_i\phi_i(t) = 0, t_{i-1} < t < t_i$$

denklemi elde edilir. $\phi(t_i) = 1$ olarak alınarak, bu problemin çözümü

$$\phi_i(t) = e^{-a_i(t_i-t)} \tag{3.3}$$

olarak bulunur. Böylece,

$$X_i = h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}\phi_i(t)\,dt = \frac{1-e^{-a_ih}}{a_ih}, \tag{3.4}$$

$$\theta_i = 1 + X_i^{-1}h^{-1}a_i\int_{t_{i-1}}^{t_i}(t-t_i)\phi_i(t)dt = \frac{a_ih}{1-e^{-a_ih}}e^{-a_ih} \tag{3.5}$$

olarak bulunur. Şimdi de, (3.1) denkleminin solundaki üçüncü integrale Amirali & Amirali, (2018)'deki (7) formülü uygulanarak

$$X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}b(t_i)u(t-r)\phi_i(t)dt$$

$$= X_i^{-1}h^{-1}b(t_i)\left[\int_{t_{i-1}}^{t_i}\phi_i(t)dt\right]u(t_i-r)$$

$$+X_i^{-1}h^{-1}b(t_i)\frac{u(t_i-r)-u(t_{i-1}-r)}{h}\int_{t_{i-1}}^{t_i}(t-t_i)\phi_i(t)dt + R_i^{(1)}$$

$$= X_i^{-1}h^{-1}b(t_i)\left[\int_{t_{i-1}}^{t_i}\phi_i(t)dt\right]u_{i-N} + X_i^{-1}h^{-1}b(t_i)u_{\bar{t},i-N}$$
$$\int_{t_{i-1}}^{t_i}(t-t_i)\phi_i(t)dt + R_i^{(1)} \tag{3.6}$$

elde edilir. Burada

$$R_i^{(1)} = X_i^{-1}h^{-1}b(t_i)\int_{t_{i-1}}^{t_i}\phi_i(t)dt\int_{t_{i-1}}^{t_i}u''(\xi-r)K_1(t,\xi)d\xi \tag{3.7}$$

ve $K_1(t,\xi) = t - \xi - h^{-1}(t-t_i)(t_{i-1}-\xi)$ biçimindedir.

İkinci olarak, (3.2) denklemindeki $a(t)$ için; t_{i-1}, t_i düğüm noktalarına göre Newton interpolasyon formülü,

$$a(t) - a(t_i) = (t-t_i)a_{\bar{t},i} + \frac{a''(\eta_i(t))}{2}(t-t_{i-1})(t-t_i)$$

şeklindedir. Bu ifade (3.2) deki ilk integralde dikkate alınırsa

$$X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}[a(t)-a(t_i)]u(t)\phi_i(t)dt = X_i^{-1}h^{-1}$$

$$\int_{t_{i-1}}^{t_i}(t-t_i)a_{\bar{t},i}u(t)\phi_i(t)dt$$

$$+X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}\frac{a''(\eta_i(t))}{2}(t-t_{i-1})(t-t_i)u(t)\phi_i(t)dt$$

elde edilir. Ayrıca

$$u(t) = u(t_i) - \int_t^{t_i}u'(s)ds$$

eşitliğini bu son eşitliğin sağındaki ilk integralde dikkate alındığında,

$$X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}[a(t)-a(t_i)]u(t)\phi_i(t)dt$$

$$= X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}(t-t_i)a_{\bar{t},i}u(t_i)\phi_i(t)dt$$

$$-X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}(t-t_i)a_{\bar{t},i}\left[\int_t^{t_i}u'(s)ds\right]\phi_i(t)dt$$

$$+X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}\frac{a''(\eta_i(t))}{2}(t-t_{i-1})(t-t_i)u(t)\phi_i(t)dt$$

$$= X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}(t-t_i)a_{\bar{t},i}u(t_i)\phi_i(t)dt + R_i^{(2)} \tag{3.8}$$

elde edilir. Burada kalan terim

$$R_i^{(2)} = X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}\frac{a''(\eta_i(t))}{2}(t-t_{i-1})(t-t_i)u(t)\phi_i(t)dt$$

$$-X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}a_{\bar{t},i}(t-t_i)\left(\int_t^{t_i}u'(s)ds\right)\phi_i(t)dt \qquad (3.9)$$

olur. Yine (3.2) denklemindeki $b(t)$ için; t_{i-1}, t_i düğüm noktalarına göre Newton interpolasyon formülü,

$$b(t)-b(t_i) = (t-t_i)b_{\bar{t},i} + \frac{b''(\alpha_i(t))}{2}(t-t_{i-1})(t-t_i)$$

biçimindedir. Bu ifade (3.2) deki ikinci integralde dikkate alınırsa

$$X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}[b(t)-b(t_i)]u(t-r)\phi_i(t)dt =$$

$$X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}(t-t_i)b_{\bar{t},i}u(t-r)\phi_i(t)dt + X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}\frac{b''(\alpha_i(t))}{2}(t-t_{i-1})(t-t_i)u(t-r)\phi_i(t)dt$$

olur ve

$$u(t-r) = u(t_i-r) - \int_t^{t_i}u'(s-r)ds$$

eşitliği kullanılırsa

$$X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}[b(t)-b(t_i)]u(t-r)\phi_i(t)dt =$$

$$X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}(t-t_i)b_{\bar{t},i}u(t_i-r)\phi_i(t)dt - X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}(t-t_i)b_{\bar{t},i}\left[\int_t^{t_i}u'(s-r)ds\right]\phi_i(t)dt + X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}\frac{b''(\alpha_i(t))}{2}(t-t_{i-1})(t-t_i)u(t-r)\phi_i(t)dt$$

$$= X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}(t-t_i)b_{\bar{t},i}u(t_i-r)\phi_i(t)dt + R_i^{(3)} \qquad (3.10)$$

elde edilir. Burada kalan terim

$$R_i^{(3)} = X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}\frac{b''(\beta_i(t))}{2}(t-t_{i-1})(t-t_i)u(t-r)\phi_i(t)dt$$

$$-X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}(t-t_i)b_{\bar{t},i}\left(\int_t^{t_i}u'(s-r)ds\right)\phi_i(t)dt \qquad (3.11)$$

olur. Son olarak (3.2) denklemindeki $f(t)$ için; t_{i-1}, t_i düğüm noktalarına göre Newton interpolasyon formülü,

$$f(t)-f(t_i) = (t-t_i)f_{\bar{t},i} + \frac{f''(\gamma_i(t))}{2}(t-t_{i-1})(t-t_i)$$

şeklindedir. Yine bu ifade (3.2) deki son integralde dikkate alınırsa

$$X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}[f(t)-f(t_i)]\phi_i(t)dt = X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}(t-t_i)f_{\bar{t},i}\phi_i(t)dt + R_i^{(4)} \qquad (3.12)$$

elde edilir. Kalan terim

$$R_i^{(4)} = X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}\frac{1}{2}f''(\gamma_i(t))(t-t_{i-1})(t-t_i)\phi_i(t)dt \qquad (3.13)$$

biçimindedir.

Gerekli hesaplamalar yapılarak, (3.1), (3.2), (3.6), (3.8), (3.10) ve (3.12) eşitliklerinden aşağıdaki fark şeması elde edilmektedir:

$$\theta_i u_{\bar{t},i} + \bar{a}_i u_i + c_i u_{\bar{t},i-N} + \bar{b}_i u_{i-N} = \bar{f}_i + R_i. \qquad (3.14)$$

Burada

$$X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}(t-t_i)\phi_i(t)dt = h\delta_{i,}$$

$$\bar{a}_i = a_i + a_{\bar{t},i}h\delta_i, \bar{b}_i = b_i + b_{\bar{t},i}h\delta_i, c_i = h\delta_i b_i, \bar{f}_i = f_i + f_{\bar{t},i}h\delta_i,$$

$$R_i = R_i^{(1)} + R_i^{(2)} + R_i^{(3)} + R_i^{(4)}, \qquad (3.15)$$

biçimindedir, $R_i^{(1)}, R_i^{(2)}, R_i^{(3)}, R_i^{(4)}$ sırasıyla (3.7), (3.9), (3.11) ve (3.13) de ifade edilmiştir. Buradan (3.14) deki hata terimi ihmal edilerek, (1.1)-(1.2) probleminin nümerik çözümü için aşağıdaki fark şeması önerilmektedir:

$$\theta_i y_{\bar{t},i} + \bar{a}_i y_i + c_i y_{\bar{t},i-N} + \bar{b}_i y_{i-N} = \bar{f}_i, 1 \le i \le N_0, \qquad (3.16)$$

$$y_i = \varphi_i, -N \le i \le 0. \qquad (3.17)$$

Şimdi de literatürde Euler yamuksal metot olarak bilinen metodu kullanarak, aşağıdaki alternatif fark şeması öneril-

mektedir (Amirali & Amirali, 2018). Bunun için ilk olarak (1.1) denklemi

$$u'(t) = f(t) - a(t)u(t) - b(t)u(t-r)$$

olarak düzenlenir ve $[t_{i-1}, t_i]$ aralığında integral alınırsa,

$$h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i} u'(t)dt = h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i} [f(t) - a(t)u(t) - b(t)u(t-r)]dt$$

$$u_{\bar{t},i} = h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i} [f(t) - a(t)u(t) - b(t)u(t-r)]dt$$

elde edilir. Eşitliğin sağındaki integrale $[t_{i-1}, t_i]$ aralığı üzerinde Yamuk metodu uygulanırsa,

$$u_{\bar{t},i} = \frac{1}{2}[f(t_{i-1}) - a(t_{i-1})u(t_{i-1}) - b(t_{i-1})u(t_{i-1}-r)] + \frac{1}{2}[f(t_i) - a(t_i)u(t_i) - b(t_i)u(t_i-r)] - R_i^{(5)},$$

$$u_{\bar{t},i} + \frac{1}{2}[a_i u_i + a_{i-1}u_{i-1} + b_i u_{i-N} + b_{i-1}u_{i-N-1}] = \frac{1}{2}[f(t_{i-1}) + f(t_i)] - R_i^{(5)}$$

$$R_i^{(5)} = \frac{h^2}{12}\frac{d^2}{dt^2}[f(t) - a(t)u(t) - b(t)u(t-r)]$$

bulunur. Yine yukarıdaki eşitlikte $R_i^{(5)}$ hata terimi ihmal edilirse, (1.1)-(1.2) probleminin yaklaşık çözümü için aşağıdaki şema da önerilebilir:

$$y_{\bar{t},i} + \tfrac{1}{2}[a_i y_i + a_{i-1}y_{i-1} + b_i y_{i-N} + b_{i-1}y_{i-N-1}] = \tfrac{1}{2}[f(t_{i-1}) + f(t_i)], 1 \le i \le N_0, \quad (3.18)$$

$$y_i = \varphi_i, -N \le i \le 0. \quad (3.19)$$

4. Hata Analizi

Bu bölümde sunulan yöntemin yakınsaklığının araştırılması için,

$$z_i = y_i - u_i, 1 \le i \le N_0$$

hata fonksiyonu tanımlanmaktadır. Öyle ki, bu fonksiyon

$$\theta_i z_{\bar{t},i} + \bar{a}_i z_i + c_i z_{\bar{t},i-N} + \bar{b}_i z_{i-N} = R_i \quad (4.1)$$

$$z_i = 0, -N \le i \le 0, \quad (4.2)$$

probleminin çözümüdür ve R_i, (3.15)'de ifadesi geçen kalan terimdir.

Lemma 4.1. $a, b, f \in C^2[0,T], \varphi \in C^2[-r, 0]$ olsun. Bu durumda (3.15) te ifade edilen R_i için aşağıdaki değerlendirme doğrudur:

$$\|R\|_\infty \le Ch^2. \quad (4.3)$$

İspat. İlk olarak (3.7)'den

$$\left|R_i^{(1)}\right| \le X_i^{-1}h^{-1}|b(t_i)| \int_{t_{i-1}}^{t_i}\phi_i(t)dt \int_{t_{i-1}}^{t_i}|u''(\xi - r)||K_1(t,\xi)|d\xi$$

yazılabilir.

$$|K_1(t,\xi)| \le |t-\xi| + h^{-1}|t-t_i||t_{i-1}-\xi|, t_{i-1} < t, \xi < t_i$$

için

$$|K_1(t,\xi)| \le Ch$$

sonucu ve Lemma 2.2 dikkate alınırsa,

$$\left|R_i^{(1)}\right| \le CX_i^{-1}h^{-1}\|b\|_\infty \int_{t_{i-1}}^{t_i}\phi_i(t)dt \int_{t_{i-1}}^{t_i} hd\xi \le C\|b\|_\infty h^2 X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}\phi_i(t)dt \le Ch^2$$

elde edilir. İkinci olarak, (3.9)'dan

$$\left|R_i^{(2)}\right| \le X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}\frac{\left|a''(\eta_i(t))\right|}{2}|t-t_{i-1}||t-t_i||u(t)|\phi_i(t)dt + X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}\left|a_{\bar{t},i}\right||t-t_i|\left(\int_t^{t_i}|u'(s)|ds\right)\phi_i(t)dt$$

yazılabilir. Lemma 2.2'den

$$\left|R_i^{(2)}\right| \le C\|a''\|_\infty X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}|t-t_{i-1}||t-t_i|\phi_i(t)dt + C\|a\|_\infty X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}|t-t_i|\left(\int_t^{t_i}ds\right)\phi_i(t)dt$$

$$\le C\|a''\|_\infty h^2 X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}\phi_i(t)dt + C\|a\|_\infty h^2 X_i^{-1}h^{-1}$$

$$\int_{t_{i-1}}^{t_i}\phi_i(t)dt \le Ch^2.$$

Benzer biçimde, (3.11)'den

$$\left|R_i^{(3)}\right| \le X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}\frac{\left|b''(\beta_i(t))\right|}{2}|t-t_{i-1}||t-t_i||u(t-r)|\phi_i(t)dt$$

$$+X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}\left|b_{\bar{\tau},i}\right||t-t_i|\left(\int_t^{t_i}|u'(s-r)|ds\right)\phi_i(t)dt$$

ve Lemma 2.2 dikkate alınarak,

$$\left|R_i^{(3)}\right| \le C\|b''\|_\infty X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}|t-t_{i-1}||t-t_i|\phi_i(t)dt$$

$$+C\|b\|_\infty X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}|t-t_i|\left(\int_t^{t_i}ds\right)\phi_i(t)dt$$

$$\le C\|b''\|_\infty h^2 X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}\phi_i(t)dt + C\|b\|_\infty h^2 X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}$$

$$\phi_i(t)dt \le Ch^2.$$

Son olarak (3.13)'den

$$\left|R_i^{(4)}\right| \le X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}\frac{1}{2}|f''(\gamma_i(t))||t-t_{i-1}||t-t_i|\phi_i(t)dt$$

$$\le C\|f''\|_\infty X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}|t-t_{i-1}||t-t_i|\phi_i(t)dt$$

$$\le C\|f''\|_\infty h^2 X_i^{-1}h^{-1}\int_{t_{i-1}}^{t_i}\phi_i(t)dt \le Ch^2$$

elde edilir. Böylece ispat tamamlanır.

Lemma 4.2. b_i ve v_i $(i \in \mathbb{N})$ negatif olmayan reel değerli fonksiyonlar ve $c > 0$ reel sabit olsun. Eğer

$$v_i \le c + \sum_{k=0}^{i-1} b_i v_i$$

ise, o zaman

$$v_i \le c\prod_{k=0}^{i-1}[1+b_k] \le c\exp\left(\sum_{k=0}^{i-1}b_k\right)$$

eşitsizliği doğrudur (Bachpatte, 2002).

Lemma 4.3. (4.1)-(4.2) probleminin çözümü için aşağıdaki eşitsizlik doğrudur:

$$\|z\|_{\infty,\varpi_{N_0}} \le C\|R\|_{1,\varpi_{N_0}}. \qquad (4.4)$$

İspat. (4.1) denklemi düzenlenirse

$$z_i = \frac{\theta_i}{\theta_i+\bar{a}_i h}z_{i-1} + \frac{h}{\theta_i+\bar{a}_i h}g_i$$

yazılabilir. Burada

$$g_i = R_i - \bar{b}_i z_{\bar{\tau},i-N} - \bar{c}_i z_{i-N}$$

biçimindedir. $z_0 = 0$ şartı dikkate alındığında, bu fark probleminin çözümü

$$z_i = \sum_{k=1}^{i}\frac{h}{\theta_k+\bar{a}_k h}g_k\left(\prod_{j=k+1}^{i}\frac{\theta_j}{\theta_j+\bar{a}_j h}\right)$$

olacaktır. Buradan,

$$|z_i| \le \sum_{k=1}^{i}\frac{h}{\theta_k+\bar{a}_k h}|g_k|\left(\prod_{j=k+1}^{i}\frac{\theta_j}{\theta_j+\bar{a}_j h}\right)$$

$\bar{a}_k \ge \bar{\alpha}^{-1} > 0$ ve θ_k nın ifadeleri dikkate alındığında,

$$|z_i| \le C\bar{\alpha}^{-1}\sum_{k=1}^{i}\left\{\frac{h|R_k|}{\theta_k+\bar{a}_k h} + \frac{h|\bar{b}_k|}{\theta_k+\bar{a}_k h}|z_{\bar{\tau},k-N}| + \frac{h|\bar{c}_k|}{\theta_k+\bar{a}_k h}|z_{k-N}|\right\}$$

eşitsizliği elde edilir. Buradan da,

$$|z_i| \le C \sum_{k=1}^{i} \{h|R_k| + |z_{\bar{t},k-N}| + |z_{k-N}|\} \le C \sum_{k=1}^{i} \{h|R_k| + |z_{k-N}| + |z_{k-N-1}|\}$$

$$\le C \left\{ h \sum_{k=1}^{i} |R_k| + \sum_{k=1}^{i} |z_{k-N}| + \sum_{k=1}^{i} |z_{k-N-1}| \right\}$$

elde edilir. Daha sonra $k-N=j$ ve $k-N-1=l$ dönüşümü kullanılırsa,

$$|z_i| \le Ch \sum_{k=1}^{i} |R_k| + C \sum_{j=1-N}^{i-N} |z_j| + C \sum_{l=-N}^{i-N-1} |z_l|$$

$$\le Ch \sum_{k=1}^{i} |R_k| + C\alpha^{-1}h \sum_{j=1-N}^{i} |z_j| + C\alpha^{-1}h \sum_{l=-N}^{i} |z_l|,$$

olur. (4.2)'den, $-N \le i \le 0$ için $z_i = 0$ olduğu dikkate alınırsa,

$$|z_i| \le Ch \sum_{k=1}^{i} |R_k| + 2C \sum_{j=1}^{i} |z_j|$$

elde edilir. Böylece

$$|z_i| \le C\|R\|_1 + 2C \sum_{j=1}^{i} |z_j|$$

eşitsizliği elde edilir. Buradan Lemma 4.2 dikkate alınırsa (4.4) eşitsizliği elde edilir.

Sonunda, çalışmanın temel sonucu olan ve sunulan şemanın yakınsaklığını ifade eden teorem aşağıda verilmektedir.

Teorem 4.1 u, (1.1)-(1.2) probleminin ve y'de (3.16)-(3.17) probleminin çözümü olsun. Bu durumda aşağıdaki değerlendirme doğrudur:

$$\|y-u\|_{\infty,\varpi_{N_0}} \le Ch^2.$$

İspat. Lemma 4.1, Lemma 4.3'te dikkate alındığında hemen bu sonuca ulaşılır.

5. Nümerik Sonuçlar

Bu kısımda (1.1)-(1.2) probleminin yaklaşık çözümü için, düzgün şebekede kurulan (3.16)-(3.17)'de sunulan metot (SM) ve (3.18)-(3.19)'de verilen Euler yamuksal metot (EYM) kullanılarak elde edilen fark şemalarından elde edilen bazı nümerik sonuçlar verilecektir.

Örnek 5.1. Aşağıdaki test problemi ele alınsın:

$$u'(t) + 2u(t) + u(t-1) = e^{t-1}, 0 < t \le 2,$$

$$u(t) = e^t, -1 \le t \le 0.$$

Problemin analitik çözümü

$$u(t) = \begin{cases} e^{-2t}, & 0 < t \le 1, \\ e^{-2t} + \frac{1}{3}e^{t-1} + \left(t - \frac{2}{3}\right)e^{-2(t-1)}, & 1 < t \le 2. \end{cases}$$

şeklindedir. $u(t)$ için noktasal hatalar E_k^N, maksimum noktasal hatalar E^N ve yakınsaklık oranı p^N aşağıdaki gibi tanımlıdır:

$$E_k^N = |y_k - u_k|, E^N = \max_{0 \le k \le N} E_k^N, p^N = \log_2(E^N/E^{2N}).$$

Test probleminin $(0,2)$ aralığında hesaplanan bazı t_k düğüm noktaları için u_k analitik çözüm değerleri, y_k nümerik çözüm değerleri ve noktasal hatalar E_k^N Çizelge 1 ve 2'de verilmektedir. Çizelge 3'te ise test probleminin bazı N değerleri için; sunulan metottan ve klasik yöntemden elde edilen maksimum hata değerleri E^N ve yakınsaklık oranları p^N karşılaştırılmaktadır.

6. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, birinci mertebeden lineer gecikmeli diferansiyel denklemin başlangıç değer probleminin nümerik çözümü incelenmiştir. Bu çözüm için, sonlu fark metodu kullanılarak yeni bir fark şeması kurulmuştur. Bu şemanın kararlılığı ve yakınsaklığı incelenmiş ve ayrık maksimum norma göre ikinci mertebeden yakınsaklığı kanıtlanmıştır. Teorik sonuçları destekleyen bir örnek sunularak elde edilen sonuçlar çizelgelerde verilmiştir. Çizelgelerdeki veriler teorik sonuçları doğrulamaktadır. Ayrıca sunulan şema, klasik Euler şemasıyla karşılaştırılmıştır. Çizelge 3'teki ve-

Çizelge 1. (0,2] aralığında $N = 64$ için test probleminin nümerik sonuçları (SM).

t_k	u_k	y_k	E_k^N
0.125	0.7788008	0.7788008	3.33067 E-16
0.250	0.6065307	0.6065307	3.33067 E-16
0.375	0.4723666	0.4723666	4.44089 E-16
0.500	0.3678794	0.3678794	4.44089 E-16
0.625	0.2865048	0.2865048	4.99600 E-16
0.750	0.2231302	0.2231302	4.44089 E-16
0.875	0.1737739	0.1737739	4.16334 E-16
1.000	0.1353353	0.1353353	3.88578 E-16
1.125	0.1261650	0.1261595	5.51968 E-06
1.250	0.1562839	0.1562762	7.74599 E-06
1.375	0.2143320	0.2143243	7.75245 E-06
1.500	0.2927946	0.2927883	6.28373 E-06
1.625	0.3869558	0.3869519	3.84656 E-06
1.750	0.4941397	0.4941389	7.76280 E-07
1.875	0.6131660	0.6131687	2.71469 E-06
2.000	0.7439625	0.7439690	6.50183 E-06

Çizelge 2. (0,2] aralığında $N = 64$ için test probleminin nümerik sonuçları (EYM).

t_k	u_k	y_k	E_k^N
0.125	0.7788008	0.7787849	1.58469 E-05
0.250	0.6065307	0.6065060	2.46829 E-05
0.375	0.4723666	0.4723377	2.88343 E-05
0.500	0.3678794	0.3678495	2.99413 E-05
0.625	0.2865048	0.2864756	2.91476 E-05
0.750	0.2231302	0.2231029	2.72399 E-05
0.875	0.1737739	0.1737492	2.47499 E-05
1.000	0.1353353	0.1353133	2.20287 E-05
1.125	0.1261650	0.1261300	3.50085 E-05
1.250	0.1562839	0.1562461	3.77983 E-05
1.375	0.2143320	0.2142971	3.49160 E-05
1.500	0.2927946	0.2927654	2.92233 E-05
1.625	0.3869558	0.3869333	2.24701 E-05
1.750	0.4941397	0.4941240	1.56714 E-05
1.875	0.6131660	0.6131566	9.36677 E-06
2.000	0.7439625	0.7439587	3.79515 E-06

Çizelge 3. (0,2] aralığında her iki metodun karşılaştırılması

N	E^N (EYM)	p^N	E^N (SM)	p^N
32	1.51270 E-4	1.999	3.19035 E-5	2.000
64	3.78338 E-5	2.000	7.97365 E-6	2.000
128	9.45726 E-6	2.000	1.99327 E-6	2.000
256	2.36424 E-6	2.000	4.98310 E-7	2.000
512	5.91063 E-7	2.000	1.24579 E-7	2.000
1024	1.47766 E-7	2.000	3.11448 E-8	2.000

riler incelendiğinde; sunulan şema aynı yakınsama oranına ($p^N \approx 2$) sahip olsa da klasik Euler şemasına kıyasla daha fazla verimliliğe ve doğruluğa sahip olduğu görülmüştür. Bu ise, sunulan şemanın, hem kalan terimi integral biçiminde olan quaratür formülleri hem de üstel katsayılı baz fonksiyonu kullanılarak elde edilmesinin sonucudur. Sunulan bu yöntem, nötral, Volterra integro gecikmeli diferansiyel denklemlerin nümerik çözümleri için yol gösterici niteliktedir.

Teşekkür: Araştırmacılar olarak çalışmayı değerlendiren editörlere ve hakemlere teşekkür ederiz.

Yazar katkısı: Erkan ÇİMEN: çalışmayı planlamış ve tasarlamıştır, Neslişah TEKİN: Çalışmanın analizlerini yaparak makaleyi yazmıştır.

Etik kurul onayı: Çalışma için etik kurul onayı gerekli değildir.

Kaynaklar

Amirali, G., & Amirali, İ. (2018). *Nümerik Analiz*. Seçkin Yayıncılık, Ankara.

Bachpatte, B. G. (2002). *Inequalities for Finite Difference Equations*. Marcel Dekker, New York.

Baker, C. T. H., Bocharov, G. A., Paul, C. A. H., & Rihan, F. A. (1998). Modelling and analysis of time-lags in some basic patterns of cell proliferation. *Journal of Mathematical Biology*, 37, 341-371. https://doi.org/10.1007/s002850050133

Balachandran, B., Nagy, T. K., & Gilsinn, D. E. (2009). *Delay Differential Equations*. Springer, New York. https://doi.org/10.1007/978-0-387-85595-0

Bellen, A., Maset, S., Zennaro, M., & Guglielmi, N. (2009). Recent trends in the numerical solution of retarded functional differential equations. *Acta Numerica*,18, 1-110. https://doi.org/10.1017/S0962492906390010

Bellen, A., & Zennaro, M. (2003). *Numerical Methods for Delay Differential Equations*. Oxford University Press, Oxford.

Berezansky, L., Domoshnitsky, A., Gitman, M., & Stolbov, V. (2015). Exponential stability of a second order delay differential equation without damping term. *Applied Mathematics and Computation*, 258, 483-488. https://doi.org/10.1016/j.amc.2015.01.114

Beuter, A., Belair, J., & Labrie, C. (1993). Feedback and delays in neurological diseases: a modeling study using dynamical systems. *Bulletin of Mathematical Biology*, 55, 525-541. https://doi.org/10.1016/S0092-8240(05)80238-1

Cimen, E., & Ekinci, Y. (2017). Numerical method for a neutral delay differential problem. *International Journal of Mathematics and Computer Science*, 1, 1-11.

Cimen, E., & Uncu, S. (2021). An efficient method for solving second-order delay differential equation. *Miskolc Mathematical Notes*, 22(2), 625-638. https://doi.org/10.18514/MMN.2021.3325

Driver, R. D. (1977). *Ordinary and Delay Differential Equations*. Springer-Verlag, New York.

Foley, C., & Mackey, M. C. (2009). Dynamic hematological disease: a review. *Journal of Mathematical Biology*, 58, 285-322. https://doi.org/10.1007/s00285-008-0165-3

Getto, P., & Waurick, M. (2016). A differential equation with state-dependent delay from cell population biology. *Journal of Differential Equations*, 260, 6176-6200. https://doi.org/10.1016/j.jde.2015.12.038

Gopalsamy, K. (1992). *Stability and Oscillations in Delay Differential Equations of Population Dynamics*. Springer, Netherlands.

Guo, S., & Ma, W. (2016). Global behavior of delay differential equations model of HIV infection with apoptosis. *Discrete and Continuous Dynamical Systems Series B*, 21, 103-119. https://doi.org/10.3934/dcdsb.2016.21.103

Hairer, E., Norsett, S. P., & Wanner, G. (2008). *Solving Ordinary Differential Equations I*. Springer, New York. https://doi.org/10.1007/978-3-540-78862-1

Hopfield, J. J. (1984). Neurons with graded response have collective computational properties like those of two-state neurons. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 81, 3088-3092. https://doi.org/10.1073/pnas.81.10.3088

Keane, A., Krauskopf, B., & Postlethwaite, C. M. (2017). Climate models with delay differential equations. *Chaos*, 27, 114309: 1-15. https://doi.org/10.1063/1.5006923

Kolmanovskii, V., & Myshkis, A. (1999). *Introduction to the Theory and Applications of Functional Differential Equations*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-1965-0

Kuang, Y. (1993). *Delay Differential Equations with Applications in Population Dynamics*. Academic Press, New York.

Kyrychko, Y. N., & Hogan, S. J. (2010). On the use of delay equations in engineering applications. *Journal of Vibration and Control*, 16(7-8), 943-960. https://doi.org/10.1177/1077546309341100

Li, W., Huang, C., & Gan, S. (2010). Delay-dependent stability analysis of trapezium rule for second order delay differential equations with three parameters. *Journal of the Franklin Institute*, 347, 1437-1451. https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2010.06.013

Liz, E. & Röst, G. (2013). Global dynamics in a commodity market model. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 398. 707-714. https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2012.09.024

Mitrinovic, D. S., Pecaric, J. E., & Fink, A. M. (1991). *Inequalities Involving Functions and Their Integrals and Derivatives*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-3562-7

Obut, T., Cimen, E., & Cakir, M. (2023). A novel numerical approach for solving delay differential equations arising in population dynamics. *Mathematical Modelling and Control*, 3(3), 233-243. https://doi.org/10.3934/mmc.2023020

Rihan, F. A., Lakshmanan, S., & Maurer, H., (2019). Optimal control of tumour-immune model with time-delay and immuno-chemotherapy. *Applied Mathematics and Computation*, 353, 147-165. https://doi.org/10.1016/j.amc.2019.02.002

Villasana, M., & Radunskaya, A. (2003). A delay differential equation model for tumor growth. *Journal of Mathematical Biology*, 47, 270-294. https://doi.org/10.1007/s00285-003-0211-0

Zeng, X., Xiong, Z., & Wang, C. (2016). Hopf bifurcation for neutral-type neural network model with two delays, *Applied Mathematics and Computation*, 282: 17-31. https://doi.org/10.1016/j.amc.2016.01.050

Zhao, J., Fan, Y., & Xu, Y. (2017). Delay-dependent stability of symmetric Runge-Kutta methods for second order delay differential equations with three parameters. *Applied Numerical Mathematics*, 11, 103-114. https://doi.org/10.1016/j.apnum.2017.03.005

Karaelmas Science and Engineering Journal
Journal home page: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen
DOI: 10.7212/karaelmasfen.1871211

Research Article
Received / Geliş tarihi : 25.01.2026
Accepted / Kabul tarihi : 27.05.2026

Extraction-Dependent Phenolic Profile and Antioxidant Activity of *Jordania cherlerioides* (Bornm.) Rabeler & Madhani

Jordania cherlerioides (Bornm.) Rabeler & Madhani' nin Ekstraksiyon Yöntemine Bağlı Fenolik Profili ve Antioksidan Aktivitesi

Derya Altay[1*], Murat Koç[2]

[1]Ankara Yıldırım Beyazıt University, Vocational School of Health Services, Department of Medical Services and Techniques, Ankara, Türkiye

[2]Yıldırım Beyazıt University, Complementary and Integrative Medicine, Department of Traditional, Ankara, Türkiye

Abstract

The efficient recovery of plant-derived phenolic compounds is strongly influenced by the extraction method employed, which directly determines the biological potential of the resulting extracts. In this study, conventional and green extraction techniques were comparatively evaluated for the first time to recover phenolic compounds from *Jordania cherlerioides* (Bornm.) Rabeler & Madhani using methanol as the solvent. Maceration (MAC), Soxhlet extraction (SE), microwave-assisted extraction (MAE), ultrasonic bath-assisted extraction (UBAE), and ultrasonic probe-assisted extraction (UPAE) were applied. The extracts were characterized in terms of extraction yield, total phenolic content (TPC), total flavonoid content (TFC), antioxidant activity determined by DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl), ABTS (2,2′-azinobis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)), and FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power) assays, and phenolic composition. The results demonstrated that phenolic recovery and antioxidant capacity varied significantly with the extraction technique. The highest TPC (84.07 ± 0.13 mg GAE/g) and TFC (25.83 ± 0.16 mg QE/g) values were obtained using MAC, whereas the highest extraction yield (14.19%) was achieved with SE. Antioxidant assays showed that MAC extracts exhibited the strongest free radical scavenging activity and reducing power. Furthermore, the phenolic profile of J. cherlerioides extracts was reported for the first time using LC–MS/MS (Liquid Chromatography–Tandem Mass Spectrometry) analysis. Rutin was the predominant compound in all extracts, while rosmarinic acid, apigenin, and protocatechuic acid occurred at method-dependent levels for applications.

Keywords: Antioxidant activity, extraction techniques, *Jordania cherlerioides*, LC-MS/MS analysis, phenolic compounds

Öz

Bitkisel kaynaklı fenolik bileşiklerin etkin şekilde geri kazanımı, kullanılan ekstraksiyon yönteminden büyük ölçüde etkilenmekte olup bu durum elde edilen ekstrelerin biyolojik potansiyelini doğrudan belirlemektedir. Bu çalışmada, *Jordania cherlerioides* (Bornm.) Rabeler & Madhani bitkisinden fenolik bileşiklerin metanol çözücüsü kullanılarak elde edilmesinde, geleneksel ve yeşil ekstraksiyon teknikleri ilk kez karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Maserasyon (MAC), Soxhlet ekstraksiyonu (SE), mikrodalga destekli ekstraksiyon (MAE), ultrasonik banyo destekli ekstraksiyon (UBAE) ve ultrasonik prob destekli ekstraksiyon (UPAE) yöntemleri uygulanmıştır. Elde edilen ekstreler; ekstraksiyon verimi, toplam fenolik madde (TPC), toplam flavonoid madde (TFC), DPPH (2,2-difenil-1-pikrilhidrazil), ABTS (2,2′-azinobis (3-etilbenzotiyazolin-6-sülfonik asit) ve FRAP (Demir (III) indirgeme antioksidan gücü) testleriyle belirlenen antioksidan aktivite ve fenolik bileşik kompozisyonu açısından karakterize edilmiştir. Sonuçlar, fenolik geri kazanımı ve antioksidan kapasitenin ekstraksiyon tekniğine bağlı olarak anlamlı düzeyde değiştiğini göstermiştir. En yüksek TPC (84.07 ± 0.13 mg GAE/g) ve TFC (25.83 ± 0.16 mg QE/g) değerleri MAC yöntemiyle elde edilirken, en yüksek ekstraksiyon verimi

*Corresponding author: deryaaltay@aybu.edu.tr

Derya Altay orcid.org/0009-0003-1630-7162
Murat Koç orcid.org/0000-0002-0829-4571

This work is licensed by "Creative Commons Attribution-NonCommercial-4.0 International (CC)".

(%14.19) SE yöntemiyle sağlanmıştır. Antioksidan analizler, MAC ekstrelerinin serbest radikal süpürücü aktivite ve indirgeme gücü bakımından en yüksek etkiyi sergilediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, J. cherlerioides ekstrelerinin fenolik bileşik profili LC–MS/MS (Liquid Chromatography–Tandem Mass Spectrometry) analizi kullanılarak ilk kez raporlanmış, tüm ekstraktlarda baskın bileşiğin rutin olduğu; rosmarinik asit, apigenin ve protokatekuik asidin ise ekstraksiyon yöntemine bağlı olarak değişen düzeylerde bulunduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Antioksidan aktivite, ekstraksiyon teknikleri, fenolik bileşikler, *Jordania cherlerioides*, LC-MS/MS analizi

1. Introduction

Phenolic compounds are a diverse group of secondary metabolites widely distributed in plants, characterized by one or more hydroxyl groups attached to aromatic rings. These compounds play an essential role in plant defense mechanisms against environmental stress, pathogens, and ultraviolet radiation. In addition to their physiological roles in plants, phenolic compounds have attracted considerable attention due to their strong antioxidant, anti-inflammatory, and therapeutic properties (Xu & Wang, 2025).

Phenolic compounds are known to act as free radical scavengers, metal chelators, and reducing agents, thereby preventing oxidative stress-induced cellular damage. Their biological activities have been associated with the prevention of various chronic diseases, including cardiovascular disorders, cancer, and diabetes (Bas, 2026). Moreover, recent studies have highlighted their potential applications in food, pharmaceutical, and cosmetic industries due to their safety and bioactive properties (Demir et al., 2026). The biological activity of phenolic compounds is closely related to their chemical structure, particularly the number and position of hydroxyl groups. Therefore, total phenolic content is widely used as an indicator of antioxidant capacity and overall bioactivity in plant extracts (Xu & Wang, 2025).

A potential source for the development of new pharmaceuticals is flora rich in various bioactive compounds (Shakya, 2016). The Caryophyllaceae Juss. family encompasses roughly 100 genera and 3,000 species (Hernandez-Ledesma et al., 2015; Altay & Koç, 2025), predominantly consisting of annual and perennial herbs and subshrubs. The Caryophyllaceae family predominantly has a Holarctic distribution, however it is also extensively found in the temperate zones of the northern hemisphere, particularly centered in the Mediterranean and Irano-Turanian regions (Bittrich, 1993; Heywood, 1998). Plants of the Caryophyllaceae family are commonly employed in traditional medicine to address numerous ailments due to their diverse array of bioactive metabolites, such as saponins, flavonoids, phytoecdysteroids, phenolic acids and oligosaccharides (Özdaş et al., 2025; Chandra & Rawat 2015).

The genus *Jordania*, which occurs in the flora of Türkiye and has recently undergone taxonomic reorganization, represents a noteworthy yet largely unexplored group from a phytochemical perspective. *Jordania* is an earlier name used for the Turkish representatives of the genus *Bolanthus*, and its generic status has been re-evaluated following a comprehensive taxonomic revision by Madhani et al. (2024). According to this revision, the genus comprises 14 taxa, the majority of which are endemic to Türkiye, including *Jordania cherlerioides*. The current nomenclatural status of this species is also confirmed by International Plant Names Index (IPNI, 2026) and Plants of the World Online (POWO, 2026).

According to a comprehensive analysis of the literature, no prior research has shown antioxidant activity, total phenolic or flavonoid content, individual phenolic component profiling, or a comparison of extraction techniques for *J. cherlerioides*. This lack of information renders the species a largely unexplored natural resource with considerable phytochemical and biotechnological potential. The yield, structural integrity, and subsequent biological activity of the extracted constituents are known to be significantly influenced by the extraction method used to recover plant-derived bioactive chemicals. Therefore, the comparative assessment of different extraction techniques is essential for the efficient and selective recovery of high-quality bioactive compounds from plant matrices.

In the present study, five different extraction techniques—maceration, soxhlet extraction, microwave-assisted extraction, ultrasound bath-assisted extraction, and ultrasound probe-assisted extraction—were applied for the first time in a systematic and comparative manner to recover bioactive compounds from *J. cherlerioides* using methanol as the extraction solvent. The main objective of this study was to elucidate the effect of extraction method on total phenolic content (TPC), total flavonoid content (TFC), antioxidant capacity (DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl), ABTS (2,2′-azinobis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)), and FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power) assays), and individual phenolic compound profiles determined by LC–MS/MS (Liquid Chromatography–Tandem Mass Spectrometry) analysis (Figure 1). The findings of this study are expected to provide the first scientific evidence of the phytochemical potential of *J. cherlerioides* and to contribute valuable baseline data for future studies focus-

ing on the functional utilization of endemic species within the Caryophyllaceae family.

2. Material and Methods

2.1. Plant Materials

J. cherlerioides was collected during the flowering period in 2024 from Mount Davraz (2010 m altitude), Isparta, Türkiye. The species was identified by Prof. Dr. Murat Koç. A voucher specimen (Koç 3625) has been deposited in the Herbarium of Ankara Yıldırım Beyazıt University (AYBU), Ankara, Türkiye. The plant material was identified based on the *Flora of Turkey* reference, which provides comprehensive descriptions and keys for vascular plants of Türkiye.

2.2. Extraction

Only the aerial parts of the collected plant material were used for extraction. Methanol was used as the solvent in all extraction procedures. The extraction yield was calculated based on the ratio of the dry extract weight to the initial powdered plant weight, using the following equation: Extraction yield (%) = [Dry extract weight/Powdered plant weight] x 100.

2.2.1. Microwave-Assisted Extraction (MAE)

To do microwave-assisted extraction, 100 mL of methanol and 10 g of powdered plant material were mixed, and the mixture was extracted for five minutes at 50% power (350 W) in a microwave oven. The mixture was filtered using coarse filter paper to get rid of the plant material. The extracts were kept at +4 °C until further examination after the solvent was totally eliminated using a rotary evaporator.

2.2.2. Ultrasound Probe–Assisted Extraction (UPAE)

Using an ultrasonic probe running at 24 kHz with 50% power for five minutes, 10 g of powdered plant material was combined with 100 mL of methanol in the ultrasonic probe-assisted extraction method. To get rid of the residue, the mixture was filtered through coarse filter paper after extraction. A rotary evaporator was used to evaporate the solvent under low pressure, and the extracts were kept at +4°C until analysis.

2.2.3. Ultrasonic Bath–Assisted Extraction (UBAE)

For ultrasonic bath-assisted extraction, 10 g of powdered plant material and 100 mL of methanol were mixed, and

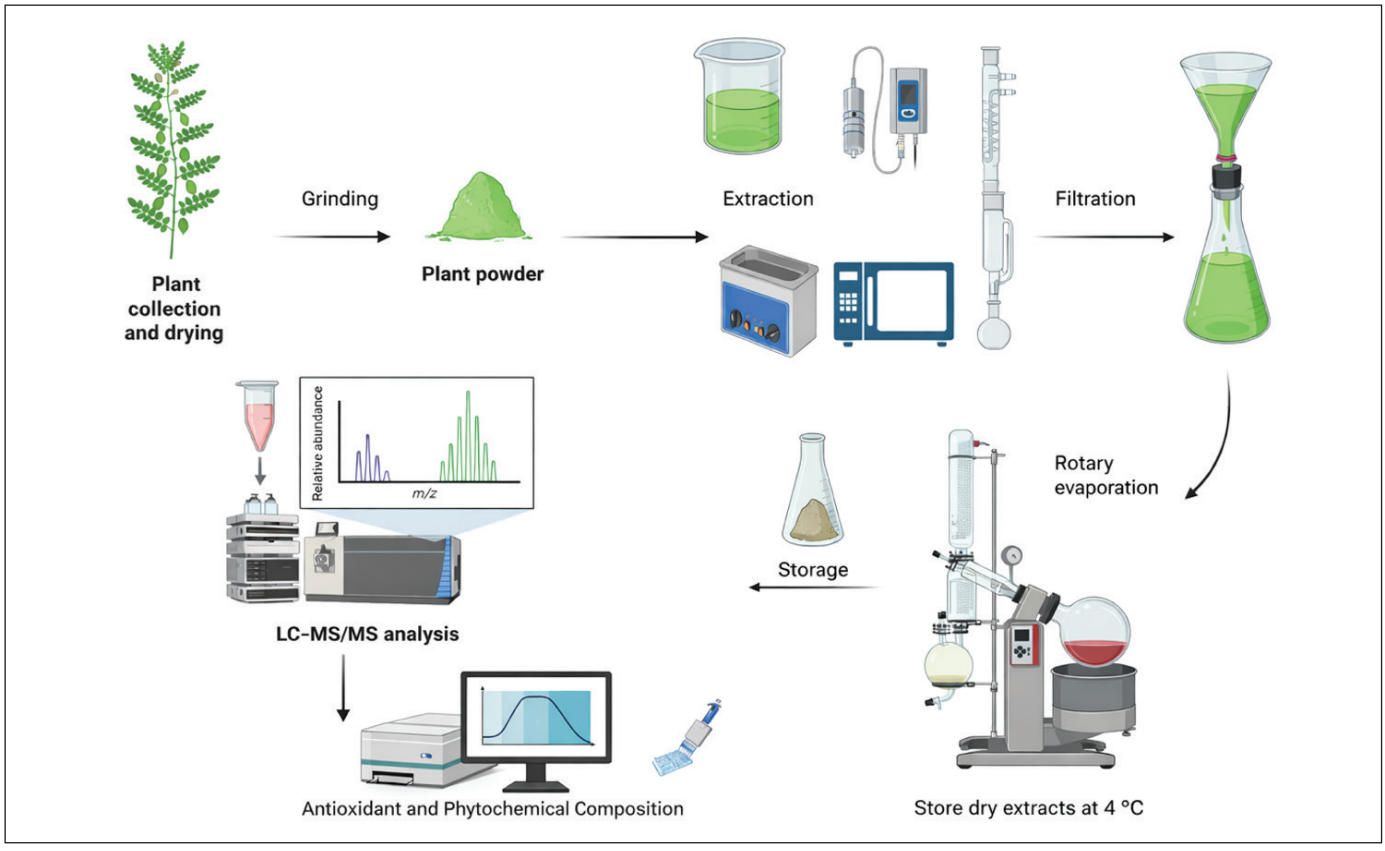


Figure 1. Experimental workflow for extraction, chemical profiling, and antioxidant analysis of plant extracts.

the combination was placed in an ultrasonic bath operating at 60 kHz (Elma D-78224 Singen/Htw.) for 60 minutes. Following the extraction process, the mixture was filtered through pleated filter paper, and a rotary evaporator (Büchi R-200) was used to extract the solvent at 42 ˚C under low pressure. After the extraction yield was determined, the extracts were kept in dark glass vials at +4 ˚C for further examination.

2.2.4. Soxhlet Extraction (SE)

In the Soxhlet extraction procedure, 10 g of powdered plant material was extracted using a Soxhlet equipment and 100 mL of methanol under reflux conditions for four hours. After extraction, all of the solvent was removed using a rotary evaporator, and the resultant extracts were stored at +4 ˚C until analysis.

2.2.5. Maceration (MAC)

The maceration technique involved combining 100 mL of methanol and 10 g of powdered plant material, which was then left at room temperature in a dark environment for five days. The mixture was filtered, and the solvent was extracted with a rotary evaporator at the end of the operation. The final extracts were stored at +4 ˚C until they could be investigated further.

2.2.6. Determination of total phenolic content

The TPC of the extracts was calculated using the Folin-Ciocalteu reagent according to Singleton and Rossi's (1965) method and represented as gallic acid equivalents (mg GAE/g). The extract solution was mixed with distilled water and Folin-Ciocalteu reagent for 3 minutes before adding a 5% (w/v) sodium carbonate (Na_2CO_3) solution. Calibration curves were constructed using gallic acid standards prepared at concentrations of 20, 40, 60, 80, 100, 120, and 140 µg/mL. The mixture was agitated and incubated at room temperature for 30 minutes. After incubation, absorbance was measured at 750 nm.

2.2.7. Determination of total flavonoids contents

The aluminum chloride ($AlCl_3$) colorimetric method (Zhishen et al., 1999) was used to estimate the TFC, which was expressed as milligrams of quercetin equivalents per gram of dry extract. Extracts were combined with sodium acetate, distilled water, and 10% Aluminum chloride hexahydrate ($AlCl_3 \cdot 6H_2O$) solution. Calibration curves were constructed using quercetin standards prepared at concentrations of 20, 40, 60, 80, 100, 120, and 140 µg/mL. Color development was detected at 415 nm after 30 minutes of incubation at room temperature.

2.2.8. Determination of antioxidant activity

2.2.8.1. Scavenging activity against the ABTS radical.

ABTS radical scavenging activity was evaluated using a modified method of Re et al. (1999). The $ABTS^{\bullet+}$ radical was generated by reacting ABTS with potassium persulfate and subsequently allowed to react with plant extracts at concentrations ranging from 0.001 to 0.5 mg/mL. Absorbance was recorded at 734 nm after 6 min. All assays were conducted in triplicate, and Trolox was used as the reference standard. The percentage of inhibition was calculated using the equation [(A control- A sample) / A control] x 100. Calibration curves were constructed using percentage inhibition values at different extract concentrations, and IC_{50} values were determined accordingly.

2.2.8.2. Scavenging activity against the DPPH radical.

The DPPH radical scavenging activity was determined using the method described by Blois (1958). The working solution consisted of 100 µM DPPH prepared in methanol, and plant extracts were tested at concentrations ranging from 0.001 to 0.5 mg/mL. The reaction mixtures were incubated at room temperature for 30 min, and the absorbance was measured spectrophotometrically at 517 nm. The percentage of inhibition was determined by the following equation: [(Control Absorbance- Standard/Sample Absorbance) / Control Absorbance] × 100. All experiments were performed in triplicate, and IC_{50} values were derived from plots of scavenging percentage and extract concentration.

2.2.8.3. Scavenging activity against the FRAP radical.

FRAP was determined according to Youn et al. (2019). The extract dilutions were mixed with FRAP reagent, incubated at 37 ˚C for 30 min, and the absorbance was measured at 595 nm. Calibration curves were constructed using Trolox standards prepared at concentrations ranging from 7.8125 to 250 µg/mL. Antioxidant activity was expressed as mg Trolox equivalents per g of dry extract (mg Trolox/g).

2.2.9. LC-MS/MS analysis

LC-MS/MS analyses were performed using a Dionex Ultimate 3000 UHPLC system coupled with a TSQ Quantum Access Max. Chromatographic separation was carried out on an ODS Hypersil column (4.6 × 250 mm, 5 µm) at a flow rate of 0.7 mL/min, with an injection volume of 20 µL and a column temperature of 30 ˚C. The mobile phase consisted of 0.1% formic acid in water (A) and methanol (B) with the following gradient program: 0–1 min, 100% A; 1–22 min, linear gradient to 95% B; 22–25 min, 95% B; and 25–30 min, 100% B. MS conditions were as fol-

lows: capillary temperature 300 °C, vaporizer temperature 350 °C, sheath gas 30 (arb), auxiliary gas 13 (arb), spray voltage 4000 V (positive) and 2500 V (negative), and discharge current 4.0 µA. Quantification was performed using the external standard method based on calibration curves of reference compounds.

3. Statistical Analyses

The analyses were performed in triplicate (n = 3), and the findings were expressed as mean ± SD. One-way analysis of variance (ANOVA) was used to examine group differences, with p <0.05 indicating statistical significance. In addition, hierarchical clustering analysis (HCA) was conducted to visually assess the similarities and differences among the samples. These multivariate statistical analyses enabled a comprehensive evaluation of the relationships within the dataset.

4. Results and Discussion

To extract bioactive compounds from *J. cherlerioides*, five different extraction techniques were used in this study, all of which used methanol as a solvent: MAC, SE, MAE, UBAE, and UPAE. The primary goal was to assess the impact of extraction procedure on TPC, TFC, antioxidant capacity, and individual phenolic compound profiles as determined by LC-MS/MS analysis.

TPC, TFC and extract yields of *J. cherlerioides* obtained using different extraction techniques are presented in Table 1. Among the tested methods, MAC resulted in the highest TPC (84.07 ± 0.13 mg GAE/g) and TFC (25.83 ± 0.16 mg QE/g), whereas SE provided the highest extract yield (14.19%). MAE, UBAE, and UPAE exhibited comparatively lower TPC and TFC values.

The antioxidant activities of the extracts, determined by DPPH, ABTS, and FRAP assays, are summarized in Table 2. The MAC extract showed the strongest antioxidant activity, with the lowest DPPH IC_{50} value (114.32 ± 0.09 µg/mL) and ABTS IC_{50} value (62.39 ± 0.05 µg/mL), as well as the highest FRAP value (123.95 ± 0.29 mg TE/g). In contrast, UPAE exhibited the weakest antioxidant performance, with the highest IC_{50} values and lowest FRAP value.

Table 1. TPC, TFC and extract yields of *J. cherlerioides* obtained using MeOH **.**

Extraction Technique	Recovery of TPC (mg GAE/g)	R^2 (TPC)	Recovery of TFC (mg QE/g)	R^2 (TFC)	Extract Yield (%)
MAC	84.07 ± 0.13^{a}	0.999	25.83 ± 0.16^{a}	0.995	4.96
SE	77.92 ± 0.03^{b}		18.34 ± 0.45^{b}		14.19
MAE	74.63 ± 0.24^{c}		16.87 ± 0.06^{c}		7.62
UBAE	71.58 ± 0.52^{d}		11.61 ± 0.56^{d}		8.26
UPAE	70.98 ± 0.08^{d}		6.85 ± 0.17^{e}		3.72

Data are expressed as mean ± standard deviation (SD). Values within the same column followed by different superscript letters are significantly different (p <0.05), according to one-way ANOVA followed by Tukey's post hoc test. Values sharing the same letter are not significantly different. R^2: coefficient of determination of the calibration curve.

Table 2. Antioxidant properties of *J. cherlerioides* extracts obtained using different extraction methods (mean ± SD).

Extraction Technique	IC_{50} (µg/mL)		FRAP value (mgTE/g)
	DPPH scavenging	ABTS scavenging	
MAC	114.32 ± 0,09^{e}	62.39 ± 0.05^{d}	123.95 ± 0.29^{a}
SE	153.14 ± 0.13^{d}	67.31 ± 0.32^{c}	115.62 ± 0.02^{b}
MAE	174.13 ± 0.01^{c}	70.29 ± 0.43^{c}	106.65 ± 0.04^{c}
UBAE	252.22 ± 0.01^{a}	79.27 ± 0.14^{ab}	103.34 ± 0.05^{cd}
UPAE	266.61 ± 0.26^{a}	82.89 ± 0.08^{a}	80.88 ± 0.16^{e}
TROLOKS	11.52 ± 0.47	19.17 ± 0.23	-

Data are expressed as mean ± standard deviation (SD). Values within the same column followed by different superscript letters are significantly different (p <0.05), according to one-way ANOVA followed by Tukey's post hoc test. Values sharing the same letter are not significantly different.

Table 3. The parameters of LC-MS/MS.

Compounds	Rt	Parent ion (m/z)	Ion. Mode	MS/MS (CE)	%RSD	Linearity Range (ppm)	Linear Regression Equation	R^2	LOD/LOQ (ppm)
Pyrogallol	8.35	124.86	Neg	69.31 (20)-79.27 (23)	2.9	0.25-8	y=502505X	0.9967	0.074/0.247
Gallic acid	10.03	169.7	Neg	80.50(25)-126.20(16)	4.5	0.25-8	y=76731.8+275733X	0.9997	0.061/0.203
Protocatechuic acid	12.04	155.01	Pos	65.40 (22)-93.20 (13)	4.9	0.25-8	y = 114961+181757X	0.9973	0.049/0.162
Protocatechuic aldehyde	12.91	136.9	Neg	92.25 (25)-108.20 (25)	2.2	0.25-8	y= 1.08195e+006+2.23625e+006X	0.9974	0.026/0.087
Sesamol	12.91	137.18	Neg	108.17 (15)-109.29 (14)	2.1	0.25-8	y= 447315+759069X	0.9955	0.031/0.103
Gentisic acid	13.27	153.7	Neg	109.50 (21)	2.3	0.25-8	y= 402881X	0.9914	0.013/0.043
Catechin	13.34	289.2	Neg	203.90 (22)-245.70 (17)	2.5	0.25-8	y= 1.40573e+006+6.6714e+006X	0.9983	0.010/0.032
Chlorogenic acid	14.56	353.4	Neg	86.50 (43)-192.10 (21)	3.5	0.25-8	y= 593138X	0.9938	0.151/0.503
Epicatechin	14.91	291.5	Poz	123.30 (15)-139.30 (16)	2.5	0.25-8	y = 133662+1.33827e+007X	0.9992	0.003/0.006
Caffeic acid	15.29	179.7	Neg	135.20 (27)-136.20 (18)	2.5	0.25-8	y = 337511+1.82747e+006X	0.9987	0.042/0.058
Syringic acid	15.47	183.07	Neg	77.30 (23)-123.20 (13)	4.6	0.25-8	y= 7432.61+32350.2X	0.9976	0.194/0.647
Vanilin	15.81	150.91	Neg	92.30(23)-136.10 (16)	3.7	0.25-8	y= 390296+1.2352e+006X	0.9993	0.023/0.076
Syringic aldehyde	16.25	180.88	Neg	151.09 (22)-166.09 (16)	3.8	0.25-8	y= 1.13105e+006X	0.9990	0.127/0.423
Taxifolin	16.80	303	Neg	126.20 (23)-285.50 (15)	3.8	0.25-8	y= 89920.6+710372X	0.9979	0.001/0.005
p-Coumaric acid	16.86	163.9	Neg	94.30 (33)-120.20 (17)	3.5	0.25-8	y= 435063+272197X	0.9978	0.069/0.109
Vitexin	17.25	430.9	Neg	283.03(37)-311.10 (24)	3.4	0.25-8	y= 2.30407e+007X	0.9979	0.077/0.256
Ferulic acid	17.30	195.022	Poz	89.40 (30)-177.40 (7)	4.5	0.25-8	y= 96221.3+135243X	0.9991	0.063/0.118

Table 3 continued

Compounds	Rt	Parent ion (m/z)	Ion. Mode	MS/MS (CE)	%RSD	Linearity Range (ppm)	Linear Regression Equation	R^2	LOD/LOQ (ppm)
4-hydroxybenzoic acid	17.64	137.9	Neg	66.60 (38)-94.60 (17)	4.7	0.25-8	y= 538952+1.00663e+007X	0.9986	0.243/0.809
Salicylic acid	17.64	137.136	Neg	65.50 (35)-93.26 (18)	4.8	0.25-8	y= 581004+6.58544e+006X	0.9973	0.030/0.099
Hesperidin	17.86	608.78	Neg	301.34 (32)-164.01 (60)	4.3	0.25-8	y= 3.15349e+006X	0.9969	0.214/0.701
Rosmarinic acid	17.94	359.18	Neg	134.30(44)-162.20(20)	2.6	0.25-8	y= -87786.1+818602X	0.9990	0.011/0.036
Oleuropein	18.04	539.1	Neg	275.80 (22)-377.50 (16)	2.0	0.25-8	y= 322137+1.4702e+006X	0.9979	0.003/0.010
Luteolin-7-glucoside	18.39	446.89	Neg	284.00 (45)-285.00 (40)	4.1	0.25-8	y= 6.58599e+006X	0.9914	0.021/0.233
Rutin	18.66	609.37	Neg	300.60 (38)-301.70 (34)	1.6	0.25-8	y=559901+6.95736e+006X	0.9983	0.022/0.073
Resveratrol	18.67	228.98	Pos	107.20 (22)-135.10 (14)	4.8	0.25-8	y= 730418+2.97207e+006X	0.9996	0.019/0.062
Ellagic acid	19.95	301.669	Neg	284.80 (30)-174.15 (34)	5.0	0.25-8	y= 846211+1.15468e+006X	0.9992	0.087/0.289
Naringenin	20.34	273	Pos	147.10 (20)-153.00 (24)	4.8	0.25-8	y= 6.36146e+007X	0.9916	0.005/0.017
Quercetin	21.00	301	Neg	152.10 (23)-179.90 (20)	2.9	0.25-8	y= 2.63374e+006+4.35721e+006X	0.9939	0.001/0.005
Apigenin	22.57	268.86	Neg	117.19 (40)-149.11 (27)	3.9	0.25-8	y= 5.75178e+006X	0.9927	0.114/0.380
Chrysin	24.10	254.97	Pos	153.10 (30)-103.28 (33)	1.5	0.25-8	y= 6.31108e+007X	0.9983	0.049/0.163
Galangin	24.15	268.85	Neg	169.15 (29)-171.08 (31)	5.0	0.25-8	y= 3.10822e+006X	0.9972	0.034/0.113
Flavone	24.45	222.9	Pos	77.28 (35)-121.15 (26)	1.7	0.25-8	y= 3.42001e+007+2.13397e+008X	0.9965	0.037/0.124
Cinnamic acid	26.63	131.1	Pos	77.30(25)-103.21(14)	4.1	0.25-8	y=2.62139e+006X	0.9968	0.047/0.156

Parent ion (m/z): The standard chemicals' molecular ions; MS/MS(CE): collision energy; R2: coefficient of determination; Rt: retention time; LOD: detection limit; LOQ: quantification limit; RSD: relative standard deviation; Neg: negative ionization mode; Pos: positive ionization mode.

LC–MS/MS analysis revealed significant differences in the qualitative and quantitative phenolic composition depending on the extraction method (Tables 3 and 4). Rutin was identified as the dominant phenolic compound in all extracts, with the highest concentration observed in MAC (13.374.14 µg/g). Rosmarinic acid was the second most abundant compound, with the highest level detected in UPAE (126.37 µg/g). Protocatechuic acid was most abundant in MAC, whereas chlorogenic acid was detected only in UPAE and MAE extracts. Among flavonoids, apigenin was present in all extracts, with the highest concentration observed in UPAE.

Hierarchical cluster analysis (HCA) performed using the average linkage (between-groups) method revealed that the extraction techniques were clearly grouped into three main clusters based on their phytochemical composition and an-

Table 4. Phenolic compounds identified in *J.cherlerioides* samples (µg/g).

	UPAE	SE	MAC	MAE	UBAE
Pyrogallol	-	-	-	-	-
Gallic acid	-	-	-	-	-
Protocatechuic acid	35.35	20.14	45.28	27.05	38.57
Protocatechuic aldehyde	-	-	-	-	-
Sesamol	-	-	-	-	-
Gentisic acid	-	-	-	-	-
Catechin	-	-	-	-	-
Chlorogenic acid	64.34	-	-	76.81	-
Epicatechin	-	-	-	-	-
Caffeic acid	0.35	2.09	-	2.61	-
Vanillin	18.76	16.30	6.96	16.08	7.63
Syringic acid	-	-	28.35	-	-
Syringaldehyde	-	-	-	-	-
Taxifolin	-	-	-	-	-
p-Coumaric acid	-	-	-	-	-
Vitexin	-	-	-	-	-
Ferulic acid	-	-	-	-	-
4-Hydroxybenzoic acid	6.82	7.79	3.29	6.40	7.51
Salicylic acid	-	-	-	-	-
Hesperidin	-	-	-	-	2465.33
Rosmarinic acid	126.37	77.86	37.50	42.81	23.12
Oleuropein	-	-	-	-	-
Luteolin-7-O-glucoside	-	-	-	-	-
Rutin	9913.20	10189.39	13374.14	9994.56	8817.35
Resveratrol	-	-	-	-	-
Ellagic acid	-	-	-	-	-
Naringenin	2.02	1.66	-	1.94	1.69
Quercetin	-	-	-	-	-
Apigenin	139.43	68.01	85.65	84.16	99.35
Chrysin	-	-	-	-	-
Galangin	-	-	-	-	-
Flavone	-	-	-	-	-
Cinnamic acid	-	-	-	-	-

tioxidant parameters. MAC, SE, and MAE were grouped within the first cluster, indicating that these methods exhibited comparable phenolic contents and antioxidant capacities. UBAE formed a separate cluster, reflecting its moderate antioxidant activity. In contrast, UPAE was distinctly separated into a third cluster, which can be attributed to its lower flavonoid content and higher DPPH IC_{50} value, indicating a relatively weaker antioxidant performance compared to the other extraction techniques **(**Figure 2).

The results clearly demonstrate that the extraction efficiency of bioactive compounds from *J. cherlerioides* is strongly dependent on the applied extraction technique. MAC, a conventional extraction method, yielded the highest TPC and TFC values, likely due to prolonged solvent–matrix interaction under mild temperature conditions, which favors the diffusion of polar phenolic and flavonoid compounds. However, its relatively low extract yield and long extraction time limit its practical applicability (More et al., 2022).

In contrast, SE provided the highest extract yield, which can be attributed to continuous solvent recycling and enhanced mass transfer (More et al., 2022; Zygler et al., 2012; Pawliszyn, 2012). Nevertheless, the lower TPC and TFC values compared to maceration suggest that prolonged exposure to elevated temperatures may lead to partial degradation of thermolabile phenolic compounds (Bitwell et al., 2023; Zygler et al., 2012; Pawliszyn, 2012).

MAE significantly reduced extraction time while providing moderate phenolic recovery. The rapid heating and pressure buildup within plant cells enhance solvent penetration and mass transfer (Veggi et al., 2012). However, localized overheating may negatively affect the stability of certain phenolic compounds, explaining the lower TPC and TFC values compared to maceration (Picot-Allain et al., 2021; Zhi et al., 2017).

Ultrasound-assisted extraction techniques exhibited distinct performance differences depending on the mode of energy application. UBAE provided higher phenolic recovery than UPAE, likely due to more uniform cavitation and controlled cell disruption (Kumar et al., 2021). In contrast, the intense and localized cavitation generated by UPAE may have caused partial degradation of flavonoids, resulting in lower TFC values (Chémat et al., 2017; Wen et al., 2018).

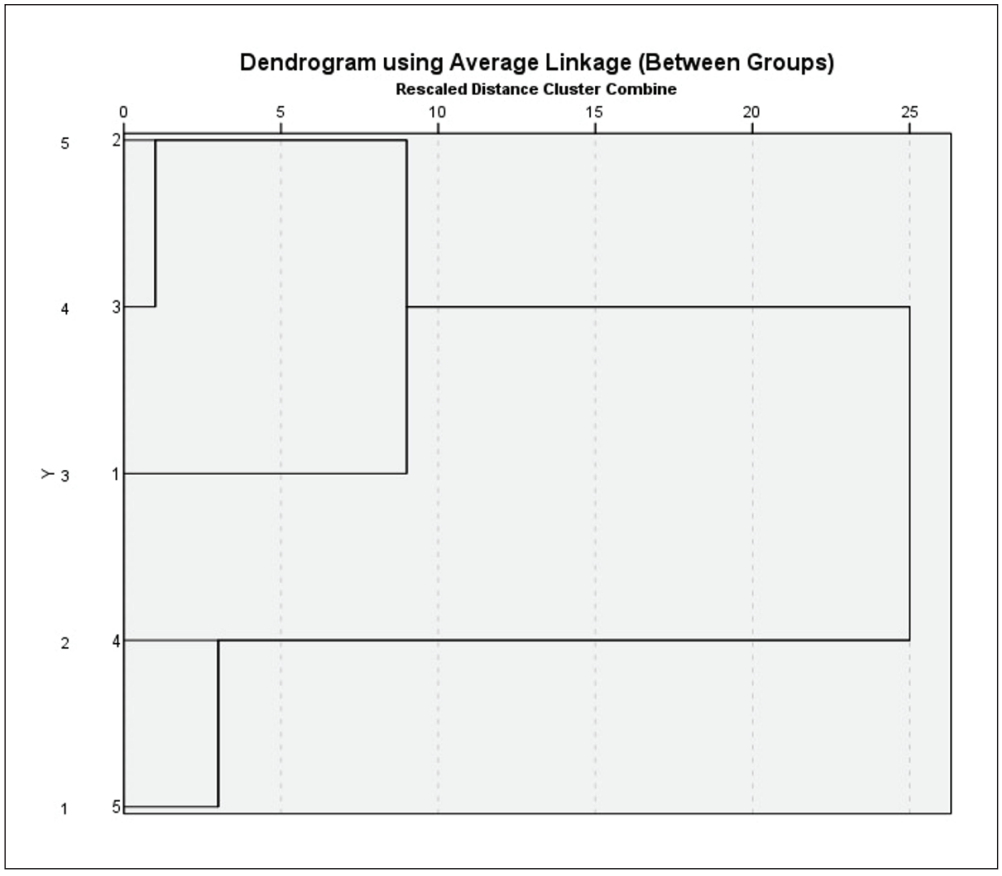


Figure 2. HCA dendrogram of extraction techniques based on phytochemical composition and antioxidant parameters (TPC, TFC, DPPH, ABTS, and FRAP) using the average linkage method. (1 → MAC, 2 → SE, 3 → MAE, 4 → UBAE, 5 → UPAE)

Overall, the observed differences among extraction methods clearly demonstrate that extraction efficiency in *J. cherlerioides* is strongly dependent on the applied technique. While SE maximized extract yield, maceration emerged as the most effective method for preserving and recovering phenolic and flavonoid compounds. These findings are supported by antioxidant activity assays and LC–MS/MS phenolic profile analyses, confirming that extraction technique plays a decisive role in determining both the quantitative and qualitative phytochemical outcomes.

Bolanthus turcicus extracts contain a high total phenolic content, according to earlier research. Using the Folin-Ciocalteu technique, Özdaş et al. (2025) reported total phenolic contents in the following order: MeOH (81.14 mg GAE/g)> EA (74.93 mg GAE/g)> Aq (51.09 mg GAE/g). They attributed these variations to solvent polarity. Similarly, Sulaiman et al. (2011) stressed the importance of solvent polarity in the extraction efficiency of phenolic chemicals. Ercan et al. (2020) used GC-MS to identify bioactive compounds in *B. turcicus* Soxhlet extract, including oleic acid (36.88%), palmitic acid (20.12%), nonadecane (14.72%), stearic acid (11.56%), hexacosane (6.78%), eicosane (2.36%), docosane (1.34%), and minor constituents like α-citronellol, geraniol, and stearyl alcohol. These findings lend evidence to the species' broad phytochemical profile. Other species in the *Bolanthus* genus have yielded comparable results. Derici et al. (2021) found that *B. spergulifolius* had a high total phenolic content in the following order: EA (52.81 mg GAE/g), MeOH (48.22 mg GAE/g), and Aq (30.34 mg GAE/g). Sönmez (2023) found vanillic acid, epicatechin, and rutin as the main phenolic constituents in the MeOH extract of *B. ortegioides*. The total phenolic content was 5.6 µg GAE/mg. Can Ağca et al. (2023) isolated and characterized flavonoids such as apigenin, kaempferol, and quercetin derivatives from *B. aziz-sancarii*. The most abundant compound (6.93%) identified by HPLC analysis was quercetin-3-O-α-rhamnopyranosyl-(1″→6″)-glucopyranoside. According to Özdaş et al. (2024), the MeOH extract had the highest TPC and TFC content in *B. turcicus* extracts (96.02 mg GAE/g and 71.12 mg QE/g, respectively), followed by the Aq and EA extracts. The MeOH extract demonstrated the highest antioxidant activity in the research, as measured by phosphomolybdenum and FRAP assays (51.74 mg AAE/g and 137.91 µg Trolox/mg, respectively). Taken together, these literature findings clearly show that phenolic compound profiles in *Bolanthus* species vary depending on the extraction solvent, with methanol being particularly effective in terms of both phenolic content and antioxidant activity, highlighting the genus' high biological potential. Furthermore, considering recent taxonomic revisions in which some *Bolanthus* species have been reclassified under the genus *Jordania*, these findings may also be relevant to *Jordania* species and suggest a potentially high biological value for this genus.

Overall, these findings demonstrate that extraction methods can be effectively classified according to their phytochemical profiles and antioxidant properties and highlight the superior antioxidant performance of conventional extraction techniques under the conditions applied in this study.

5. Conclusion and Suggestions

This study clearly demonstrates that the chemical composition and antioxidant capacity of methanolic extracts obtained from *J. cherlerioides* are strongly dependent on the extraction technique employed. Among the five extraction methods evaluated, maceration emerged as the most effective approach, yielding the highest total phenolic and flavonoid contents, as well as the strongest DPPH and ABTS radical scavenging activities and FRAP reducing power, thereby maximizing the antioxidant potential of the plant.

LC–MS/MS analyses revealed that extraction methods significantly influenced the individual phenolic profiles of the extracts, and that the antioxidant activity of *J. cherlerioides* was closely associated with the presence and preservation of dominant phenolic compounds, particularly rutin and protocatechuic acid. Although ultrasound- and microwave-assisted techniques enhanced the extraction of certain compounds, excessive energy input may adversely affect the structural stability of some phenolics, leading to reduced functional antioxidant performance.

Overall, these findings highlight that the choice of extraction method is a critical determinant not only of extraction yield but also of the functional quality of bioactivity. The results provide a valuable foundation for the valorization of *J. cherlerioides* as a natural antioxidant source and for the development of standardized extraction strategies applicable to food, pharmaceutical, and cosmetic industries.

Acknowledgment: Authors have declared no conflict of interest.

Author contribution: Derya ALTAY: Conducted the literature review and data analysis; designed and implemented the study; carried out experimental procedures; performed data recording and measurements; and wrote and edited the manuscript.

Murat KOÇ: Provided plant material; established the necessary physical and technical infrastructure for the research; and contributed to the development and supervision of the research concept.

Ethics committee approval: Ethics committee approval was not required for this study**,** as it did not involve human participants or animal subjects.

References

Altay, D., & Koç, M. (2025). Anatomical features of some *Jordania* Boiss. taxa in the Caryophylleae (Caryophyllaceae) family. *Anatolian Journal of Botany, 9*(2), 95–100. https://doi.org/10.30616/ajb.1655557

Bas, T. G. (2026). Dietary Polyphenols (Flavonoids) Derived from Plants for Use in Therapeutic Health: Antioxidant Performance, ROS, Molecular Mechanisms, and Bioavailability Limitations. International Journal of Molecular Sciences, 27(3), 1404.

Bittrich, V. (1993). Caryophyllaceae. In K. Kubitzki (Ed.), *The families and genera of vascular plants: Vol. 2. Flowering plants: Dicotyledons* (pp. 206–236). Springer.

Bitwell, C., Indra, S. S., Luke, C., & Kakoma, M. K. (2023). A review of modern and conventional extraction techniques and their applications for extracting phytochemicals from plants. *Scientific African, 19*, e01585. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01585

Blois, M. S. (1958). Antioxidant determinations by the use of a stable free radical. *Nature, 181*(4617), 1199–1200. https://doi.org/10.1038/1811199a0

Can Ağca, A., Altay, D., Yılmaz Sarıaltın, S., Acikara, Ö. B., Sever Yılmaz, B., & Koç, M. (2023). Chemical compounds isolated from aerial parts of *Bolanthus aziz-sancarii*, a new species from Türkiye. *Natural Product Research*, 1–7. https://doi.org/10.1080/14786419.2023.2191586

Chandra, S., & Rawat, D. S. (2015). Medicinal plants of the family Caryophyllaceae: A review of ethnomedicinal uses and pharmacological properties. *Integrative Medicine Research, 4*(3), 123–131. https://doi.org/10.1016/j.imr.2015.06.005

Chémat, F., Rombaut, N., Meullemiestre, A., Türk, M., Périno, S., Fabiano-Tixier, A. S., & Vian, M. A. (2017). Review of green food processing techniques: Preservation, transformation, and extraction. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 41*, 357–377. http://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.04.016

Demir, R., Sarıtaş, S., Bechelany, M., & Karav, S. (2026). Polyphenols from Byproducts: Their Applications and Health Effects. Antioxidants, 15(1), 87.

Derici, G. E., Özdaş, S., Canatar, İ., & Koç, M. (2021). Antidiabetic activities of *Bolanthus spergulifolius* extracts on insulin-resistant 3T3-L1 adipocytes. *PLOS ONE, 16*(6), e0252707. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252707

Ercan, F. S., Azarkan, S. Y., Ercan, N., & Koç, M. (2020). Sequence variants of CYP345a1 and CYP6a14 gene regions in *Tribolium castaneum* adults treated with *Bolanthus turcicus* extract. *Molecular Biology Research Communications, 9*(3), 105–110. https://doi.org/10.22099/mbrc.2020.35861.1472

Hernandez-Ledesma, P., Berendsohn, W. G., Borsch, T., von Mering, S., Akhani, H., Arias, S., … Uotila, P. (2015). A taxonomic backbone for the global synthesis of species diversity in Caryophyllales. *Willdenowia, 45*(3), 281–383. https://doi.org/10.3372/wi.45.45302

Heywood, L. (1998). Bodymakers: A cultural anatomy of women's body building. Rutgers University Press.

International Plant Names Index (IPNI). (2026). *International Plant Names Index*. Retrieved Month Day, Year, from https://www.ipni.org

Kumar, K., Srivastav, S., & Sharanagat, V. S. (2021). Ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds from plant by-products: A review. *Ultrasonics Sonochemistry, 70*, 105325. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105325

Madhani, H., Rabeler, R. K., & Zarre, S. (2024). Generic delimitation of *Bolanthus* and resurrection of *Jordania* within Caryophylleae. *Taxon, 73*(5), 1239–1250. https://doi.org/10.1002/tax.13234

More, P. R., Jambrak, A. R., & Arya, S. S. (2022). Green, environment-friendly and sustainable techniques for extraction of food bioactive compounds and waste valorization. *Trends in Food Science & Technology,* 128, 296–315. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.03.013

Özdaş, S., Canatar, İ., Derici, G. E., & Koç, M. (2025). Bolanthus turcicus: A promising antidiabetic with in-vitro antioxidant, enzyme inhibitory and antiadipogenic activities. *Journal of Molecular Histology*, 56(1), 59. https://doi.org/10.1007/s10735-024-10123-4

Özdaş, S., Canatar, İ., Özdaş, T., Sarialtin, S. Y., Ağca, A. C., & Koç, M. (2024). Antioxidant, cytotoxic, anti-migratory, and pro-apoptotic effects of Bolanthus turcicus extracts on head and neck cancer cells. *Molecular Biology Reports*, 51(1), 1104. https://doi.org/10.1007/s11033-024-07123-x

Pawliszyn, J. (2012). Comprehensive Sampling and Sample Preparation: Analytical Techniques for Scientists. Elsevier. ISBN 9780123813732. https://doi.org/10.1016/C2009-1-60918-7

POWO (2026). *Plants of the World Online*. Facilitated by the Royal Botanic Gardens, Kew. Published on the Internet: https://powo.science.kew.org

Picot-Allain, C., Mahomoodally, M. F., Ak, G., & Zengin, G. (2021). Conventional versus green extraction techniques—A comparative perspective. *Current Opinion in Food Science, 40*, 144–156. https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.04.008

Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine, 26*(9–10), 1231–1237. https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3

Shakya, A. K. (2016). Medicinal plants: Future source of new drugs. *International journal of herbal medicine,* 4(4), 59-64. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1395.6085

Singleton, V. L., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic–phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture, 16*(3), 144–158. https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144

Sönmez, G. D. (2023). Evaluation of the phytochemical properties and DNA protective activity of *Bolanthus ortegioides* (Fisch. and CA Mey.) Madhani and Rabeler. JAPS: *Journal of Animal & Plant Sciences*, 33(2), 425–433. https://doi.org/0.36899/JAPS.2023.2.0634

Sulaiman, S. F., Sajak, A. A. B., Ooi, K. L., & Seow, E. M. (2011). Effect of solvents in extracting polyphenols and antioxidants of selected raw vegetables. *Journal of Food Composition and analysis*, *24*(4-5), 506-515. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2011.01.020

Veggi, P. C., Martinez, J., & Meireles, M. A. A. (2012). Fundamentals of microwave extraction. In Microwave-assisted extraction for bioactive compounds: theory and practice (pp. 15–52). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0347-8_2

Wen, C., Zhang, J., Zhang, H., Dzah, C. S., Zandile, M., Duan, Y., Ma, H., & Li, X. (2018). Advances in ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds from medicinal plants: *A review. Ultrasonics Sonochemistry*, 48, 538–549. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.06.009

Xu, L., & Wang, X. (2025). A comprehensive review of phenolic compounds in horticultural plants. International journal of molecular sciences, 26(12), 5767.

Youn, J. S., Kim, Y. J., Na, H. J., Jung, H. R., Song, C. K., Kang, S. Y., & Kim, J. Y. (2019). Antioxidant activity and contents of leaf extracts obtained from Dendropanax morbifera LEV are dependent on the collecting season and extraction conditions. *Food science and biotechnology*, 28(1), 201-207. https://doi.org/10.1007/s10068-018-0352-y

Zhi, W. J., Wang, L. F., & Hu, X. J. (2017). Recent advances in the effects of microwave radiation on brains. *Military Medical Research*, 4(1), 29. https://doi.org/10.1186/s40779-017-0136-7

Zhishen, J., Mengcheng, T., & Jianming, W. (1999). The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. *Food chemistry*, *64*(4), 555-559. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00102-2

Zygler, A., Słomińska, M., & Namieśnik, J. (2012). Soxhlet extraction and new developments such as Soxtec. In J. Pawliszyn (Ed.), Comprehensive Sampling and Sample Preparation (pp. 65–82). Academic Press. ISBN 978-0-12-381374-9. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381373-2.00037-5

Karaelmas Science and Engineering Journal
Journal home page: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen
DOI: 10.7212/karaelmasfen.1890774

Research Article
Received / Geliş tarihi : 17.02.2026
Accepted / Kabul tarihi : 03.04.2026

Assessment of Regional Green Hydrogen Production Potential Using Multilayer Sensor and SHAP Analysis for Smart City Applications

Akıllı Şehir Uygulamaları İçin Çok Katmanlı Algılayıcı ve SHAP Analizi ile Bölgesel Yeşil Hidrojen Üretim Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Abdulsamed Güneş[1*], Orhan Yaman[2], Elif Feyza Sarı[2], Hasan Yetiş[3]

[1]Firat University, Department of Electric and Energy, Elazığ, Türkiye
[2]Firat University, Department of Digital Forensics Engineering, Elazığ, Türkiye
[3]Firat University, Department of Computer Engineering, Elazığ, Türkiye

Abstract

This study aims to determine the regional hydrogen production potential of 2535 cities using a machine learning model based on renewable energy potential (photovoltaic and wind energy) and hydrogen production capacity data. The performance of the developed Multilayer Perceptron (MLP) model was evaluated using metrics such as R^2 (R-Squared), RMSE (Root Mean Squared Error), and MAE (Mean Absolute Error). The model outputs were interpreted using SHAP (SHapley Additive exPlanations) analysis to indicate the effects of parameters influential in renewable energy production, such as solar radiation and wind speed, on hydrogen production. Furthermore, cities with the highest and lowest potential for green hydrogen production were identified and geographically visualized using the Folium library. The results show that the model can predict the regional green hydrogen production potential with high accuracy and map the most suitable regions for production. This study serves as an important guide for sustainable energy planning and the development of green hydrogen infrastructure towards reducing carbon emissions to zero.

Keywords: Green hydrogen, hydrogen production, multilayer perceptron (MLP), renewable energy, SHAP analysis

Öz

Bu çalışmada 2535 şehir için yenilenebilir enerji potansiyeli (fotovoltaik ve rüzgar enerjisi) ve hidrojen üretim kapasitesi verileri kullanılarak makine öğrenmesi modeli ile bölgesel hidrojen üretim potansiyelinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) modelinin performansı R^2, RMSE ve MAE gibi metriklerle değerlendirilmiştir. Modelin çıktıları SHAP (SHapley Additive exPlanations) analizi ile yorumlanarak güneş ışınımı, rüzgar hızı gibi yenilenebilir enerji üretiminde etkili parametrelerin hidrojen üretimi üzerindeki etkileri belirtilmiştir. Ayrıca yeşil hidrojen üretimi için en yüksek ve en düşük potansiyele sahip şehirler belirlenmiş ve Folium kütüphanesi kullanılarak coğrafi olarak görselleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar modelin yüksek doğrulukla bölgesel yeşil hidrojen üretim potansiyelini tahmin edebildiğini ve üretim için en uygun bölgelerin haritalanmasını sağlamıştır. Bu çalışma karbon salınımının sıfıra indirgenmesi yolunda sürdürülebilir enerji planlaması ve yeşil hidrojen altyapısının geliştirilmesi için önemli bir rehber niteliği taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yeşil hidrojen, yenilenebilir enerji, hidrojen üretimi, çok katmanlı algılayıcı (MLP), SHAP analizi

*Corresponding author: agunes@firat.edu.tr

Abdulsamed Güneş orcid.org/0000-0002-8652-3720
Orhan Yaman orcid.org/0000-0001-9623-2284
Elif Feyza Sarı orcid.org/0009-0003-4806-9242
Hasan Yetiş orcid.org/0000-0001-7608-3293

This work is licensed by "Creative Commons Attribution-NonCommercial-4.0 International (CC)".

1. Introduction

The increasing global energy consumption, coupled with concerns about global climate change and strategic energy security due to high carbon emissions, has driven a growing demand for sustainable, low-carbon clean energy sources. In this context, "green hydrogen," produced using energy from renewable sources such as solar, wind, hydroelectric, and geothermal power, is seen as a future clean energy provider with zero carbon emissions. The production of green hydrogen without causing carbon emissions holds significant potential for transformation in industry, transportation, and other energy sectors. However, it is crucial that this potential is properly assessed and investment decisions are made based on scientific data. Otherwise, costly feasibility studies can significantly increase production costs and reduce efficiency in green hydrogen production.

The feasibility of hydrogen production depends on many factors, including a region's renewable energy potential, geographical location, and infrastructure capabilities. The complexity and interdependence of these factors analyze large datasets challenging with traditional methods. Therefore, machine learning algorithms have become an ideal tool for modeling and accurately predicting such complex relationships with high accuracy. In this study, we aim to estimate the green hydrogen production potential of various cities with high accuracy using these methods. The goal is to support strategic planning and decision-making processes for the efficient use of renewable energy sources and green hydrogen production. The developed model not only identifies existing production potentials but also explains the effects of geographical and meteorological characteristics on hydrogen production (using SHAP analysis), providing an interpretable approach. As a result, significant contributions will be made to charting a roadmap for future investments, particularly in green hydrogen energy.

As a result of our research, Table 1 summarizes some important studies in the literature on the production of green hydrogen using renewable energy sources and the integration of machine learning.

A study by Dinçer and Özer demonstrated how carbon emissions are reduced through green hydrogen production using renewable energy systems that can be integrated into smart cities. This detailed study shows that combining PV panels, wind turbines, biogas generators, and green hydrogen production, through a new design and optimization, yielded positive results such as the use of 150 vehicles with average fuel consumption and a reduction of 9398 tons of CO_2 emissions, based on 14,550 simulations (Dincer & Özer, 2025). Regarding carbon emission reduction, hydrogen fuel has been found to produce 70.7% less carbon dioxide than biogas and 29% less than natural gas (Shamsi et al., 2023). A study using the Aspen Plus program showed an 8.7% increase in hydrogen production in the optimization of the hydrogen production process (Phan et al., 2022). Studies evaluating production potential using MLP and SHAP analysis have yielded results similar to those obtained using artificial intelligence techniques (Demirpolat et al., 2025; Goktas et al., 2025; Çelik et al., 2024). Another study using the System Advisor Model (SAM) indicated increased hydrogen production efficiency and decreased carbon emission rates in various cities in Iraq, Saudi Arabia, and Yemen (Salameh et al., 2025). In optimization analysis conducted with the Matlab Simulink program in the MENA region, the total efficiency of the system in green hydrogen production was stated to be 36.71% (Hassan et al., 2024). In modeling for energy production from wave energy, another type of renewable energy, and the production of green hydrogen from this energy, it was stated that the green hydrogen production efficiency was high compared to other renewable energy sources (Yavuz, 2020).

It is a well-known fact that hydrogen production has a positive impact on reducing carbon emissions. In this context, waste heat recovery makes a significant contribution to energy efficiency. Studies in this field have shown that the carbon emission-reducing effect of waste heat recovery is directly correlated with hydrogen production and use. (Zengin et al., 2025; Erdoğan et al., 2025)

This study aims to raise awareness of hydrogen, and especially green hydrogen, as a crucial energy source for the world's future. It provides significant data for comparing green hydrogen production across all geographical regions. Given the growing need for data-driven studies for sustainable energy planning towards zero carbon emissions, this work offers a powerful machine learning framework capable of predicting regional green hydrogen production potential with exceptional accuracy. Unlike traditional statistical or physics-based models, which often require extensive and specific assumptions and struggle to generalize to different geographical regions, the proposed MLP-based regression approach directly leverages large-scale renewable energy datasets to deliver highly accurate predictions with minimal preprocessing. This methodology aims to reduce unexpected expenses in investment costs and lower the total cost.

Table 1. Relevant studies in the literature

Study	Subject	Method Used in the Study	Findings / Conclusion
Elazab et al., 2025	Examining the production, storage, transportation, and utilization technologies of green hydrogen in terms of cost, efficiency, and CO_2 reduction potential, and evaluating its integration into the global energy system.	Comprehensive literature review (review article), comparative analysis.	In Sweden, the lowest cost is achieved at €4.2/kg, with ~90% efficiency in Solid Oxide and up to 80% CO_2 reduction in Alkaline electrolysis. In Turkey, a potential of 2.26 Mt/year and a 21–41% CO_2 reduction in wind + high-temperature electrolysis have been achieved.
Awad et al., 2023	Production of green hydrogen using solar and wind energy with a PEM electrolyzer.	Mathematical modeling, Simulation (MATLAB/ Simulink), Comparative performance analysis.	A wind turbine system is approximately three times more efficient than a solar panel system (5.43% efficiency), with an efficiency of 18.77%.
Arslan et al., 2024	Green hydrogen production from renewable sources in Antalya.	Field data collection, theoretical energy-hydrogen conversion, electrolysis efficiency calculation, market price analysis and comparison.	Green hydrogen production was found to be 33.68% more profitable than electricity sales; hydroelectricity stood out with a 77% share.
Ekpotu et al., 2023	Design for the production of green hydrogen using solar energy in the Lagos region (Nigeria).	Homer & Aspen modeling, Matlab/Simulink PID and Fuzzy Logic control.	Fuzzy control provided faster stabilization compared to PID; the system was planned with fully renewable resources, aiming to reduce CO_2 emissions.
Dinçer & Özer, 2025	City-scale green hydrogen production in Kahramanmaraş using a hybrid PV-wind-biomass system.	14.550 simulations and 2.870 optimization analysis were performed using HOMER Pro software.	The system produces 22.5 million kWh of electricity annually and 58.5 kg of green hydrogen daily, while achieving an annual CO_2 emission reduction of 334,613 tons at an energy cost (LCOE) of $0.3959/kWh.
Al Makky et al., 2025	To examine whether it is technically and economically feasible to produce green hydrogen using solar and wind resources in Oman.	Simulation with HOMER Pro software.	A hybrid system based on solar and wind energy has been used to produce 1544 kg of green hydrogen annually; it has been concluded that the energy and hydrogen production costs are technically and economically feasible.
Karayel et al., 2022	Turkey's solar energy and green hydrogen map	City-based area analysis, PV panel scenarios, alkaline/ PEM/SOE electrolyzers.	Turkey's technical green hydrogen potential is approximately 415–427 Mt/ year; Erzurum and Konya have the highest potential.
Hassan et al., 2025	Techniques for producing green hydrogen based on solar energy.	This is a review study that comparatively examines green hydrogen production techniques in the current literature.	Electrolysis is the most suitable method with 65–82% efficiency; solar thermochemical processes stand out for large-scale production.
Buono-mano et al, 2025	Solar-powered green hydrogen with desalination of seawater.	Modeling and dynamic simulation (TRNSYS), energy-cost balance calculation.	Desalinated seawater, solar-powered hydrogen system: 118–162 tons/year production, €5–8/kg cost, €4.32/kg in Syracuse, €7–12 million in subsidies required.

Table 1 continued

Study	Subject	Method Used in the Study	Findings / Conclusion
Olodu et al., 2025	A comprehensive evaluation of green hydrogen production technologies (alkaline, PEM, SOE, AEM) from technical, economic, environmental, and political perspectives.	Literature review, comparative technical-economic analysis, life cycle assessment, and policy review.	While SOE provides 80-90% efficiency at high costs and temperatures, PEM is suitable for renewable energy with its medium efficiency. The most economical storage is compressed hydrogen, and the low emissions and policy support for green hydrogen are important.
Matera et al., 2024	A comparative study of large-scale renewable energy systems, operating individually or in hybrid (wind-solar combination) for green hydrogen production, across 28 different regions of the world.	Dynamic Simulations (TRNSYS)	The annual energy coverage rate was found to be 27%–70% in hybrid systems and 6%–71% in wind-only systems; the highest hydrogen production was determined to be 29.139 thousand m^3/year in Wellington, and the lowest production was 2.541 thousand m^3/year in Oymyakon.
Erbay, 2025	The role of ML models in solar energy forecasting to reduce green hydrogen costs.	XGBoost, SVR, LSTM	The unit cost of hydrogen was found to be $3.60/kg with the XGBoost model and $3.58/kg with the LSTM model; XGBoost yielded the most stable results.
Rai & Liu, 2025	Estimation and economic feasibility analysis of green hydrogen production in solar power plants.	Spatiotemporal Attention Framework (STAF) is a dual-path deep learning architecture that utilizes attention mechanisms with CNN and BiGRU.	The proposed STAF model increased prediction accuracy by 18.46% compared to other hybrid deep learning models.
Askr et al., 2025	The role and potential of artificial intelligence in the production, storage, and transportation of green hydrogen.	Systematic Literature Review (SLR) in which 100 articles were examined.	This literature review on artificial intelligence shows that machine learning models optimize green hydrogen production with an accuracy rate of 99.998%.
Mazzeo et al., 2022	Analysis of green hydrogen production from photovoltaic and wind systems.	Dynamic simulations (TRNSYS), dimensionless performance indicators (SLF, UF, GEIF) and energy analysis.	While hybrid systems are more efficient than single systems, optimal performance depends on location; the wind farm in Wellington achieved a SLF of 0.71, while the solar farm in Windhoek reached 0.4 SLF.

The integration of SHAP-based analysis further differentiates this methodology, enabling the transparent identification of the most effective renewable energy parameters and thus closing the gap between prediction accuracy and interpretability. By combining predictive performance, explainability, and geographic visualization, the proposed approach enhances methodological capabilities in green hydrogen potential assessment and simultaneously creates a scalable and adaptable decision support mechanism for government agencies, investors, and researchers in shaping future zero or low-carbon energy strategies.

2. Material and Method

2.1. Material (Data Set)

The Renewable Hydrogen dataset used in this study provides comprehensive information on renewable energy potential and hydrogen production capacity for 2535 cities (Renewable Hydrogen Production Dataset) (Sundari, 2025). The key variables in the dataset, given in Figure 1, are as follows.

- **City:** The city of name
- **Latitude, Longitude:** Geographic coordinates

- **Solar Irradiance (kWh/m²/day):** Average daily solar radiation
- **Wind Speed (m/s):** Average wind speed measured at a height of 10 meters
- **PV Power (kW):** Power expected from photovoltaic systems
- **Wind Power (kW):** The power expected from wind turbines
- **System Efficiency (%):** Energy-hydrogen conversion efficiency
- **Hydrogen Production (kg/day):** Daily hydrogen production amount (Target variable)
- **Feasibility Score:** Hydrogen production suitability score
- **Latitude Band:**

2.2. Method

Our study utilized a MLP based regression model. The steps of the method we used are as follows.

1. **Data Preprocessing:** Columns that will not be directly used in the model, such as city name, latitude, and longitude, have been removed. Other features and the target variable (Hydrogen Production) have been defined.
2. **Education-Test Distinction:** The dataset was divided into two parts: 80% training and 20% testing. This division is a standard approach to measuring the generalization ability of a model.
3. **Standardization:** To accelerate the training and improve the performance of the model used in this study, all features were standardized using StandardScaler.
4. **MLP Model:** An MLP model consisting of two hidden layers has been created. The structure of the model is as follows: In this model, the first layer consists of 128 neurons and the 'relu' activation function, the second layer consists of 64 neurons and the 'relu' activation function, and the output layer consists of 1 neuron (for the regression problem).
5. **Training:** The model used was trained over 200 epochs with 'adam' optimization and a loss function for the Mean Squared Error (MSE). The EarlyStopping mechanism was used to prevent overfitting.
6. **Performance Evaluation:** R^2, RMSE, and MAE metrics were used to evaluate the model's performance. The performance values of the training and test sets were compared to check for any signs of overlearning in the model.
7. **SHAP Analysis:** SHAP analysis was performed to interpret the model's predictions and determine which features were most influential. This analysis visualized the contribution of each feature to hydrogen production.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	City	Latitude	Longitude	Solar_Irradiance	Wind_Speed_m/	PV_Power_kW	Wind_Power_kV	System_Efficien	Hydrogen_Prod	Feasibility_Scor	Latitude_Band
2	City 1	-11.31	120.29	07.03	8.27	1237.97	11209.71	79.92	194.31	4.15	Equatorial
3	City 2	63.59	86.57	2.73	8.65	483.71	11958.74	70.55	161.78	3.49	Polar
4	City 3	35.16	-128.57	4.11	9.57	711.12	17112.71	74.91	262.47	4.11	Subtropical
5	City 4	17.83	91.23	5.74	3.41	1022.77	731.67	70.91	24.69	2.42	Tropical
6	City 5	-39.72	96.81	4.23	9.71	744.41	16869.46	71.6	243.03	4.1	Subtropical
7	City 6	-39.72	57.07	4.46	6.68	774.84	5929.75	73.83	90.15	3.18	Subtropical
8	City 7	-52.45	95.8	2.65	6.69	464.42	5393.29	71.56	82.95	2.89	Temperate
9	City 8	52.6	124.53	3.61	9.96	635.24	19694.96	79.64	317.09	4.26	Temperate
10	City 9	18.14	40.9	4.38	1.0	751.45	18.3	79.47	11.93	1.69	Tropical
11	City 10	32.05	-148.1	4.44	2.83	772.96	443.94	73.36	16.13	2.1	Subtropical
12	City 11	-57.32	-4.45	2.74	9.29	475.76	14867.84	76.4	229.73	3.81	Temperate
13	City 12	66.09	-152.05	2.69	10.81	468.17	23656.24	75.34	332.16	4.33	Polar
14	City 13	48.22	-33.28	3.64	7.9	645.81	9083.12	78.16	140.25	3.48	Temperate
15	City 14	-32.4	-33.44	04.03	3.29	704.46	683.33	76.27	20.28	2.19	Subtropical
16	City 15	-36.36	-156.24	3.96	5.59	710.82	3268.5	70.0	51.62	2.74	Subtropical
17	City 16	-36.16	-54.42	4.57	8.59	790.03	12258.58	77.63	195.74	3.86	Subtropical
18	City 17	-20.45	-140.04	5.53	7.5	962.93	7604.84	77.47	127.54	3.63	Tropical
19	City 18	8.22	110.96	6.14	4.78	1091.26	1981.52	75.1	42.04	2.88	Equatorial
20	City 19	-3.85	161.17	6.49	7.28	1138.79	7012.56	79.03	124.41	3.72	Equatorial
21	City 20	-22.14	-153.97	5.8	7.21	1017.42	7053.28	79.08	126.68	3.61	Tropical
22	City 21	19.54	163.84	5.37	04.09	916.33	1338.54	75.24	31.08	2.59	Tropical
23	City 22	-41.87	8.13	04.03	7.49	700.35	8294.27	76.08	131.35	3.4	Subtropical

Figure 1. Image of renewable hydrogen dataset.

8. **Visualization:** The results obtained were visualized on a geographical map using the Folium library. Cities were indicated with colored markers (green, orange, red) and labels according to their production potential.

The flowchart of the proposed method is shown in Figure 2.

The parameters in the proposed model are as follows: MLP Hyperparameters; hidden layers 2, neurons 128→64, activation ReLU, dropout 0.2, optimizer adam, loss MSE, epoch 200, batch size 32, earlystoppingpatience 20.

Parameters such as R^2, RMSE, and MAE were used to evaluate the proposed method. The definitions and formulations of these performance evaluation parameters are given below. The R^2 expression shows the extent to which the model's predictions explain the variability in the actual values. The R^2 expression was calculated using Equation (1).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (1)$$

RMSE expresses the magnitude of the error in data units by taking the square root of the average of the squares of the prediction errors. The RMSE value was calculated using the formulas given in Equation (2).

$$RMSE = 1 - \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2)$$

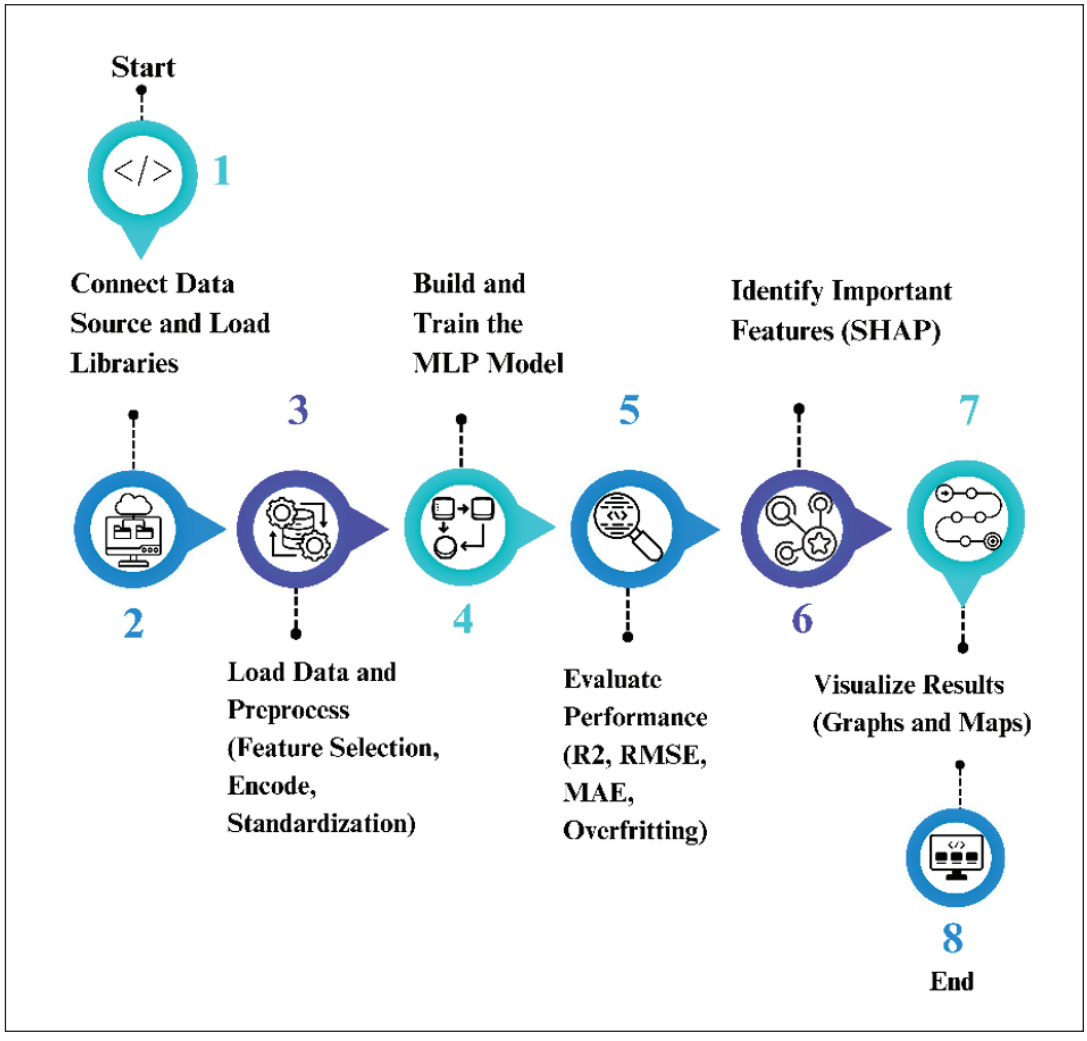


Figure 2. Proposed management flowchart.

The MAE expression shows the average error of the model by taking the average of the absolute values of the estimation errors. This expression was calculated using Equation (3).

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i - \hat{y}_i| \quad (3)$$

3. Results and Discussion

3.1. Renewable Hydrogen Dataset R^2, RMSE, MAE Results

In this study, the prediction performance of the proposed model, based on our research, was carefully evaluated using the collected hydrogen dataset. To ensure an unbiased evaluation, the dataset was classified into training and test subsets. The training subset was used for model parameter optimization, while the test subset was used solely for performance validation. To quantitatively measure the accuracy and generalization ability of the model used in our analyses, three commonly used and described statistical measures, R^2, RMSE, and MAE, were employed. The calculated MAE value quantitatively measures the mean absolute deviation between predictions and actual values, and offers a less sensitive, intuitive measure of accuracy compared to RMSE, being less susceptible to unintended and naturally occurring outliers. The numerical results of these metrics obtained for both the training and test datasets are presented in Table 2. These results demonstrate the model's fit during training and its robustness when applied to previously unseen data. A high R^2 value, along with low RMSE and MAE scores in both sets, indicates strong prediction accuracy and minimal overfitting, thus confirming the suitability of the proposed approach for renewable hydrogen production prediction tasks.

Table 2. Model performance values.

Data Set	R^2	RMSE (kg/day)	MAE (kg/day)
Training	0.9977	9.22	5.40
Test	0.9979	8.00	5.45

Interpreting the values given in Table 2, the high R^2 values obtained for the training and test sets indicate that the model used in this study predicts hydrogen production almost flawlessly. The fact that the difference between the R^2 values is less than 0.01 shows that our model does not suffer from overlearning problems. This result suggests that the error rate remains at a minimum level.

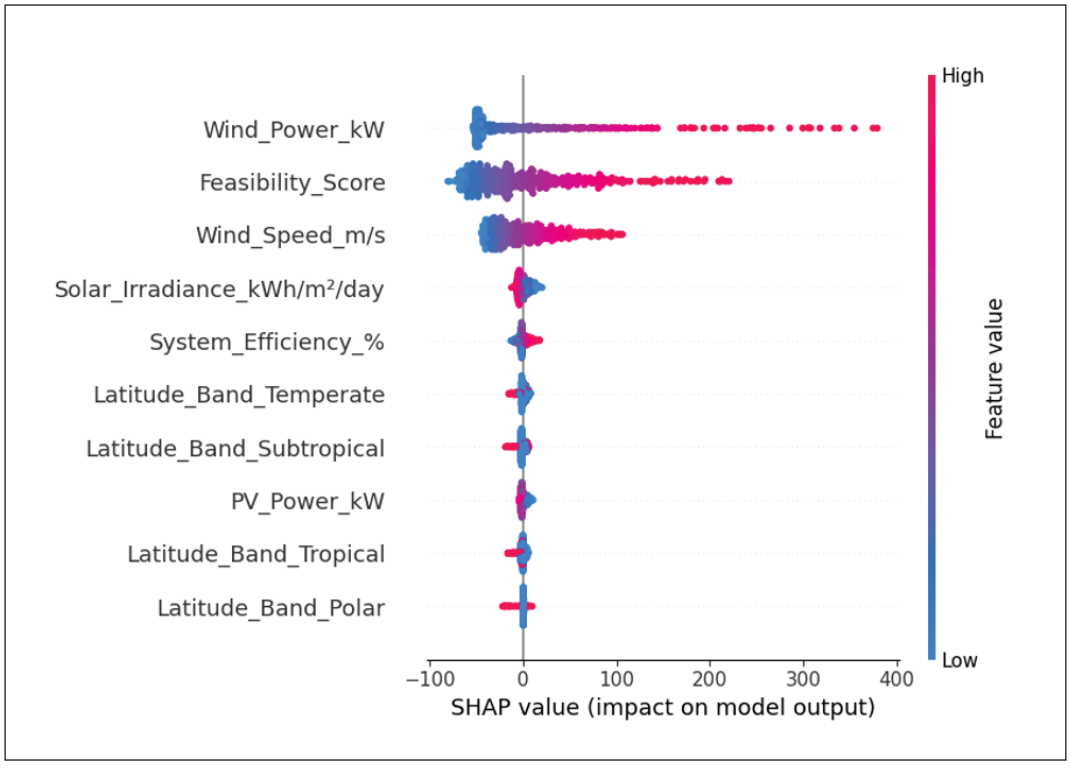


Figure 3. SHAP results for the model used.

3.2. SHAP Analysis Results

SHAP analysis is one of the methods used to transparently explain the data obtained from the analysis of machine learning models. The reason for using this method, especially in deep learning models like XGBoost, LightGBM, and Random Forest, is to determine the importance of each feature and how much it affects the predicted value.

SHAP analysis shows that the most influential attributes in the model's predictions are PV Power (kW), Wind Power (kW), and Solar Irradiance (kWh/m^2/day), respectively. These values are shown in Figure 3. These findings confirm that hydrogen production capacity is directly related to renewable energy potential.

4. Conclusions

The results of the hydrogen dataset folium map are explained with the folium map given in Figures 4 and 5. The folium map is a map application created using a Python-based library that allows for the visualization and interactive analysis of geographic data. Such maps enable the meaningful presentation of location-based data through colors, icons, and labels. The Folium map used in this study allows us to easily visually distinguish cities with varying levels of hydrogen production potential. On the map, cities with high production potential are indicated by red markers, medium potential cities by yellow markers, and low potential cities by green markers. Furthermore, the top 10 cities with the highest production potential, the top 10 cities with the medium potential, and the top 10 cities with the lowest potential are shown, and these cities are marked with special labels on the map given in Figure 5. In this way, users can both see the general distribution and easily access more detailed information about specific cities.

Figures 4 and 5 together represent the Folium Map. The cities with high, medium, and low hydrogen production potential, as marked on this Folium map, are listed in Table 3 below.

In evaluating the results of the Scatter Plot, the estimated and actual data obtained from the analyses were collected and examined. In this context, each data point in the graph given in Figure 6 represents the daily hydrogen production amount data in the test set. The position of the points visually reveals the relationship between the values predicted by the model and the actual measurement values. When the graph is examined, it is observed that the vast majority of the data points are clustered on or very close to the "Prediction = Actual" line (diagonal line), which represents the ideal prediction situation. This shows that the model's predictions have a very high correlation with the actual values and that its predictive power is quite strong. The concentration of points close to the diagonal also reveals that the prediction errors are at a minimum level and that the model is far from a systematic bias tendency. Furthermore, this distribution indicates that the model can make consistent and reliable predictions not only at average values but also at different production levels, thus showing high accuracy over a wide data range.

In this study, we developed an MLP-based regression model to estimate regional green hydrogen production capaci-

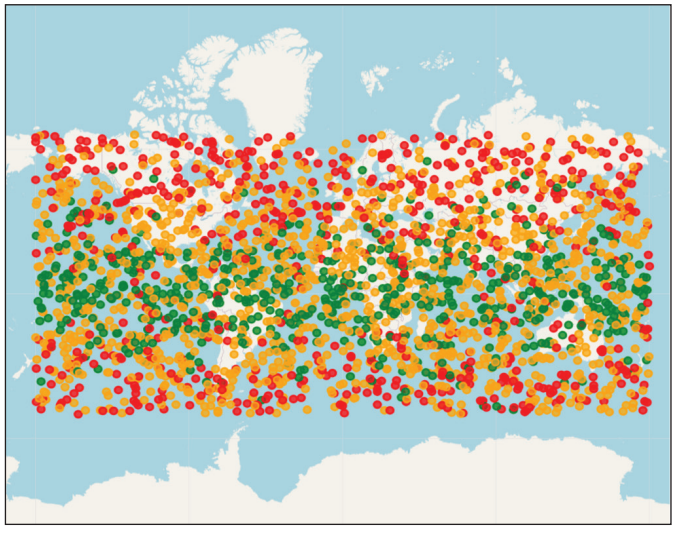


Figure 4. Map results for 2535 cities-1.

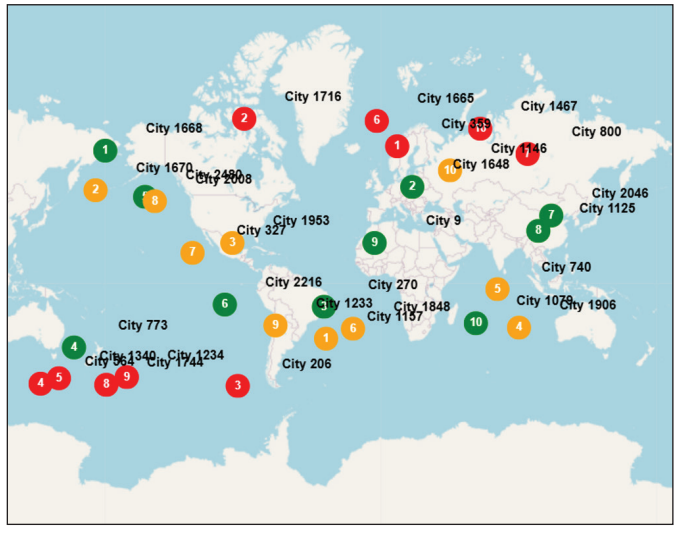


Figure 5. Map results for 2535 cities-2.

Table 3. Ranking of cities according to their hydrogen production potential.

Ranking of Cities According to Their Hydrogen Production Potential					
Top 10 Cities with the Highest Production		10 Cities with Medium-Level Production		The 10 Cities with the Lowest Production	
City	Hydrogen Prod. (kg/day)	City	Hydrogen Prod. (kg/day)	City	Hydrogen Prod. (kg/day)
City 359	2059.57	City 1157	120.27	City 1668	5.18
City 1716	2006.77	City 1670	120.27	City 1648	7.4
City 206	1366.07	City 1954	120.4	City 270	9.98
City 564	1303.7	City 1906	120.56	City 773	10.57
City 1340	1210.05	City 740	120.67	City 2480	11.56
City 1665	1194.68	City 1848	120.84	City 2216	11.71
City 800	1141.83	City 327	120.89	City 2046	11.73
City 1744	1120.78	City 2008	121.07	City 1125	11.89
City 1234	1114.38	City 1233	121.09	City 9	11.93
City 1467	1088.04	City 1146	119.41	City 1079	12.05

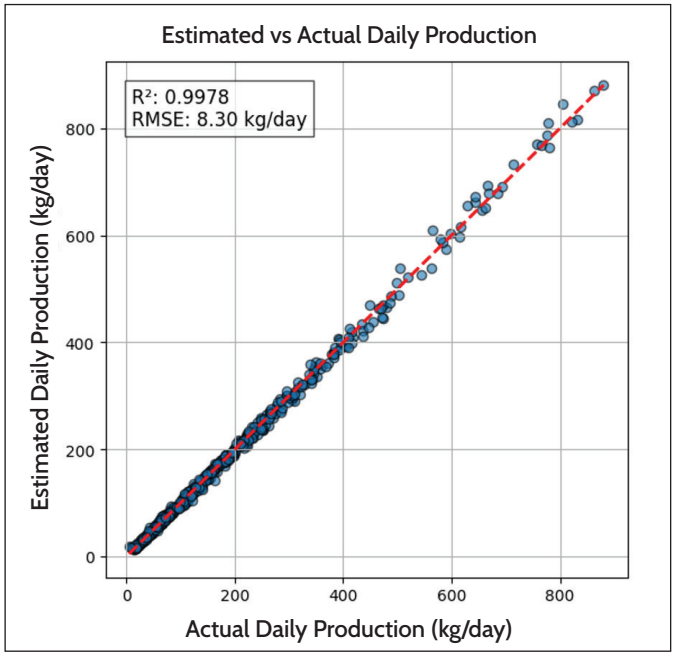


Figure 6. Scatter Plot Results

ty using renewable energy potential data focused on green hydrogen for 2535 cities. The high performance values of the developed model on the test set, such as R^2=0.9979, RMSE=8.00 kg/day, and MAE=5.45 kg/day, demonstrate that the model can predict hydrogen production potential with almost no error. The very close R^2 values between the training and test sets indicate that the model does not suffer from overfitting and has a high generalization ability.

One of the most critical findings of our research is the SHAP (SHapley Additive exPlanations) analysis conducted to identify the factors most influential on the model's predictions. This analysis clearly revealed that the most important characteristics affecting hydrogen production potential are PV Power (kW), Wind Power (kW), and Solar Irradiance (kWh/m^2/day), respectively. These findings provide a concrete basis for determining which renewable energy sources should be prioritized in planning future green hydrogen projects. In addition, geographical visualizations created with the Folium library facilitated the easy mapping of cities with the highest and lowest potential, supporting strategic decision-making processes for sustainable energy investments.

This study demonstrates that machine learning models are a powerful and applicable tool in identifying regional green hydrogen production potential. The developed model and methodology contribute to understanding the role of green hydrogen in the future energy ecosystem and to directing investments in the most efficient way.

Acknowledgment: This article is an original work; all results have not been published. Also, this study did not receive any funding or research grants during the study, research or assembly of the manuscript.

Author contribution: All authors contributed equally to all stages of this work.

Ethics Committee Approval: This study does not require ethics committee approval.

References

Al Makky, A., Kanjo, H. A., Farag, M. M., Hamid, A. K., Hussein, M., & Salameh, T. (2025). Techno-Economic Feasibility of Green Hydrogen Production Using Hybrid Solar-Wind Energy Systems in Oman. *International Journal of Thermofluids*, 101302. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2025.101302

Arslan, A., Ertürk, T., Doğan, B., & Yeşilyurt, M. K. (2024). Antalya İlindeki Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Yeşil Hidrojen Üretiminin Ekonomik Analizi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, *12*(2), 932-946. https://doi.org/10.29130/dubited.1266905

Askr, H., Basha, S. H., Abdelnapi, N. M., Elgeldawi, E., Darwish, A., & Hassanien, A. E. (2025). Artificial intelligence for sustainable green hydrogen production: A systematic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *224*, 116071. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116071

Awad, M., Mahmoud, M. M., Elbarbary, Z. M. S., Mohamed Ali, L., Fahmy, S. N., & Omar, A. I. (2023). Design and analysis of photovoltaic/wind operations at MPPT for hydrogen production using a PEM electrolyzer: Towards innovations in green technology. *PLoS One*, *18*(7), e0287772. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0287772

Buonomano, A., de Simone, P., Giuzio, G. F., Maka, R., Palombo, A., & Russo, G. (2025). Green hydrogen production: energy and economic modelling of self-sufficient solar-powered electrolyser based on seawater desalination. *Journal of Cleaner Production*, *519*, 146019. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146019

Çelik, M., Şencan, A. Ç., Şirin, Ş., Erdoğan, B., & Şencan, C. (2024). Effect of hBN and SDS added vegetable based cutting fluid application on the performance of turning Ti6Al4V alloys: a comparative analysis with Taguchi and ANN approaches. *Materials Chemistry and Physics*, 322, 129552. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129552

Dinçer, F., & Özer, E. (2025). Design of a hybrid renewable energy system and green hydrogen production for smart cities: A carbon emission reduction approach. *International Journal of Energy Studies*, *10*(1), 1125-1158. https://doi.org/10.58559/ijes.1613647

Demirpolat, A. B., Uyar, M. M., & Çıtlak, A. (2025). Experimental Investigation of Biodiesel Fuels Obtained by Enriching the Content of Vegetable and Waste Oils with Nanoparticles and Modeling of Data Obtained from the Produced Fuel Samples Using Artificial Intelligence. *Sustainability*, 17(23), 10689. https://doi.org/10.3390/su172310689

Ekpotu, W.F., Akintola, J.T., Obialor, M.C. and Udom, P.C. (2023). A Solar Energy System Design for Green Hydrogen Production in SouthWestern Nigeria, Lagos State, Using HOMER & ASPEN. Open Journal of Optimization, 12, 72-97. https://doi.org/10.4236/ojop.2023.122006

Elazab, M. A., Elgohr, A. T., Bassyouni, M., Kabeel, A. E., Attia, M. E. H., Elshaarawy, M. K., ... & Alzahrani, H. A. (2025). Green Hydrogen: Unleashing the Potential for Sustainable Energy Generation. *Results in Engineering*, 106031. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106031

Erbay, C. (2025). Machine learning models for solar forecasting and impact on green hydrogen production costs. *International Journal of Hydrogen Energy*, *132*, 225-238. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.04.465

Erdoğan, B., Topal, H. I., Aydın, N. Ö., Bayramoğlu, K., Zengin, İ., & Ulukaya, Ş. (2025). Integrated thermal and techno-economic analysis of waste heat recovery from sinter cooling in the iron-steel industry utilizing real data. T*hermal Science and Engineering Progress*, 103923. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.103923

Goktas, O. F., Demiray, E., Degirmenci, A., & Cankaya, I. (2025). Enhancing glucose measurement efficiency: a non-invasive approach using machine learning. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, *17*(7), 1107–1118. https://doi.org/10.1017/S1759078725102171

Hassan, A. A., Awad, M. M., & Nasser, M. (2025). Towards clean energy independence: Assessing MENA region hybrid PV-wind solutions for green hydrogen generation and storage and 24/7 power production. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *73*, 104158. https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104158.

Hassan, Q., Tabar, V. S., Sameen, A. Z., Salman, H. M., & Jaszczur, M. (2024). A review of green hydrogen production based on solar energy; techniques and methods. *Energy Harvesting and Systems*, *11*(1), 20220134. https://doi.org/10.1515/ehs-2022-0134

Karayel, G. K., Javani, N., & Dincer, I. (2022). Green hydrogen production potential for Turkey with solar energy. *International Journal of Hydrogen Energy*, *47*(45), 19354-19364. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.240

Matera, N., Mazzeo, D., Longo, M., Miraftabzadeh, S. M., & Leva, S. (2024). Towards sustainable hydrogen mobility: Evaluating renewable energy systems for green hydrogen generation. In *2024 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)* (pp. 1-6). IEEE. https://doi.org/10.1109/SEST61601.2024.10694639

Mazzeo, D., Herdem, M. S., Matera, N., & Wen, J. Z. (2022). Green hydrogen production: Analysis for different single or combined large-scale photovoltaic and wind renewable systems. *Renewable Energy*, *200*, 360-378. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.057

Olodu, D. D., Ihenyen, O. I., & Erameh, A. (2025). Comprehensive Analysis of Green Hydrogen Production: Technologies, Costs, Environmental Impacts, and Policy Frameworks. *Journal of Studies in Advanced Technologies*, *3*(1), 1-12. https://doi.org/10.63063/jsat.1611951

Phan, T. S., Minh, D. P., Espitalier, F., Nzihou, A., & Grouset, D. (2022). Hydrogen production from biogas: Process optimization using ASPEN Plus®. *International Journal of Hydrogen Energy*, *47*(100), 42027-42039. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.100

Rai, A., & Liu, J. (2025). Optimizing solar-electrolysis for green hydrogen production: A novel spatiotemporal attention framework (STAF) for solar-electrolysis prediction and economic viability analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.03.385

Salameh, T., Allouhi, A., Al Makky, A., Farag, M. M., Hamid, A. K., & Hussein, M. (2025). Simulation Study of Wind Energy Potential for Green Hydrogen Production in different cities in the Middle East region. *International Journal of Thermofluids*, 101281. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2025.101281

Shamsi, M., Moghaddas, S., Naeiji, E., & Farokhi, S. (2023). Techno-economic, energy, exergy, and environmental comparison of hydrogen production from natural gas, biogas, and their combination as feedstock. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *48*(7), 8971-8987. https://doi.org/10.1007/s13369-022-07581-z

Sundari, M. S. (2025). Green Hydrogen Productıon From Solar-Powered Electrolysıs: Techno-Economıc Feasıbılıty. Lex Localis: Journal of Local Self-Government, 23.

Yavuz, H. (2020). Modelling and simulation of a heaving wave energy converter based PEM hydrogen generation and storage system. *International Journal of Hydrogen Energy*, *45*(50), 26413-26425. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.099

Zengin, İ., Bayramoğlu, K., Aydın, N. Ö., Topal, H. İ., Erdoğan, B., & Ulukaya, Ş. (2025). CFD-Based Evaluation of Waste Heat Recovery and Pressure Drop in Rotary Sinter Coolers Under Varying Bed Properties and Inlet Conditions. *Sustainability*, 17(17), 8066. https://doi.org/10.3390/su17178066

Karaelmas Science and Engineering Journal
Journal home page: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen
DOI: 10.7212/karaelmasfen.1896095

Research Article
Received / Geliş tarihi : 23.02.2026
Accepted / Kabul tarihi : 14.05.2026

Erosion-Induced Coastal Changes in Karasu, Türkiye: New Evidence from GNSS and Remote Sensing Data

Türkiye'nin Karasu Bölgesinde Erozyon Kaynaklı Kıyı Değişiklikleri: GNSS ve Uzaktan Algılama Verilerinden Elde Edilen Yeni Kanıtlar

Kurtuluş Sedar Görmüş*

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

Abstract

Coastal regions are highly sensitive to both natural processes and anthropogenic pressures including settlement, tourism, industry, and transportation, in addition to the impacts of climate change. Continuous monitoring of these areas is therefore essential for sustainable coastal management and for enabling rapid response to potential erosion hazards. Such changes can be effectively monitored using geodetic and remote sensing techniques. The study area is located in the Karasu district of Sakarya Province, in the northwestern part of Türkiye, where significant coastal erosion has been observed. Erosion mitigation measures were initiated in 2010 following the identification of the problem. Since then, the shoreline has retreated approximately 100 m landward, although the construction of breakwaters has partially reduced the erosion rate. In this study, the current state of coastal change was investigated using open-access Sentinel-2 and Sentinel-1 datasets. The Normalized Difference Water Index (NDWI) was applied to optical imagery, while backscatter information derived from Synthetic Aperture Radar (SAR) data was used to delineate the land–water boundary. Additionally, shoreline data obtained from Global Navigation Satellite System (GNSS) observations were adopted as reference data for accuracy assessment. Based on GNSS surveys conducted at two-year intervals within the same period, an erosion area of 12,069 m^2 and an accretion area of 77,410 m^2 were quantified along an approximately 9 km coastal segment. The results indicate that shoreline extraction from Sentinel-2 imagery shows significantly higher consistency with GNSS-derived reference data compared to Sentinel-1 results. Overall, Sentinel-2 data provide more reliable and accurate shoreline delineation, suggesting that they are highly suitable for rapid and effective coastal erosion monitoring in support of sustainable coastal management.

Keywords: Coastal erosion, GNSS, NDWI, remote sensing, shoreline

Öz

Kıyı bölgeleri, doğal süreçlerin yanı sıra yerleşim, turizm, sanayi ve ulaşım gibi insan kaynaklı baskılara ve ayrıca iklim değişikliğinin etkilerine karşı son derece hassastır. Bu nedenle, sürdürülebilir kıyı yönetiminin sağlanması ve olası erozyon tehlikelerine hızlı müdahale edilebilmesi için bu alanların sürekli izlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu tür değişimler, jeodezik ve uzaktan algılama teknikleri kullanılarak etkin bir şekilde izlenebilmektedir. Çalışma alanı, Türkiye'nin kuzeybatısında yer alan Sakarya ilinin Karasu ilçesinde konumlanmakta olup, bölgede uzun süredir belirgin kıyı erozyonu gözlenmektedir. Problemin tespit edilmesinin ardından 2010 yılında erozyonu azaltmaya yönelik önlemler uygulanmaya başlanmıştır. Bu süreçte kıyı çizgisi yaklaşık 100 m kara yönünde geri çekilmiş, ancak inşa edilen dalgakıran yapıları erozyon hızını kısmen azaltmıştır. Bu çalışmada, kıyısal değişimin güncel durumu, açık erişimli Sentinel-2 ve Sentinel-1 uydu verileri kullanılarak incelenmiştir. Optik görüntülerde Normalize Edilmiş Su İndeksi (NDWI) uygulanırken, Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) verilerinden elde edilen geri saçılım bilgileri kıyı çizgisinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Ayrıca, Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS) ölçümlerinden elde edilen kıyı çizgisi verileri doğruluk değerlendirmesi için referans veri olarak kullanılmıştır. Aynı dönem içerisinde iki yıllık aralıklarla gerçekleştirilen GNSS ölçümlerine göre, yaklaşık 9 km uzunluğundaki kıyı kesimi boyunca 12.069 m^2 erozyon ve 77.410 m^2 akresyon alanı hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Sentinel-2

*Corresponding author: ksgormus@beun.edu.tr

Kurtuluş Sedar Görmüş orcid.org/0000-0002-7910-2071

This work is licensed by "Creative Commons Attribution-NonCommercial-4.0 International (CC)".

görüntülerinden türetilen kıyı çizgilerinin, Sentinel-1 sonuçlarına kıyasla GNSS referans verileriyle belirgin şekilde daha yüksek uyum gösterdiğini ortaya koymaktadır. Genel olarak, Sentinel-2 verilerinin kıyı çizgisi belirlemede daha güvenilir ve doğru sonuçlar sunduğu belirlenmiş olup, bu verilerin sürdürülebilir kıyı yönetimini desteklemek amacıyla hızlı ve etkin kıyı erozyonu izleme çalışmalarında yüksek potansiyele sahip olduğu değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kıyı erozyonu, GNSS, NDWI, uzaktan algılama, kıyı çizgisi

1. Introduction

Coastal zones are the most important parts of the land not only because of their economic value but also their role in the ecosystem. Ports located along the coast provide national and international transportation, which supports economic income (Mitri et al., 2020). Additionally, commercial fishing, fish farming, and aquatic plant products contribute to many circles of trade. These regions have always been the most populated regions in the world. More than 40% of the human population is living in the coastal region (Finkl & Makowski, 2018; Muskananfola et al., 2020; Nguyen & Tran, 2025). Dynamics of the coasts present a substantial zone between land and sea, especially for human activities. Natural effects have also played a key role in the morphological changes of the coasts, particularly where the streams meet the sea. Dynamics of the coasts present a substantial zone between land and ocean, especially for human activities. Meanwhile, human impacts such as infrastructures of ports destroy the coastal environment (Barbaro et al., 2019).

Today, changes in coastal structures can be monitored continuously by geodetic techniques. Thus, it is possible to monitor these regions, which are important for national economies, against natural or artificial disasters. Coastal structures can be monitored continuously from the past to the present with geodetic techniques such as GNSS, photogrammetry, and remote sensing, and thus time-dependent changes can be examined. Peynador and Méndez-Sánchez (2010) observed the change in the shoreline with the photogrammetry technique in their study. Cappucci et al. (2011) examined the sediment changes in the coastal area using remote sensing and bathymetric techniques. Kim et al. (2013) investigated the changes in the coastal zone due to the construction of the port using photogrammetry and GNSS techniques. Muskananfola et al. (2020) combined on-screen digitized Landsat-5 and Sentinel-2 data for long-term spatial analyses on the coast of Indonesia. Mitri et al. (2020) compared Landsat 8 and Sentinel-2 for the mapping of shoreline changes, and they concluded that Sentinel-2 provided slightly better results. Based on spectral analysis using optical data, Normalized Difference Water Index (NDWI) has been widely used to extract changes at shorelines and water bodies (Bai et al., 2011; Ozturk & Sesli, 2015; Sekertekin, 2020; Yaitskaya et al. 2025). However, optical sensors can fail when the atmospheric conditions are not good. On the other hand, Synthetic Aperture Radar (SAR) sensors can monitor the earth's surface day and night, and during cloudy days. In this study, SAR imagery acquired with identical polarization but different wavelengths, along with corresponding analytical approaches, was utilized for coastal investigations. (Bruno et al., 2016; Demir et al., 2019; Wen et al., 2022). Hossain and Saha (2024) systematically quantified river shoreline dynamics and island morphodynamics by integrating multi-temporal Landsat datasets (1972–2021) with advanced remote sensing and Geographical Information Systems (GIS) techniques, in conjunction with the Digital Shoreline Analysis System (DSAS).

Rock particles eroded by wave action or sediments carried to the coastal area from streams cause an accumulation in the region. It results in the formation of a hydrodynamic balance and, consequently, a line that does not change much on the shore. Intentional or unconscious physical interventions in coastal areas harm this natural process. The process often damages the ecological structure of the coasts, natural hydrodynamic elements deteriorate, and, as a result, coastal erosion is inevitable. The Karasu region is highly vulnerable, particularly due to erosion that has intensified over the past decade. Previously, Aydin and Uysal (2014) applied manual digitizing on Landsat images acquired from 1987 to 2013 for the extraction of risk for erosion and identified that the region has low to medium risk. Gormus et al. (2014) determined 100 m erosion as the maximum between 1987 and 2013 using digitized Landsat images. They also used GNSS measurements for the years 2010 and 2013. In the region although groins were made to prevent erosion, they did not work well due to their improper construction (Gormus et al., 2014). Nine of twenty-seven breakwaters were built parallel to the sea until 2013, and eventually a decrease in erosion was observed. However, new erosion was detected in 2020. This study aims to quantify and characterize recent coastal erosion that occurred in the region between 2018 and 2020 using geodetic methods. For this, the shoreline was determined with GNSS observations as reference data,

and the necessary analysis was carried out by evaluating multi-sensor images of different years with remote sensing techniques. Both active SAR images and passive optical images have been widely used for the extraction of changes at the shoreline. The obtained data were compared with the GNSS results, and a comparison was made between active SAR images and passive optical images.

1.1. Study Area

Karasu shoreline is one of the most sensitive shores located along the southern Black Sea (Gormus et al., 2014). In addition to having an uninterrupted shoreline of approximately 50 km, it also meets the tourism needs of the region due to its close location to the metropolitan area of Istanbul (Figure 1). There is a dense settlement in the region consisting of summer houses and hotels (Marangoz et al., 2013). The long shoreline has been formed in the basin by the sediment carried by the Sakarya River for millions of years (Kutoğlu et al., 2011).

The region has been struggling with coastal erosion for a long time. Especially in 2010 and afterwards, erosion damaged residential areas and caused the collapse of many buildings on the coastal part (Gormus et al., 2014). The coastal erosion in the region has more than one reason. Some of these factors have been identified as the construction of hydroelectric power plants and dam structures along the Sakarya River. These structures prevent sediment coming from other branches of the river from reaching the shore (Işık et al., 2006). In addition, uncontrolled sand and gravel quarries in the region played an important role in disturbing the natural balance (Figure 2a).

One of the most important damages causing coastal erosion is the catching of mussels. The dunes, which act as natural breakwaters in the sea topography, disappeared over time during the mussel catching and deteriorated the coastal morphology. Thus, especially in windy weather, since there is no obstacle to break the energy of the waves, the waves have come to the shore with high energy and damaged it (Yüksel, 2011; Çiftçi, 2024).

The most critical intervention in the region was the structure that was originally designed as a fishing port and later converted into a harbor, preventing sediment from reaching the shore. The coastal erosion in the region increased dramatically during the construction of the building, which was started in 1996 and completed in 2008 (Gormus et al., 2014; Tătui et al., 2019). Gradually increasing coastal erosion resulted in the destruction of houses on the shoreline

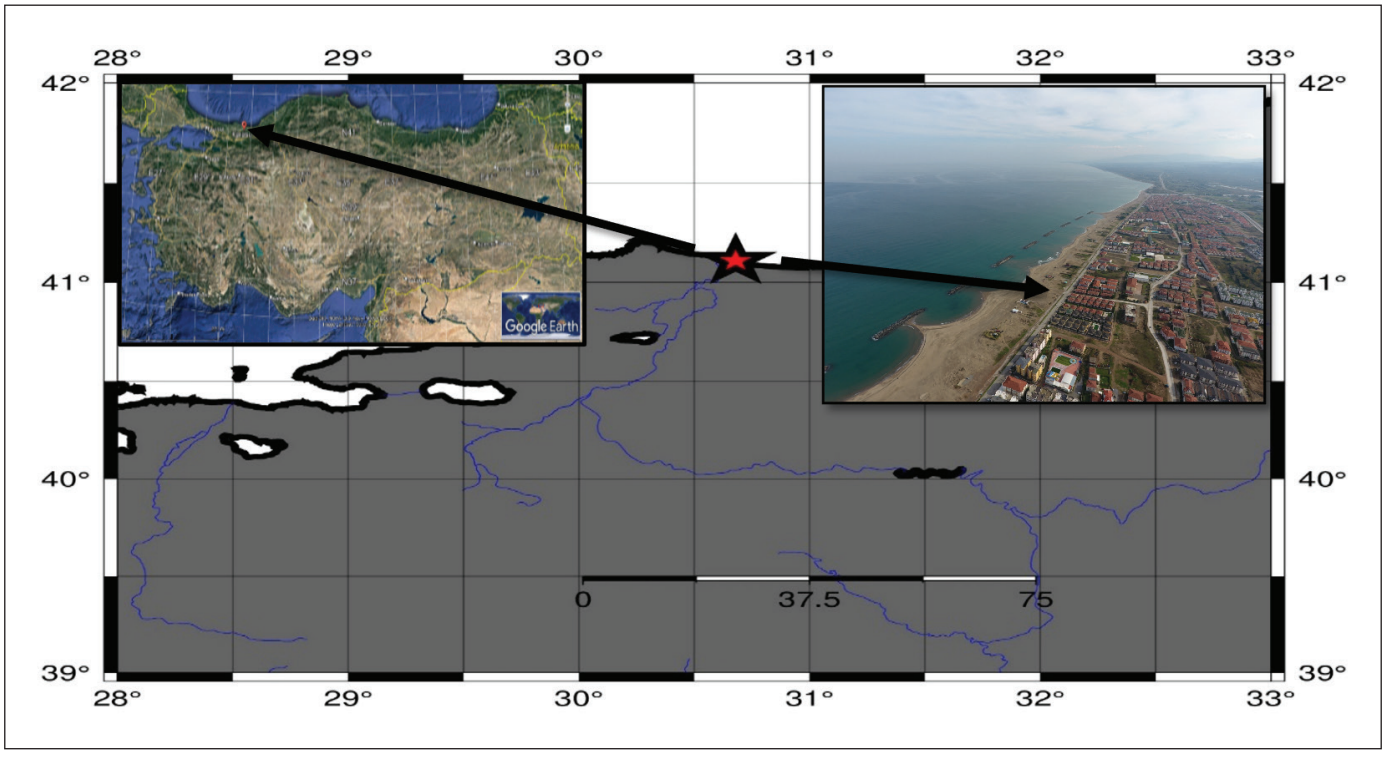


Figure 1. The study area (Türkiye; Sakarya, Karasu) (Google Earth, 2026).



Figure 2. a. Sand quarries in Sakarya River (DHA, 2014) b. New Erosion Area in 2026 (DHA, 2026).

after the strong storm in January 2010. Breakwaters built on the shore after the studies in the region partially produced solutions and prevented erosion. However, according to the recent field observations from the region, erosion has started again. In addition, severe storms that occurred in January 2026 further triggered new erosion processes in the study area (Figure 2b).

2. Material and Method(s)

The workflow of study consists of six main steps including satellite data acquisition, preprocessing, shoreline extraction, validation using GNSS data, calculation of erosion and accretion areas, and final interpretation of the results (Figure 3).

2.1. GNSS Measurements

Continuously Operating Reference Stations (CORS) networks, which can produce instant and highly accurate location information, are preferred in studies such as coastal line determination. CORS networks are systems that collect satellite observations 24 hours a day, 7 days a week, consisting of reference stations spread throughout the country in which they are established, and allow instant location in cm level. Many countries have started to establish such networks at an increasing speed in recent years. In Türkiye, the CORS network facility was started in 2006 and, since December 2008, has called CORS-TR (Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı-TUSAGA-Active) System (Yurdakul & Kalaycı, 2020). The CORS-TR network, which is designed principally for Real Time Kinematic (RTK) studies, has a total of 194 GNSS reference stations (Yalvaç, 2020; TUSAGA-Aktif, 2026).

In the TUSAGA-Active system, the observations of GNSS receivers placed in reference stations with known coordinates covering the whole country are transmitted to a control center via a Virtual Private Network (VPN) or General Packet Radio Service (GPRS) / Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE). The atmosphere and other errors are modeled in the control center, RTK / Differential Global Positioning System (DGPS) corrections are calculated in real time and sent to mobile GNSS receivers for positioning over GPRS / EDGE in RTCM (Radio Technical Commission for Aeronautics) format.

The RTK correction data is in RTCM communication format and is sent via NTRIP (Network Distribution of RTCM Data over Internet Protocol) to TUSAGA-Active system users over GPRS / EDGE. The servers in the control centers make atmospheric modeling by using instant data from all stations, and calculate DGPS / RTK correction data. The correction data is transferred to mobile receivers in the field in NTRIP format over GPRS / EDGE (Uysal et al., 2018).

In the TUSAGA-Active method, phase observations are used like classical GNSS observations, and the carrier phase observation in the base station at the t_0 epoch (a) is modeled as in (1) (Lichtenegger, 1998; Hofmann et al., 2008);

$$\lambda^s \Phi_a^s(t_0) = \rho_a^s(t_0) + \Delta\rho_a^s(t_0) + \Delta\rho^s(t_0) + \Delta\rho_a(t_0) + \lambda^s N_a^s \quad (1)$$

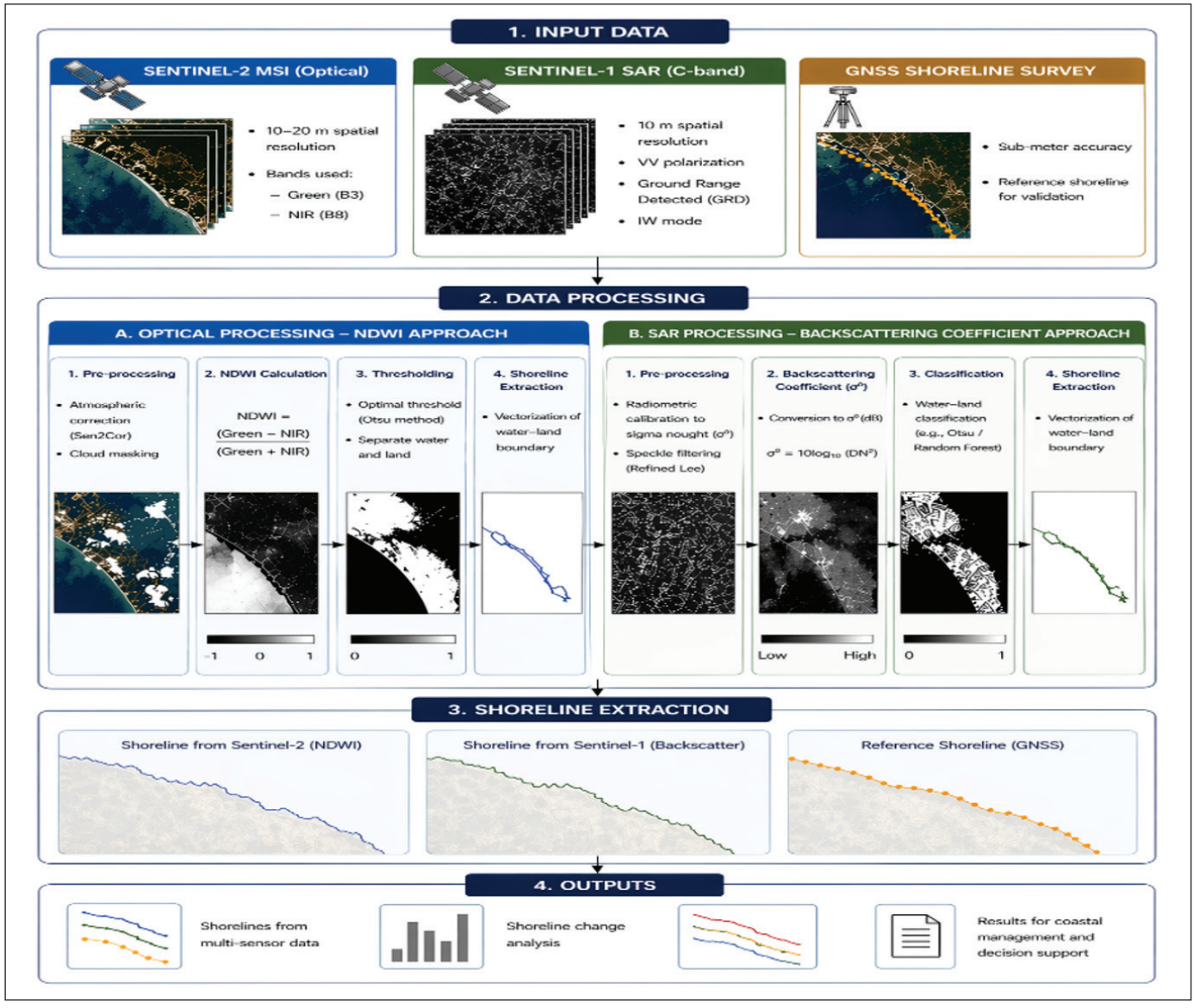


Figure 3. Workflow of study.

where, $\rho_a^s(t_0)$ is the geometric length between the satellite and the base station, $\Delta\rho_a^s(t_0)$ is the phase delay in the signal between the satellite and the receiver, $\Delta\rho^s(t_0)$ is the satellite-only error, and $\Delta\rho_\alpha(t_0)$ refers to receiver-based errors. Consequently, the phase length correction in t_0 epoch is $PRC^s(t_0)$ given in (2) (Hofmann et al., 2008);

$$PRC^s(t_0) = \rho_a^s(t_0) - \lambda^s\Phi_a^s(t_0) - \Delta\rho_a^s(t_0) - \Delta\rho^s(t_0) - \Delta\rho_a(t_0) - \lambda^s N_a^s \quad (2)$$

In order to reveal the erosion situation in the region, the shoreline was observed with the GNSS technique. The dry and wet feature was used as the shoreline marker. The observations were carried out in 2018 and 2020 on 19-20 March (Figure 4). A TUSAGA-Active compatible GNSS receiver was used in the observations. In the figure below, GNSS measurements performed in 2018 and 2020 are shown together. In the figure, the blue line represents 2018 GNSS observations, and the red line represents 2020 GNSS observations. The GNSS measurements were conducted with a recording interval of 10 seconds. In addition, tidal observations were carried out using a simple staff gauge installed in the study area during the dates when the GNSS measurements and satellite images were acquired (Figure 4). Based on the staff gauge data, it was concluded that the tidal variation could be neglected.

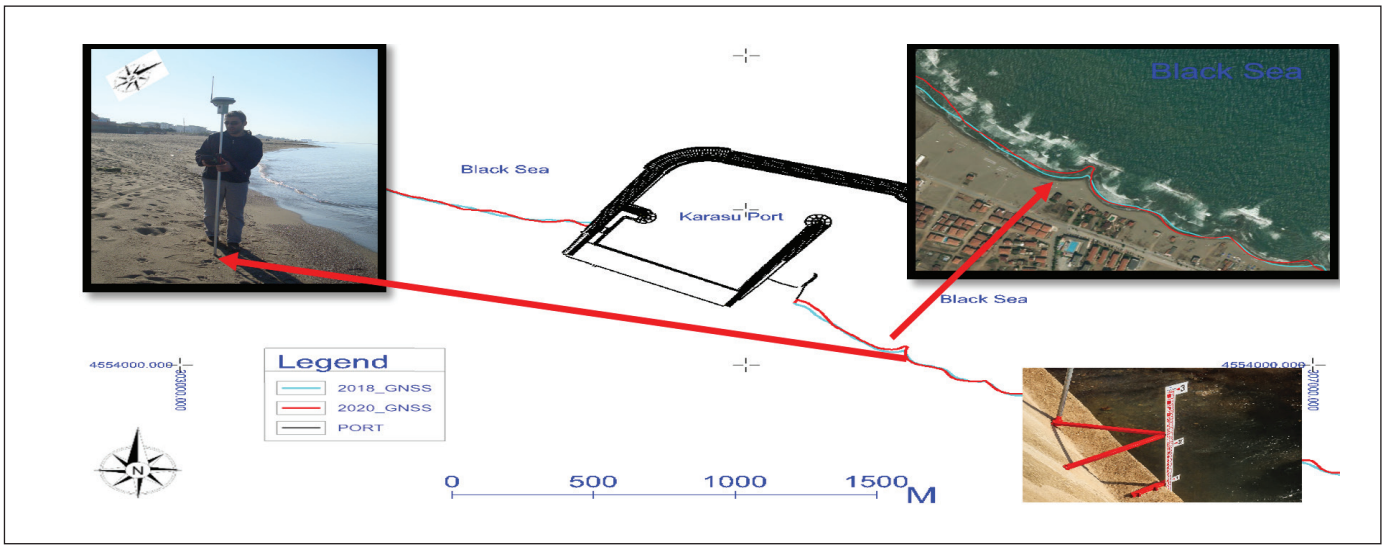


Figure 4. 2018 and 2020 GNSS and tidal observations.

2.2. Remote Sensing Data

The remote sensing data were acquired in close time to the ground measurements. Sentinel-1 SAR images acquired in April 2018 and April 2020 were used for the analysis. Before the shoreline extraction, pre-processing steps were applied. For the analysis, Ground Range Detected (GRD) products were downloaded through the European Space Agency (ESA) data hub (https://scihub.copernicus.eu/). The Sentinel Application Platform (SNAP) software developed by ESA was used for pre-processing the images. Three images per 2018 (22 April 2018 in both ascending and descending modes, and 27 April 2018 descending mode) and 2020 (22 April 2020 in both ascending and descending modes, and 23 April 2020 descending mode) were processed before shoreline extraction. In the preprocessing following steps were applied to the orbit file: thermal noise removal, calibration, speckle filtering, and terrain correction (Filipponi, 2019). A Lee filter was applied to reduce noise using a 5x5 kernel size (Lee, 1980). In the terrain correction step, a 1 arc-second (30m) Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Digital Elevation Model (DEM) was applied. The backscatter coefficients are converted into decibels (dB) unit which provides a better representation (Sekertekin, 2020). The average of SAR images of whole years, which indicates additional information, was calculated for further analysis (Abdikan et al., 2014).

In addition, Sentinel-2 multi-spectral images acquired on 04 June 2018 and 24 April 2020, which are close to the SAR acquisition time. The images are acquired in Level-2A, which are atmospherically corrected and provided by ESA. The water and land separation is conducted using Normalized Difference Water Index (NDWI) developed by McFeeters (1996) using (3);

$$NDWI = \frac{Green - NearInfrared}{Green + NearInfrared} \quad (3)$$

NDWI uses green (band 3) and near infrared (band 8) bands to delineate water. The values range between -1 and +1. The values higher than zero represent water, whereas the lower than zero values represent land. In both SAR and optical images, threshold values are used to separate the water from the land. Then, the shoreline is extracted for 2018 and 2020. When processing satellite images, the starting and ending points of GNSS measurements were taken into account.

3. Results and Discussion

The starting and ending points of the 9 km-long shoreline within the study area were consistently adopted for all analyses. In the comparative assessments, the shoreline derived from GNSS measurements was considered as the reference (ground truth), and the evaluation of remote sensing data was conducted accordingly.

For the image threshold analysis, the histograms of the images are used, and thresholds are selected manually. As represented in Figure 5, in both 2018 and 2020, VH polarized images have similar values, and water has lower values than land. In VV polarized images, the threshold values are high-

er than in VH polarized images. The threshold values of VH and VV polarized data are -25 db and -18.3 db for 2020, and -23 db and -13 db for 2018, respectively (Figure 5).

In optical images, NDWI features are used. The histogram values show that the NDWI values change between -1 and 1. Water has higher values than zero in both 2018 and 2020 images. The value zero is used as a threshold to separate two classes. As the breakwaters parallel to the shoreline have lower values, they were also separated from the water and can be visible in the sea (Figure 6). In both SAR and optical images, after creating binary maps using thresholds, a vectorization is applied to extract the shoreline.

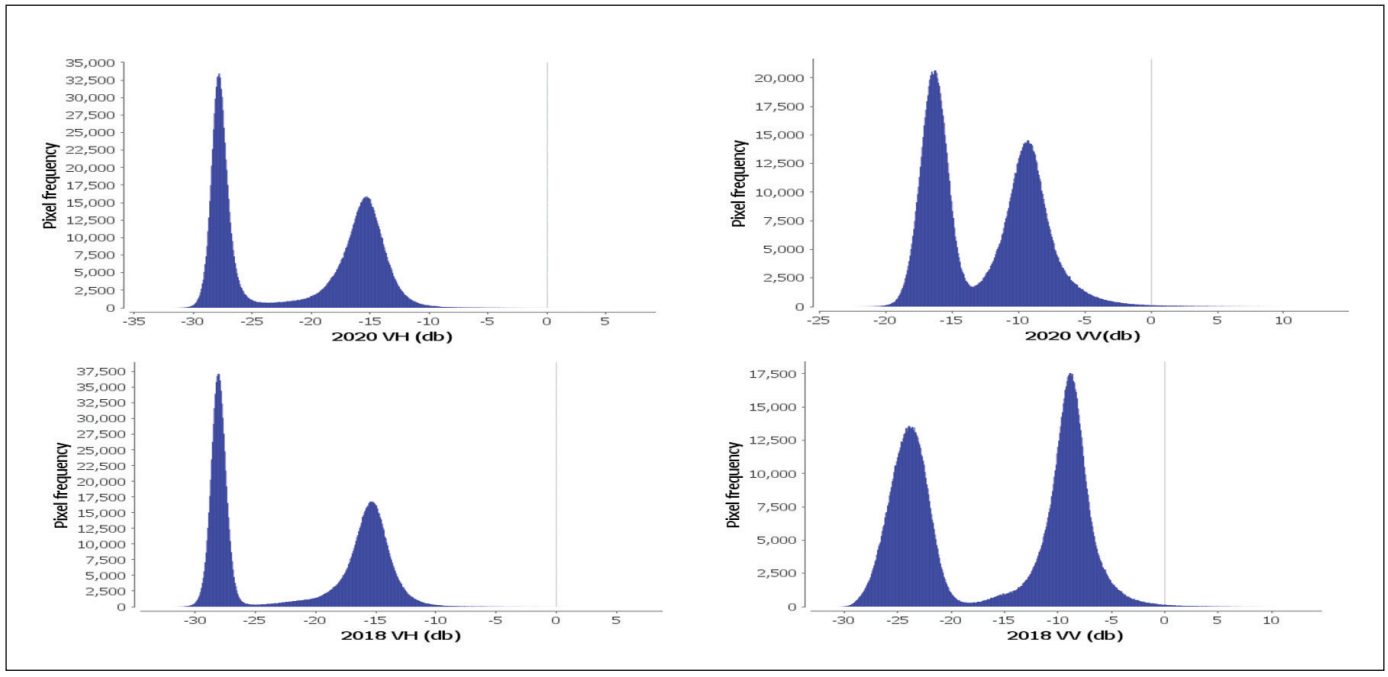


Figure 5. Histogram of Sentinel-1 images acquired in 2018 and 2020.

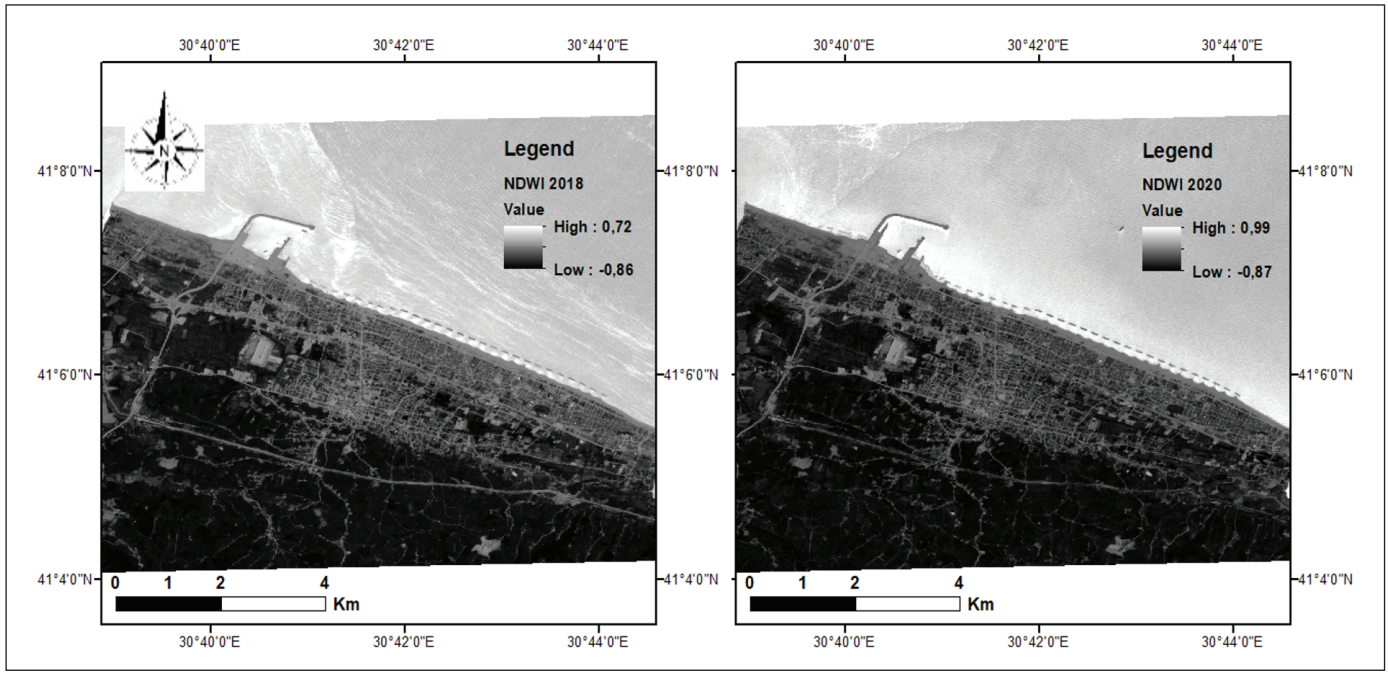


Figure 6. NDWI images derived from the Sentinel-2 data (left 2018, right 2020).

3.1. Comparison of GNSS and Sentinel-2 Images

The extracted shoreline from Sentinel-2 is overlapped with the GNSS measurements for the years 2018 and 2020. As the results show that Sentinel-2 has compatible shoreline extraction (Figure 7). The changes observed over the two-year period indicate both erosion and accretion along the shoreline. The spatial analysis (GNSS and Sentinel-2) showed there is more accretion than erosion at the coast. The measured erosion is about 12,069 m^2, and the accretion is about 77,410 m^2 using GNSS as reference data. According to GNSS measurements, a total land accretion of 65,340 m^2 has occurred in the region over the past two years, indicating the effectiveness of the breakwaters.

The difference between GNSS and NDWI is 809 m^2 for the erosion, and the accretion is about 690 m^2 (Table 1).

Table 1. Spatial changes at the coast.

Method	Erosion	Accretion
GNSS (2018-2020)	12,069 m^2	77,410 m^2
NDWI (2018-2020)	11,800 m^2	78,100 m^2
RADAR (2018-2020)	251,815 m^2	8,815 m^2

The areal comparison demonstrates a strong agreement between GNSS observations and NDWI-based shoreline extraction, both indicating predominant accretion along the study area. The close similarity in erosion and accretion values confirms the reliability of optical data for shoreline delineation. Conversely, the RADAR-based results exhibit a markedly different trend, with excessive erosion estimates and limited accretion. This inconsistency highlights the lim-

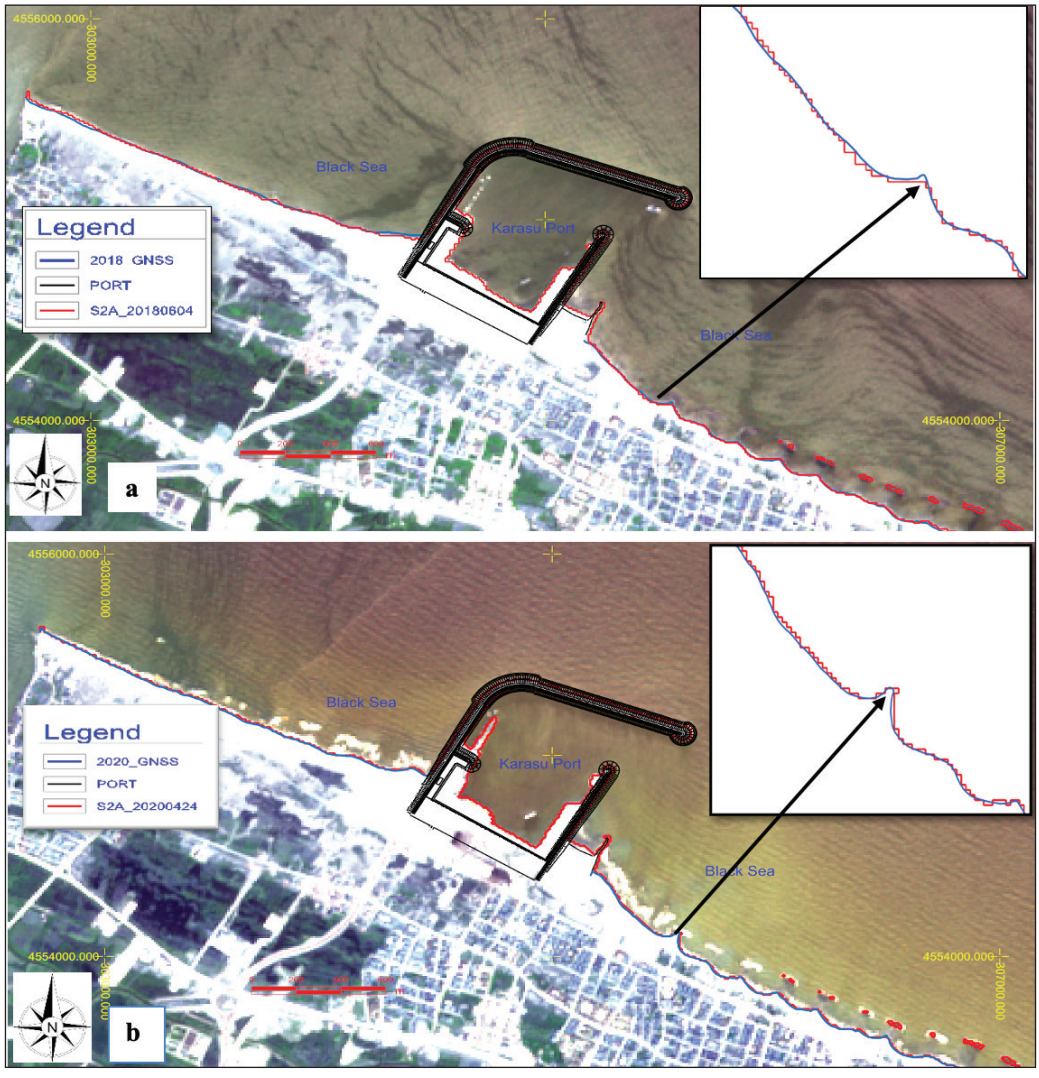


Figure 7. Comparison of GNSS and Sentinel-2 results (a: 2018, b: 2020).

itations of SAR data in coastal environments, where backscatter responses are strongly influenced by surface wetness and roughness conditions.

3.2. Comparison of GNSS and Sentinel-1 Images

The results obtained from Sentinel-1 analysis are not as reliable as Sentinel-2. The breakwaters are extracted very well, as they appear very bright in the images. However, compared to GNSS measurements, the differences are higher at the shoreline (Figure 8).

It is noticed that in most parts of the extracted shoreline passes through a few meters inside the land (Figures 8 and 10). In contrast to the shoreline extraction, Sentinel-1 data was able to delineate the breakwaters with a high degree of accuracy. The Sentinel-1 images 2020 captured the historical erosion signatures of the shoreline which is shown with the red line in Figure 9. In the upper-right panel of the figure, the blue line represents the shoreline derived from GNSS observations, the red line corresponds to the results obtained from radar data. To facilitate a clearer interpretation of the spatial differences, a recent satellite image is provided as the background basemap. This situation is similar for the 2018 data as well. Similar to the results of 2018, the results of 2020 of Sentinel-1 are also not proper as Sentinel-2. It is noticed that the erosion is exaggerated by the Sentinel-1 and accretion is extracted lower than the GNSS and Sentinel-2 (Table 1) (Figure 10).

The main reason could be due to the behavior of SAR signals to the object. The interaction of the SAR signal is different for the wet and dry sand (Savastano et al., 2024). Even though the SAR results do not provide a shoreline, they detect the breakwaters very well. This phenomenon is more clearly demonstrated in Figure 10, where all datasets are jointly visualized. The red and yellow zone within the area marked by same color arrows corresponds to the actual shoreline erosion observed between 2018 and 2020 (Red Area; accretion, Yellow Area; erosion). However, the Sentinel-1 datasets for 2018 and 2020 were significantly influenced by the interaction of SAR backscatter with wet and dry sand surfaces, leading to reduced accuracy in shoreline extraction.

For a better understanding of the behavior of the SAR, a profile analysis was applied to show the spatial distribution of pixel values. Figure 11 shows the profile that is about 60 m taken along the Sentinel-1 and Sentinel-2 data from sea (a) to the land (b).

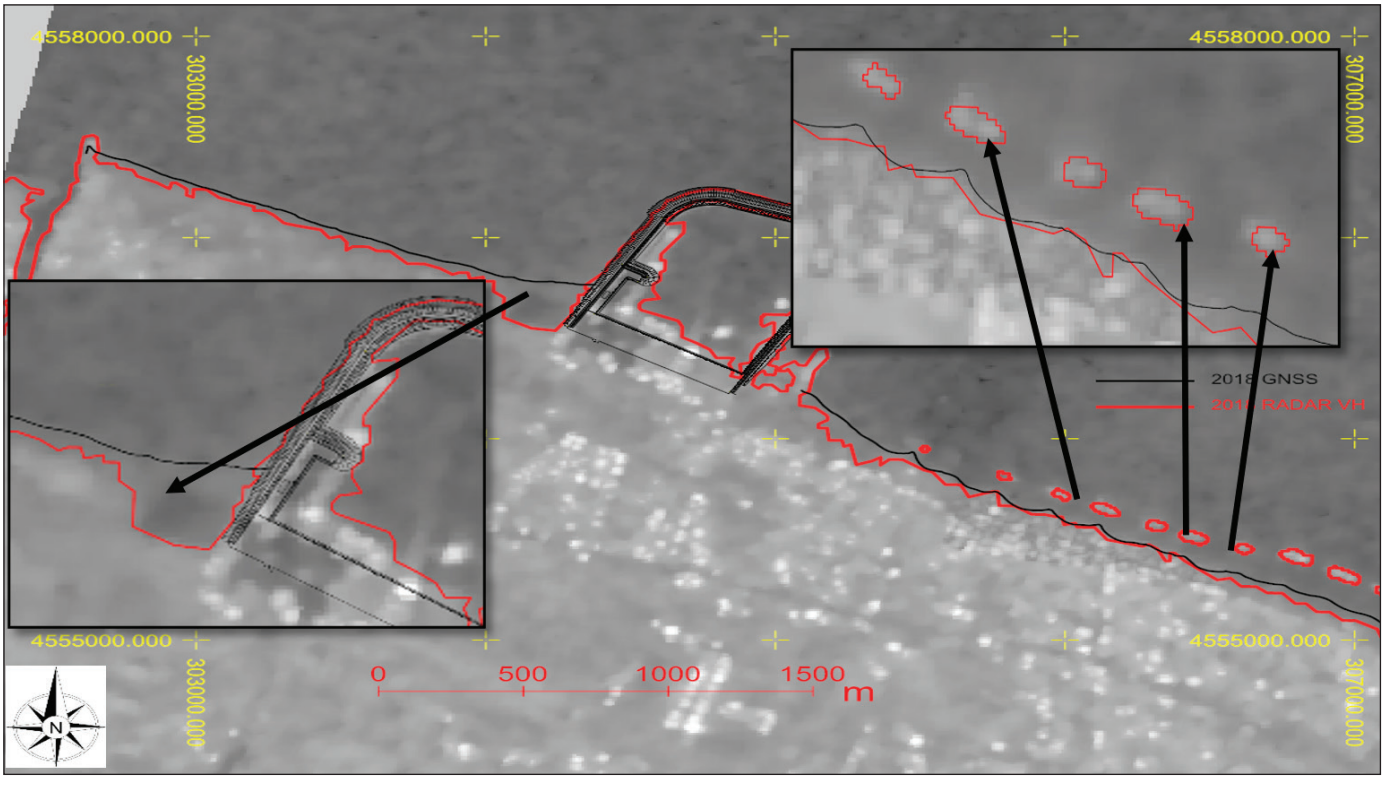


Figure 8. Comparison of GNSS and Sentinel-1 for the year 2018.



Figure 9. Comparison of GNSS and Sentinel-1 for 2020.

As noticed from the Sentinel-2 images, the border of water and land is clearer, and the pixel values are sharply increasing in both 2018 and 2020 (Figure 12).

In Figure 12, for the Sentinel-2, the land starts after 25 m in both 2018 and 2020 images, which is also visible in Figure 11. The SAR images provided low backscatter values, and the values are increasing after 25 m and 45 m in 2018 and 2020, respectively. Compared to VH polarized data, VV polarized data provided slightly better results. However, even the VV result of 2018 shows similar behavior; the changes from sea to land are not as sharp as those of Sentinel-2. The results of VH showed that the values change around the 45th m of the profile. As noticed, the results of Sentinel-1 do not give us a proper output compared to the Sentinel-2 and GNSS measurements.

Overall, the results indicated that the changes at the shoreline do not vary within two years at the left of the port according to GNSS measurements. In the previous study, the bathymetric map shows a deep point across the port (Kutoglu et al., 2011). It is expected that a large amount of the sand transported due to turbulence will settle in this deep location. Consequently, it will not be possible to carry the transported sand back to the coast by northern waves (Kutoğlu et al., 2011). It is also mentioned that the main breakwater close to the Sakarya River played an important role and prevented the sediment from spreading around the

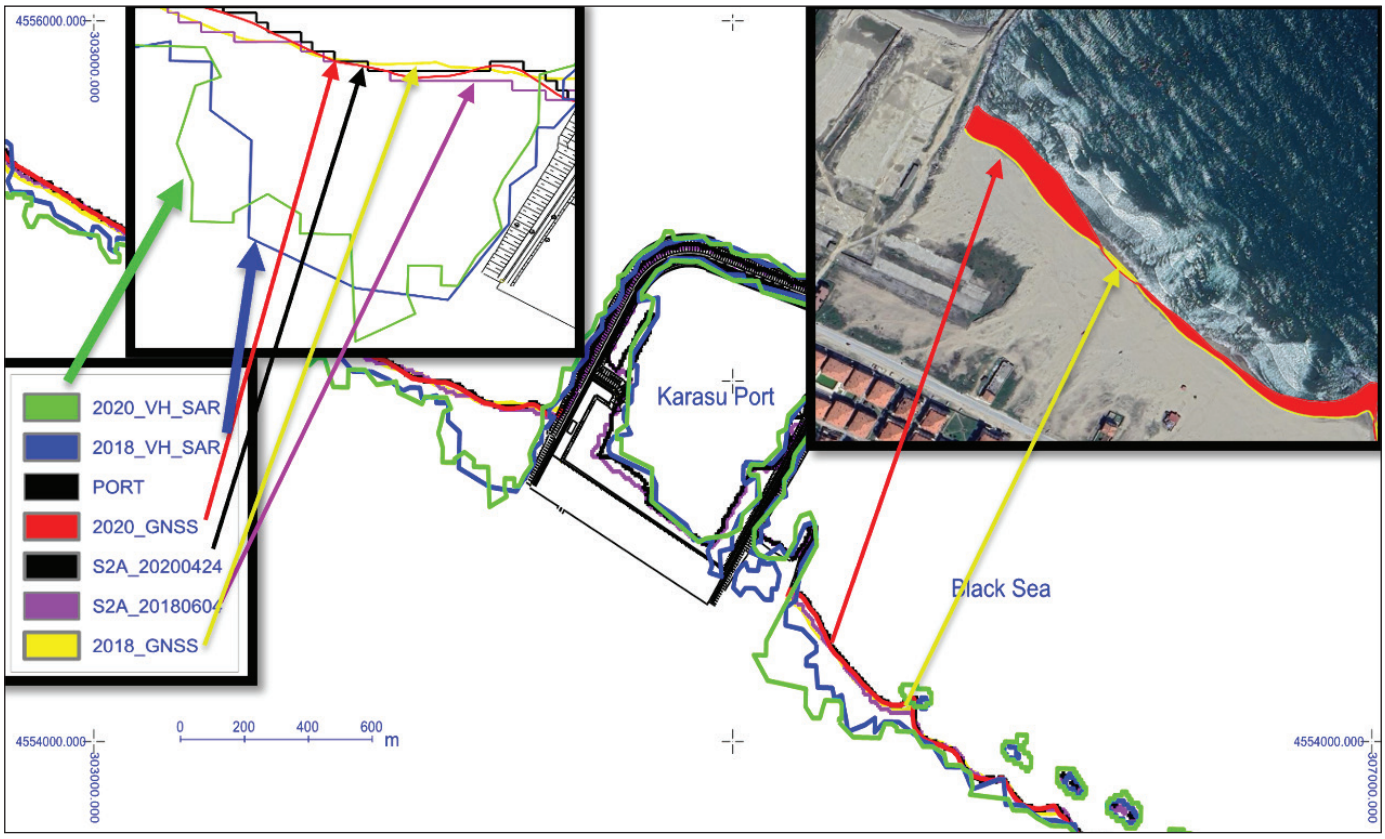


Figure 10. Shoreline changes between 2018 and 2020 (All data).

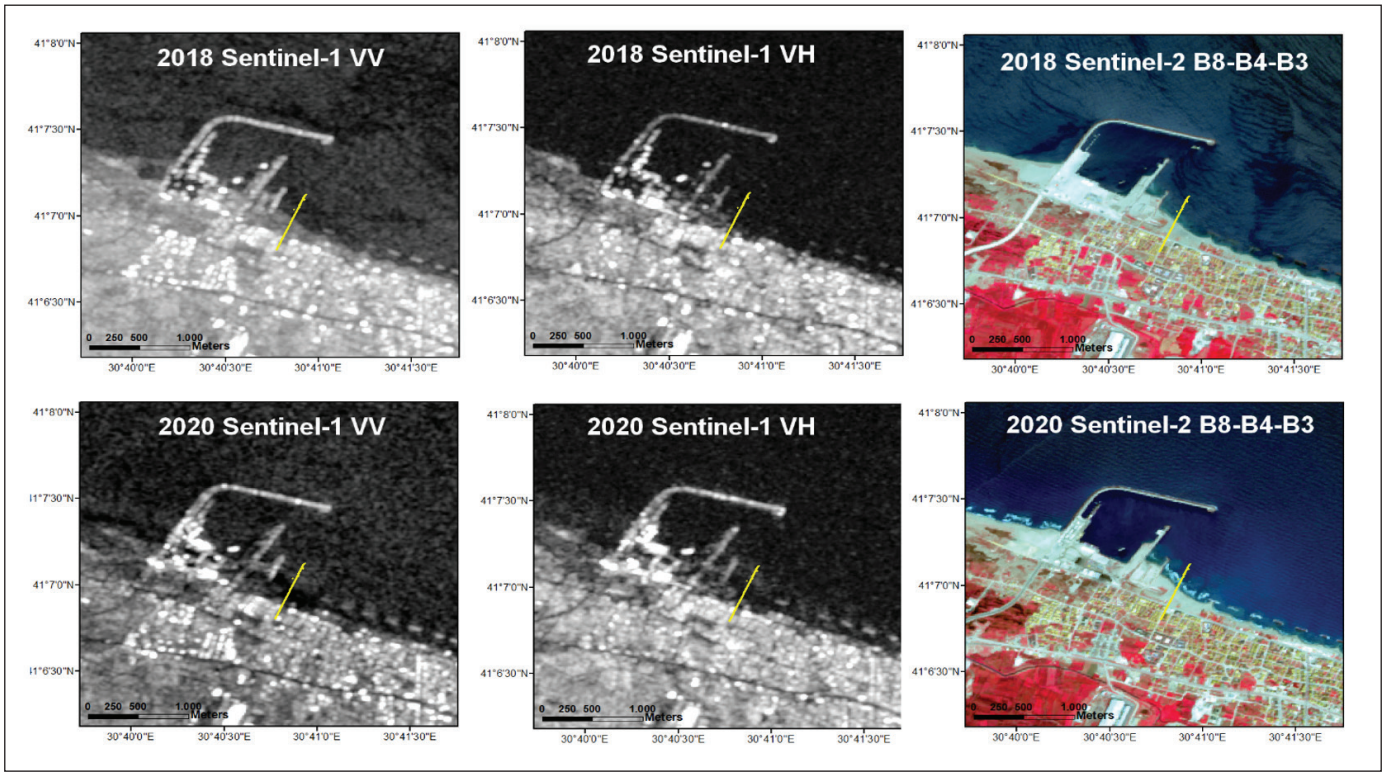


Figure 11. Profile taken from the images.

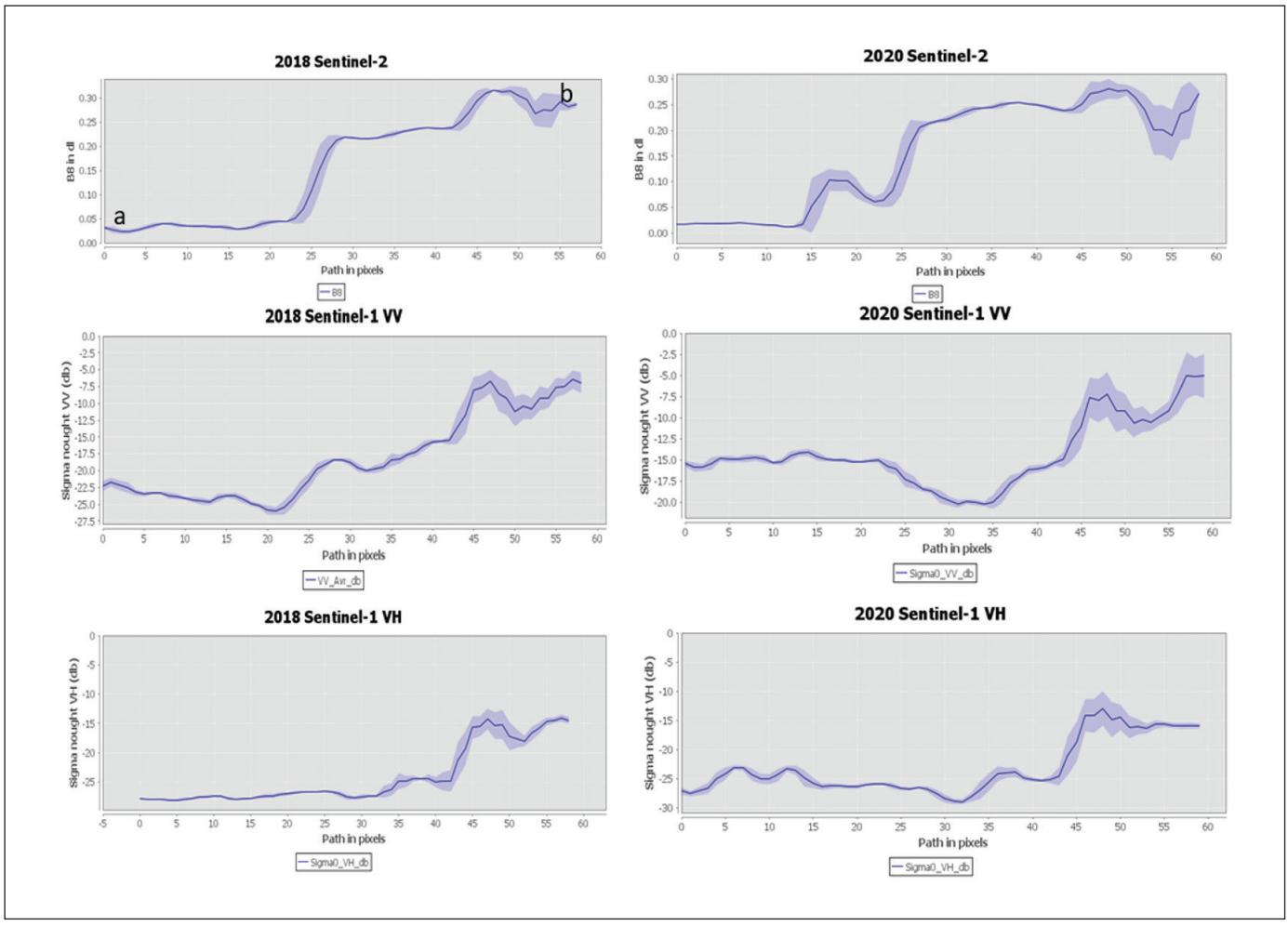


Figure 12. Profile analysis over the images.

shoreline (Gormus et al., 2014). This study approves that the sediment does not accumulate at this location. The results show that this part of the port is more stable when comparing GNSS and Sentinel-2 images.

Compared to the previous study (Gormus et al., 2014), Sentinel data are used instead of Landsat data. One of the reasons is that it has a higher resolution (10 m) than Landsat (30 m), enabling the identification of finer features. The other reason is that it can provide frequent images due to having a shorter revisit time. The advantages of Sentinel-2 on shoreline change mapping were also highlighted by Mitri et al., (2020). The NDWI can be an alternative way of shoreline change detection approach, whereas long-term and frequent GNSS measurements are not possible. The advantages of the remote sensing data are that, in both optical and SAR images, the breakwaters built in the sea are extracted, which is not possible to extract through GNSS measurements. Moreover, the satellite images with longer periods can be useful to determine the changes which are important for the renovation when needed.

4. Conclusion and Suggestions

Monitoring rapid coastal dynamics has become a priority for many cities that are vulnerable to erosion and sea level rise. Many cities located on the shoreline are locations for tourist attractions and trade transportation. Their design should be sustainable and protect the landscape, to mitigate possible hazards. Within this context, in this study, we have analyzed the coastal changes along Karasu located at the Turkish Black Sea coast, where erosion has occurred over time, and different precautions have been applied to reduce it. Although the construction of the breakwater has reduced the erosion along the coast, erosion continues. For the erosion analysis over the shoreline, GNSS measurements were completed, and the results were compared with both Sentinel-2 optical and Sentinel-1 SAR images.

Based on GNSS surveys conducted at two-year intervals (2018 and 2020) within the same period (19-20 March), an erosion area of 12,069 m^2 and an accretion area of 77,410 m^2 have been quantified along an approximately 9 km coastal segment. Processing of Sentinel-2 images have revealed 11,800 m2 of erosion and 78,100 m2 of accretion, and these results are quite close to the GNSS results. In contrast, Sentinel-1 images have indicated 251,815 m^2 of erosion and 8,815 m^2 of land accretion.

The usage of Sentinel-2 yielded compatible results in shoreline change mapping. Sentinel-1 SAR data showed limited performance in shoreline extraction due to backscatter variability over wet and dry sand; however, it proved highly effective in detecting coastal structures, particularly breakwaters, which appear as high-backscatter features in the imagery. For rapid monitoring of sandy shores, open-source Sentinel-2 can be an alternative data source against ground measurements, considering the differences between these two satellite data sources. Since the pixel-based approach in shoreline extraction is a useful method, it is intended to automate the processing to determine the seasonal effect along the coast for its sustainable monitoring.

In future studies, long-term monitoring of the study area is envisaged through the integration of satellite data and continuous GNSS observations. Additionally, in the forthcoming study planned for the region, strict attention will be paid to ensuring temporal consistency between GNSS observations and satellite image acquisition dates. This approach will effectively eliminate potential uncertainties and biases associated with temporal mismatches. Using long-term temporal resolution datasets, such an approach will enable more detailed, accurate, and spatiotemporally robust shoreline change analyses through the application of advanced methodologies such as the DSAS.

Ethics Committee Approval: I hereby declare that this study is an original work; that I have adhered to scientific ethical principles and rules at all stages of the study, including preparation, data collection, analysis, and presentation of the findings; that all data and information not obtained within the scope of this study have been properly cited and included in the reference list; and that no alterations have been made to the data used. I further declare that I have accepted and complied with all ethical duties and responsibilities in accordance with the principles, requirements, and conditions of the Committee on Publication Ethics (COPE).

References

Abdikan, S., Balik Sanli, F., Sunar, F., & Ehlers, M. (2014). A comparative data-fusion analysis of multi-sensor satellite images. *International Journal of Digital Earth, 7(8)*, 671–687. https://doi.org/10.1080/17538947.2012.748846

Aydın, M., & Uysal, M. (2014). Risk assessment of coastal erosion of Karasu coast in Black Sea. *Journal of Coastal Conservation, 18*, 673–682. https://doi.org/10.1007/s11852-014-0343-y

Bai, J., Chen, X., Li, J., Yang, L., & Fang, H. (2011). Changes in the area of inland lakes in arid regions of central Asia during the past 30 years. *Environmental Monitoring and Assessment, 178,* 247–256. https://doi.org/10.1007/s10661-010-1686-y

Barbaro, G., Bombino, G., Foti, G., Borrello, M. M., & Puntorieri, P. (2019). Shoreline evolution near river mouth: Case study of Petrace River (Calabria, Italy). *Regional Studies in Marine Science, 29,* 100619. https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100619

Bruno, M. F., Molfetta, M. G., Mossa, M., Nutricato, R., Morea, A., & Chiaradia, M. T. (2016). Coastal observation through COSMO-SkyMed high-resolution SAR images. *Journal of Coastal Research, 75*, 795–799. https://doi.org/10.2112/SI75-160.1

Cappucci, S., Scarcella, D., Rossi, L., & Taramelli, A. (2011). Integrated coastal zone management at Marina di Carrara Harbour: Sediment management and policy making. *Ocean & Coastal Management, 54,* 277–289. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2010.12.006

Çiftçi, Ö. B. (2024). Sakarya ili Karasu ilçesi kıyı çizgisi değişiminin makine öğrenme teknikleri ile tahmini. Yüksek lisans tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, 53 s.

Demir, N., Bayram, B., Şeker, D. Z., Oy, S., İnce, A., & Bozkurt, S. (2019). Advanced lake shoreline extraction approach by integration of SAR image and LiDAR data. *Marine Geodesy, 42(2),* 166–185. https://doi.org/10.1080/01490419.2019.1581861

DHA. (2014, September 4). Sakarya Nehri'nde kum ocaklarına yasak. https://kuzeyormanlari.org/2014/09/06/sakarya-nehrinde-kum-ocaklarina-yasak/

DHA. (2026, September 20). https://www.dha.com.tr/sakarya/karasu-haber/

Filipponi, F. (2019). Sentinel-1 GRD preprocessing workflow. Proceedings of the 3rd International Electronic Conference on Remote Sensing. https://doi.org/10.3390/ECRS-3-06201

Finkl, C. W., & Makowski, C. (2018). Encyclopedia of coastal sciences. Springer.

Google. (2026). Google Earth Pro (Version 7.3). https://earth.google.com/

Gormus, K. S., Kutoglu, S. H., Şeker, D. Z., & Oruç, M. (2014). Temporal analysis of coastal erosion in Türkiye: A case study of Karasu coastal region. *Journal of Coastal Conservation, 18,* 399–414. https://doi.org/10.1007/s11852-014-0325-0

Gormus, K. S., (2006). Gerçek zamanlı kinematik GPS ile köprü salınım ve titreşimlerinin belirlenmesi ve incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, 121 s.

Hofmann, W., Lichtenegger, H. B., & Wasle, E. (2008). GNSS Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and more. SpringerWienNewYork, Springer, Germany, 516 p.

Hossain, M. S., & Saha, U. (2024). Study on shoreline migration and island dynamics over the last five decades in the Muriganga River using multi-temporal satellite images. *Environ Monit Assess 196,* 199. https://doi.org/10.1007/s10661-024-12370-2

Işık, S., Şasal, M., & Doğan, E. (2006). Investigation on downstream effects of dams in the Sakarya River. *Gazi University Journal of Engineering and Architecture, 21(3),* 401–408.

Kemaldere, H., Mekik, Ç., & Alkan, M. (2013). Investigation on accuracies of some GNSS methods for GIS applications. International Symposium on Global Navigation Satellite Systems (ISGNSS 2013), Türkiye.

Kim, S., Park, S., Han, J., Son, S., Lee, S., Han, K., Kim, J., & Kim, J. (2013). Feasibility of UAV photogrammetry for coastal monitoring: A case study in Imlang Beach, South Korea. *Journal of Coastal Research, 90,* 386–392. https://doi.org/10.2112/SI90-049.1

Kutoğlu, S. H., Şeker, D. Z., Özölçer, İ. H., Oruç, M., Aksoy, B., & Gormus, K. S. (2011). Karasu kıyılarında erozyon ve kıyı yapılarının incelenmesi. 7. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu Bildirileri.

Lee, J. S. (1980). Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2(2),* 165–168.

Lichtenegger, H. (1998). DGPS fundamentals. *Reports on Geodesy, 11(41)*, 7–19.

Marangoz, A. M., Gormus, K. S., Oruç, M. O., Kutoglu, S. H., & Alkis, Z. (2013). Verification of temporal analysis of coastline using object-based image classification derived from Landsat-5 images of Karasu coast. 14th Türkiye Map Scientific and Technical Congress, Ankara, Türkiye.

McFeeters, S. K. (1996). The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing, 17(7)*, 1425–1432. https://doi.org/10.1080/01431169608948714

Mitri, G., Nader, M., Dagher, M. A., & Gebrael, K. (2020). Investigating the performance of Sentinel-2A and Landsat 8 imagery in mapping shoreline changes. *Journal of Coastal Conservation, 24,* 40. https://www.jstor.org/stable/48737037

Muskananfola, M. R., Supriharyono, & Febrianto, S. (2020). Spatio-temporal analysis of shoreline change along the coast of Sayung Demak, Indonesia using Digital Shoreline Analysis System. *Regional Studies in Marine Science, 34*, 101060. https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101060

Nguyen, H., & Tran, H. (2025). Deep learning for coastal erosion assessment: Case study of Vietnam's coastal regions. *Geoplanning: Journal of Geomatics and Planning, 12,* 139–158. https://doi.org/10.14710/geoplanning.12.2.139-158

Ozturk, D., & Sesli, F. A. (2015). Shoreline change analysis of the Kızılırmak Lagoon Series. *Ocean & Coastal Management, 118 (B),* 290–308. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.03.009

Peynador, C., & Méndez-Sánchez, F. (2010). Managing coastal erosion: A management proposal for a littoral cell in Todos Santos Bay, Ensenada, Baja California, Mexico. *Ocean & Coastal Management, 53 (7)*, 350–357. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2010.04.016

Savastano, S., Gomes da Silva, P., Sánchez, J. M., Tort, A. G., Payo, A., Pattle, M. E., Garcia-Mondéjar, A., Castillo, Y., & Monteys, X. (2024). Assessment of Shoreline Change from SAR Satellite Imagery in Three Tidally Controlled Coastal Environments. *Journal of Marine Science and Engineering, 12(1),* 163. https://doi.org/10.3390/jmse12010163

Sekertekin, A. (2020). A survey on global thresholding methods for mapping open water body using Sentinel-2 satellite imagery and NDWI. *Archives of Computational Methods in Engineering*, *28* (3) , 1335-1347. https://doi.org/10.1007/s11831-020-09416-2

Tapramaz, R. (2002). Sayısal Çözümleme, Literatür Yayıncılık, İstanbul, 410 s.

Tatui, F., Pîrvan, M., Popa, M., Aydoğan, B., Aydoğan, B. A., Görmüş, T., ... & Saprykina, Y. (2019). Sensitivity of Black Sea Coasts to Erosion and Flooding: an Index Based Approach. In *Geophysical Research Abstracts* (Vol. 21).

Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü. (2026). TUSAGA-Aktif (CORS-TR) sistemi. https://www.tusaga-aktif.gov.tr/

Uysal, M., Polat, N., & Aydın, M. (2018). Monitoring of coastal erosion of Karasu coast in Black Sea. In Recent advances in environmental science from the Euro-Mediterranean and surrounding regions. Springer.

Wen, Z., Chen, T., Thériault, P., Wang, Z., Chen, J., & Zhang, H. (2022). Integrated coastal subsidence analysis using InSAR, LiDAR, and land cover data. Remote Sensing of Environment, 282, 113297. https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113297

Yaitskaya, N., Magaeva, A., & Misirov, S. (2025). Coastal erosion of the Sea of Azov in 2000–2025: Dynamics and hydrometeorological factors. *Water, 18*, 58. https://doi.org/10.3390/w18010058

Yalvaç, S. (2020). Determining the effects of the 2020 Elazığ–Sivrice (Mw 6.7) earthquake from surrounding CORS-TR GNSS stations. *Turkish Journal of Geosciences, 1(1),* 15–21. https://izlik.org/JA84TW34FY

Yurdakul, O., & Kalaycı, İ. (2020). GLONASS'ın kısa bir bazda (5 km) ağ bazlı RTK tekniklerine etkisi. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2*(2), 38–51. https://izlik.org/JA92PG94SG

Yüksel, Y. (2011). Karasu kıyı alanı deformasyonu. Risk Altındaki Kıyı Alanları Çalıştayı, İMO Sakarya.

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi
Dergi web sayfası: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen
DOI: 10.7212/karaelmasfen.1915494

Araştırma Makalesi
Geliş tarihi / Received : 24.03.2026
Kabul tarihi / Accepted : 24.04.2026

Mikrodenetleyici ile Yazılım Kontrollü İndüksiyon Isıtma Sistemi Tasarımı

Design of Software Controlled Induction Heating System with Microcontroller

Kenan Altun[1*], Didem Altun[2]

[1]Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler MYO, Elektronik ve Otomasyon, Sivas, Türkiye
[2]Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler MYO, Elektrik ve Enerji, Sivas, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, indüksiyon ısıtma sistemlerinde uygulanacak malzemenin yapısına ısıl işlemin türüne ve istenilen süreye göre frekans, akım ve gerilim kontrolü sağlayan mikrodenetleyici tabanlı bir sistem tasarlanmıştır. Geleneksel sistemlerde farklı uygulamalar için donanımsal değişiklik gerekirken, önerilen tasarım ile gereksinim yazılım tabanlı bir çözümle ortadan kaldırılmıştır. İndüksiyon bobininde oluşacak manyetik alan, kullanıcı arayüzü üzerinden uzaktan kontrol edilebilir. Arduino ve IGBT tabanlı H-köprü devresi kullanılarak önerilen sistem, C# ile tasarlanmış bir arayüz üzerinden ısıl işlem uygulanacak malzemenin cilt derinliği ve işlem gereksinimlerine uygun frekans seçimine olanak tanır. COMSOL Multiphysics™ simülasyonlarıyla doğrulanan tasarım, manyetik akı yoğunluğu ve yüzey sıcaklık dağılımını ortaya koymuştur. Tasarım 450 W çıkış gücüne sahip bir deneysel çalışma ile test edilmiştir. Önerilen yaklaşım, donanımsal değişiklik olmadan farklı malzeme ve işlemlere hızlı adaptasyon sağlayarak endüstriyel uygulamalarda esneklik ve maliyet avantajı sunar. Literatürdeki sabit frekanslı veya donanım odaklı sistemlerden farklı olarak, önerilen sistem yazılım tabanlı kontrol ile öne çıkar ve uzaktan erişim özelliğiyle işletme verimliliğini artırmayı hedefler. Simülasyon ve deneysel çalışma bulguları sistemin yüzey sertleştirme, tam ısıtma veya eritme gibi çeşitli işlemlerde etkin olduğunu göstermiştir. Gelecekte farklı malzemelerle gerçek zamanlı testler ve çoklu indüksiyon kontrolü gibi ek özelliklerin entegrasyonu planlanmaktadır. Bu sistem, indüksiyon ısıtma teknolojisinde pratik bir alternatif olarak işletme maliyetlerini düşürme ve uygulama kolaylığı sağlama potansiyeline sahiptir.

Anahtar Kelimeler: İndüksiyon ısıtma, mikrodenetleyici, rezonans frekansı, yük tanımlama

Abstract

In this study, a microcontroller-based system has been designed to control frequency, current, and voltage in induction heating systems based on the material structure, type of heat treatment, and desired duration. While traditional systems require hardware modifications for different applications, the proposed design eliminates this need with a software-based solution. It offers the ability to remotely control the magnetic field generated in the induction coil through a user interface. Utilizing an Arduino and an IGBT-based H-bridge circuit, the proposed system enables frequency selection suitable for the skin depth and processing requirements of the material to be heat-treated via an interface designed in C#. The design, validated through COMSOL Multiphysics™ simulations, reveals magnetic flux density and surface temperature distribution. The design was experimentally validated at 450 W output power using Arduino-controlled IGBT H-bridge inverter. The proposed approach provides rapid adaptation to different materials and processes without hardware changes, offering flexibility and cost advantages in industrial applications. Unlike fixed-frequency or hardware-focused systems in the literature, the proposed system stands out with its software-based control and aims to enhance operational efficiency with remote access capabilities. Findings from simulations and experimental studies demonstrate the system's effectiveness in various processes such as surface hardening, full heating, or melting. Future plans include real-time testing with different materials and the integration of additional features such as multi-induction control. This system has the potential to serve as a practical alternative in induction heating technology, reducing operational costs and providing ease of application.

Keywords: Induction heating, load identification, microcontroller, resonance frequency

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: kaltun@cumhuriyet.edu.tr

Kenan Altun orcid.org/0000-0001-7419-1901
Didem Altun orcid.org/0000-0002-1964-3538

Bu eser "Creative Commons Alıntı-GayriTicari-4.0 Uluslararası Lisansı" ile lisanslanmıştır.

1. Giriş

İndüksiyon ısıtma teknolojisi elektromanyetik enerjinin temassız bir şekilde ısıtılacak malzemeye aktarılması prensibiyle çalışır ve ilk olarak 1926'da W. Braun tarafından kullanılmış ve 1939'da V.P. Vologdin tarafından patenti alınmıştır (Rudnev vd., 2014). Günümüzde çelik gibi metallerin sertleştirilmesi, tavlanması, eritilmesi ve lehimlenmesi gibi ısıl işlemlerde hızlı, ekonomik ve tekrarlanabilir bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bunun ötesinde mutfak aletlerinden elektrikli araçların iç mekan ısıtmasına, demiryolu sistemlerinden petrol boru hatlarının ısıtılmasına kadar geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir (Żelazny vd., 2021; Aflyatunov vd., 2022). Teknolojinin temelinde güç ünitesinden indüksiyon bobinine iletilen yüksek frekanslı akımın oluşturduğu manyetik alan yatmaktadır. Bu manyetik alan, malzeme yüzeyinde girdap akımları üreterek ısı enerjisine dönüşür. Bu, sistemin enerji verimliliği ve uygulama kolaylığını artırarak endüstriyel süreçlerdeki değerini yükseltmektedir (Um vd., 2024). Özellikle sertleştirme gibi işlemlerin yanı sıra, malzeme eritme, kaynak yapma ve alan ısıtma gibi farklı ihtiyaçlar için indüksiyon ısıtma tercih edilmektedir (Pleshivtseva vd., 2017).

Geleneksel indüksiyon ısıtma sistemleri genellikle sabit frekanslı tank devrelerine dayanır ve bu durum, malzeme özellikleri veya işlem türleri değiştikçe önemli bir sınırlama oluşturmaktadır. Farklı bir malzeme ya da ısıl işlem derinliği hedeflendiğinde, rezonans devresinde donanımsal değişiklikler yapılması zorunlu hale gelir. Bu durum hem ek maliyetlere yol açar hem de sistemin adaptasyon süresini uzatır (Rudnev vd., 2020). Literatürde bu sorunu aşmak için çeşitli yaklaşımlar önerilmiştir. Lucia ve arkadaşları, sabit frekanslı sistemlerin kontrol tekniklerini geliştirmeye odaklanırken, bu tür sistemler farklı uygulamalara uyum sağlamak için hala fiziksel müdahale gerektirmektedir (Lucia vd., 2015). Benzer şekilde, Choi ve arkadaşları, malzeme geçirgenliğine bağlı frekans adaptasyonu için derin öğrenme temelli bir çözüm sunmuş, ancak bu yöntem donanımsal yeniliklere ve karmaşık tasarımlara dayanmaktadır (Choi vd., 2018). Bu çalışmalar, indüksiyon ısıtma teknolojisinde verimliliği artırmış olsa da maliyet etkinliği ve kullanım kolaylığı açısından eksiklikler barındırmaktadır. Geleneksel sistemlerin bu sınırlamaları, daha esnek, ekonomik ve pratik bir kontrol yaklaşımına duyulan ihtiyacı açıkça ortaya koymaktadır.

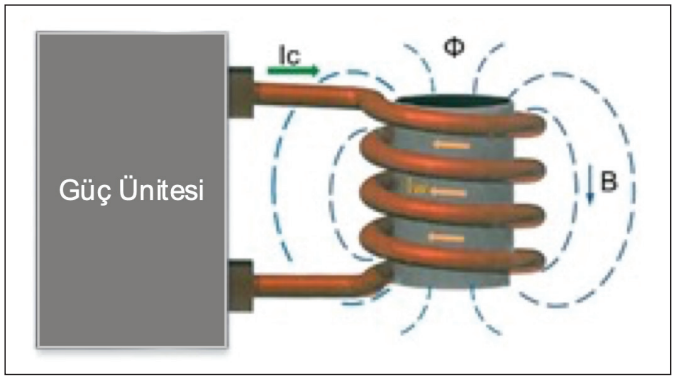
İndüksiyon ısıtma sistemlerinde frekans, akım ve gerilim kontrolüne yönelik literatürde farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Özellikle rezonans frekansının ayarlanması amacıyla değişken kapasitör veya endüktans kullanımı yaygın bir yöntem olup, bu yaklaşım donanımsal müdahale gerektirmektedir (Rudnev vd., 2020). Bunun yanı sıra, faz kaydırmalı kontrol teknikleri ve PWM tabanlı inverter kontrol yöntemleri ile frekans ve güç ayarı yapılabilmektedir (Lucia vd., 2019). Son yıllarda, yapay zeka ve model tabanlı kontrol yaklaşımları ile adaptif frekans ayarı üzerine çalışmalar da artmıştır (Choi vd., 2018; Peng vd., 2023). Ancak bu yöntemler genellikle ek sensörler, yüksek hesaplama gücü veya karmaşık donanım altyapısı gerektirmektedir. Bu durum, sistem maliyetini artırmakta ve küçük ölçekli uygulamalarda uygulanabilirliği sınırlandırmaktadır. Dolayısıyla, donanımsal değişiklik gerektirmeden, yazılım tabanlı ve düşük maliyetli bir kontrol yaklaşımına duyulan ihtiyaç literatürde açıkça görülmektedir.

Bu çalışmada, mikrodenetleyici ile optimize edilmiş bir indüksiyon ısıtma sistemi tasarımı önerilmiştir. Sistem, malzemenin fiziksel özellikleri ve ısıl işlem gereksinimlerine göre frekans, akım ve gerilim kontrolünü donanımsal değişiklik yapmadan gerçekleştirmeyi hedefler. Mikrodenetleyici tabanlı kontrol, yazılım yoluyla hızlı ve etkin bir optimizasyon sağlayarak geleneksel sistemlerin sabit yapılarından kaynaklanan zorlukları aşar. Kullanıcı arayüzü üzerinden uzaktan erişim imkanı sunan bu tasarım, endüstriyel uygulamalarda operasyonel verimliliği artırmayı ve işletme maliyetlerini düşürmeyi amaçlamaktadır. Çalışmanın temel yeniliği, rezonans ve osilatör devrelerini sabit tutarak farklı malzeme türleri ve işlem gereksinimleri için esnek bir çözüm sunmasıdır. Bu özellik, yüzey sertleştirme için yüksek frekanslı ısıtma veya tam ısıtma için düşük frekanslı uygulamalar gibi farklı senaryolarda sistemin etkinliğini korumasına olanak tanır (Esteve vd., 2024). Tasarım, Arduino mikrodenetleyicisi ile geliştirilmiş, COMSOL Multiphysics™'de manyetik akı yoğunluğu (B, Denklem 4) ve yüzey sıcaklığı (T) parametrelerini kullanarak simülasyonlarla doğrulanmış ve pratik bir deneysel çalışma ile test edilmiştir. Deneysel çalışma, 450 W çıkış gücüne sahip olup, deneysel sonuçları analiz edilmiştir. Makalede, sistemin teorik temelleri, tasarım süreci, simülasyon bulguları ve deneysel çalışma sonuçları detaylı bir şekilde ele alınmış, aynı zamanda literatürdeki benzer yaklaşımlarla karşılaştırması yapılmıştır. Önerilen sistem, indüksiyon ısıtma teknolojisinde pratik ve optimize bir alternatif sunarak endüstriyel süreçlerdeki mevcut zorluklara çözüm getirmeyi hedeflemektedir. Bu yönüyle önerilen sistem, literatürdeki donanım bağımlı çözümlerden ayrılarak yazılım tabanlı tam esneklik sağlayan nadir yaklaşımlardan biridir. Son yıllarda yazılım tabanlı frekans kontrolü ve adaptif sistemler üzerine çalışmalar artmıştır (Kawshty vd., 2023; Huang vd., 2024; Shami, 2025).

2. Gereç ve Yöntemler

2.1. Gereç

Bu çalışmada, mikrodenetleyici ile optimize edilmiş bir indüksiyon ısıtma sistemi tasarımı geliştirilmiştir. Sistem, malzeme özelliklerine ve ısıl işlem gereksinimlerine bağlı olarak frekans, akım ve gerilim kontrolünü donanımsal değişiklik olmadan gerçekleştirmek üzere tasarlanmıştır. Tasarlanan sistem, endüstriyel uygulamalarda esneklik ve verimlilik sağlamak amacıyla kullanıcı arayüzü üzerinden uzaktan erişim imkanı sunar. Bir indüksiyon ısıtma sistemi, ısıl işlem numunesi, indüksiyon bobini ve güç ünitesinden oluşur (Rudnev vd., 2020). İş parçası, Şekil 1'de gösterildiği gibi indüksiyon bobininin içine yerleştirilerek ısıtılır.



Şekil 1. İndüksiyon ısıtma prensip şeması.

Sistemin çalışması, Amper ve Faraday yasalarına dayanır. Faraday yasası, manyetik akının bobinde elektromotor kuvveti (EMK) indüklediğini ifade eder ve Denklem (1) ile tanımlanır.

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi_B}{dt} \tag{1}$$

Burada ε EMK'yı, N sarım sayısını ve Φ manyetik akıyı temsil eder. Manyetik akı, bobinden geçen akım ve sarım sayısıyla ilişkilidir ve Denklem (2) ile hesaplanır.

$$\Phi = \frac{NI}{\Re} \tag{2}$$

Relüktans ($\Re$) ise Denklem (3) ile malzemenin manyetik geçirgenliğine (μ), çekirdek uzunluğuna (l) ve kesit alanına (A) bağlı olarak bulunur.

$$\Re = \frac{l}{\mu A} \tag{3}$$

Manyetik akı yoğunluğu (B), birim alan başına akı olarak Denklem (4) ile tanımlanır.

$$B = \frac{\Phi}{A} \tag{4}$$

Manyetik alan kuvveti (H) ile ilişki Denklem (5) ile verilir.

$$B = \mu H \tag{5}$$

H, birim uzunluk başına akım olarak Denklem (6) ile hesaplanır.

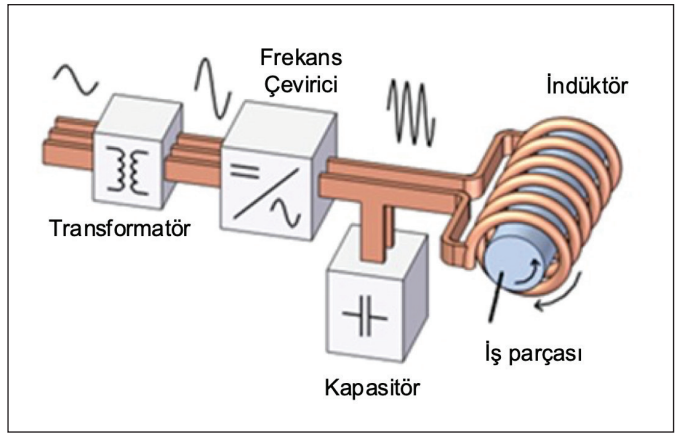
$$H = \frac{NI}{l} \tag{6}$$

Manyetik akı periyodik değiştiğinde, indüklenen maksimum voltaj Faraday yasasına göre Denklem (7) ile bulunur.

$$V_{max} = 2\pi f N \Phi_{max} \tag{7}$$

Burada f, frekanstır ($f=\omega/2\pi$), ω: Açısal frekans (rad/s) ifade etmektedir. Bu denklemler, sistem tasarımında frekans ve manyetik akının optimizasyonunun temel parametreler olduğunu gösterir (Esteve vd., 2024).

Güç ünitesi, Şekil 2'de modellenmiştir. Alternatif akım (AA) şebeke girişi, önce bir doğrultucu ile doğru akıma



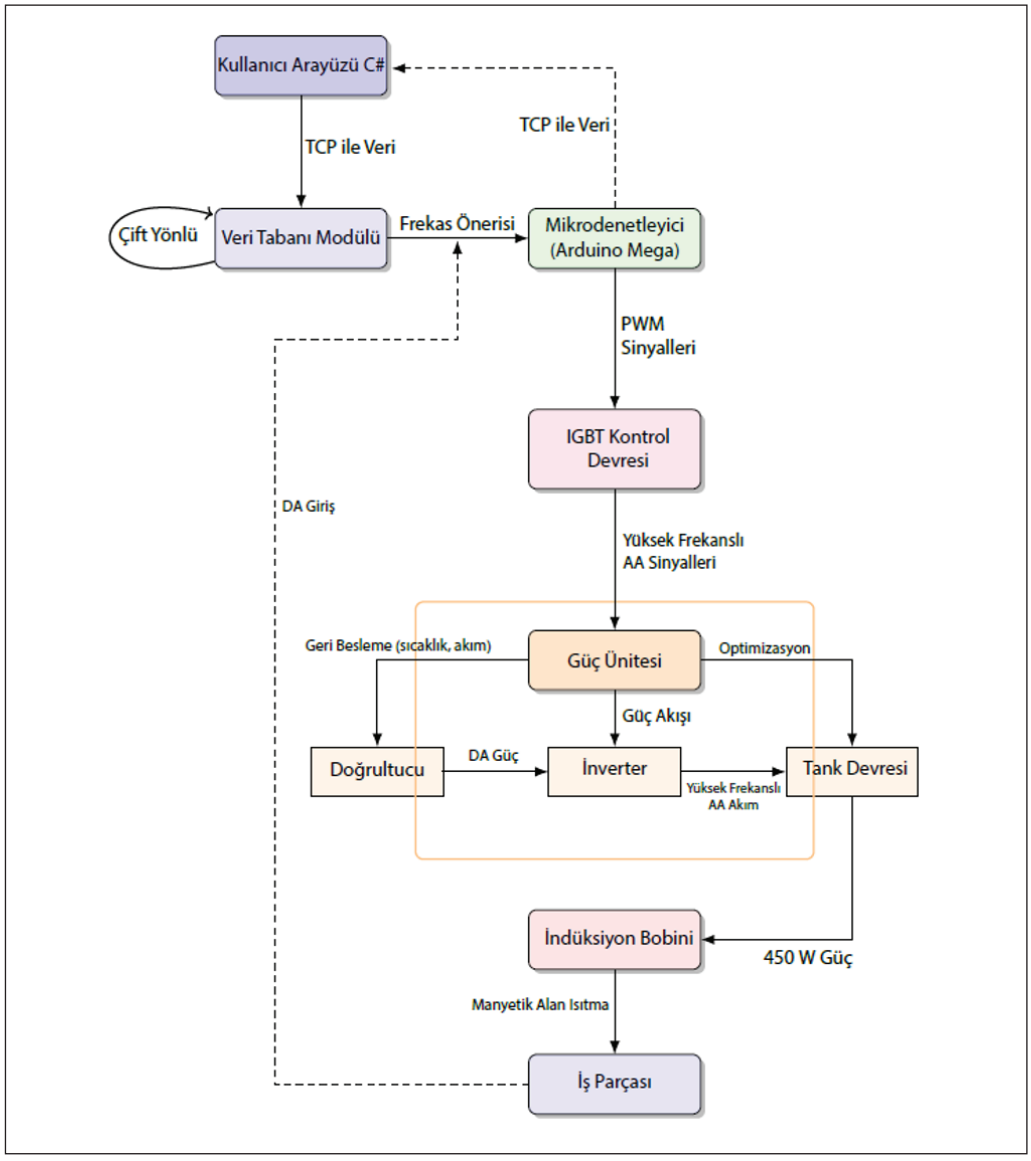
Şekil 2. Güç ünitesi ve tank devresi.

(DA) çevrilir. Ardından, yüksek frekanslı bir inverter aracılığıyla DA tekrar AA'ya dönüştürülerek indüksiyon bobinine uygun frekansta güç sağlanır. Tank devresi, rezonans frekansını optimize ederek enerji kaybını en aza indirir ve sistemin verimliliğini artırır.

2.2. Yöntemler

Geleneksel sistemlerde bu devre sabit frekanslı olduğundan, farklı uygulamalar için bileşen değişikliği gerektirir. Ancak, önerilen tasarımda mikrodenetleyici kontrolü bu sınırlamayı aşar (Lucia vd., 2015). AA girişi, doğrultucu (AA/DA) ile DA'ya çevrilir, ardından inverter (DA/AA) ile istenen frekansa ulaşılır. Tank devresi ise bobine enerji transferini optimize eder. Sistemin tasarımı, Şekil 3'te verilen akış diyagram ile görselleştirilmiştir.

Şekil 3. önerilen indüksiyon ısıtma sisteminin operasyonel akışını ve bileşenler arası etkileşimi göstermektedir. Kullanıcı arayüzü (C# tabanlı), malzeme özellikleri ve işlem hedeflerini TCP protokolü ile veri tabanına ve mikrodenetleyiciye (Arduino) iletir. Veri tabanı, Denklem (8) ile hesaplanan cilt derinliğine dayalı optimum frekans önerileri sunar. Mikrodenetleyici, %50 periyotta PWM sinyalleri üreterek IGBT H-köprü devresini kontrol eder. Güç ünitesi, doğrultucu, inverter ve tank devresi aracılığıyla 450 W yüksek frekanslı alternatif akım sağlar. İndüksiyon bobini, ısıl işlem numunesini ısıtırken, osiloskop ve termokupl ve optik yüzey termometresi ile ölçülen geri besleme verileri (bobin akımı, yüzey sıcaklığı) mikrodenetleyici üzerinden kullanıcı arayüzüne iletilir.



Şekil 3. Tasarım modeli akış diyagramı.

Bu diyagram, kullanıcı arayüzünden mikrodenetleyiciye, oradan IGBT kontrol devresine ve indüksiyon bobinine uzanan akışı gösterir. Tasarımın temel bileşeni, 16 MHz çalışma frekansına sahip Arduino mikrodenetleyicisidir. Mikrodenetleyici, frekans ve güç ayarını yazılım yoluyla kontrol eder. Ancak, çıkış akımı IGBT gate girişini doğrudan süremediğinden, bir motor sürücü shield ile desteklenmiştir. Kontrol devresi, dört adet IXXK100N60C3H1 IGBT kullanılarak H-köprü bağlantısıyla tasarlanmıştır ve maksimum 450 W çıkış gücü (48 V, 10 A) sağlayacak şekilde optimize edilmiştir (Żelazny vd., 2021).

Güç ünitesi, 220V/50Hz AA girişini KBPC5010 bridge diyot ile doğrultarak 48V DA'ya dönüştürür (filtre kapasitörü: 4700 µF/100V). Inverter aşaması, IXXK100N60C3H1 IGBT'ler ile H-köprü konfigürasyonunda çalışır ve IR2110 gate driver IC ile Arduino'dan PWM sinyalleri alır (gate direnci: 10Ω). Tank devresi, seri LC rezonans yapısındadır: L = 10 µH (indüksiyon bobini: 10 sarım, 5 mm Cu tel), C = 0.1 µF/600V. Bu değerler, 2-400 kHz frekans aralığı için optimize edilmiştir.

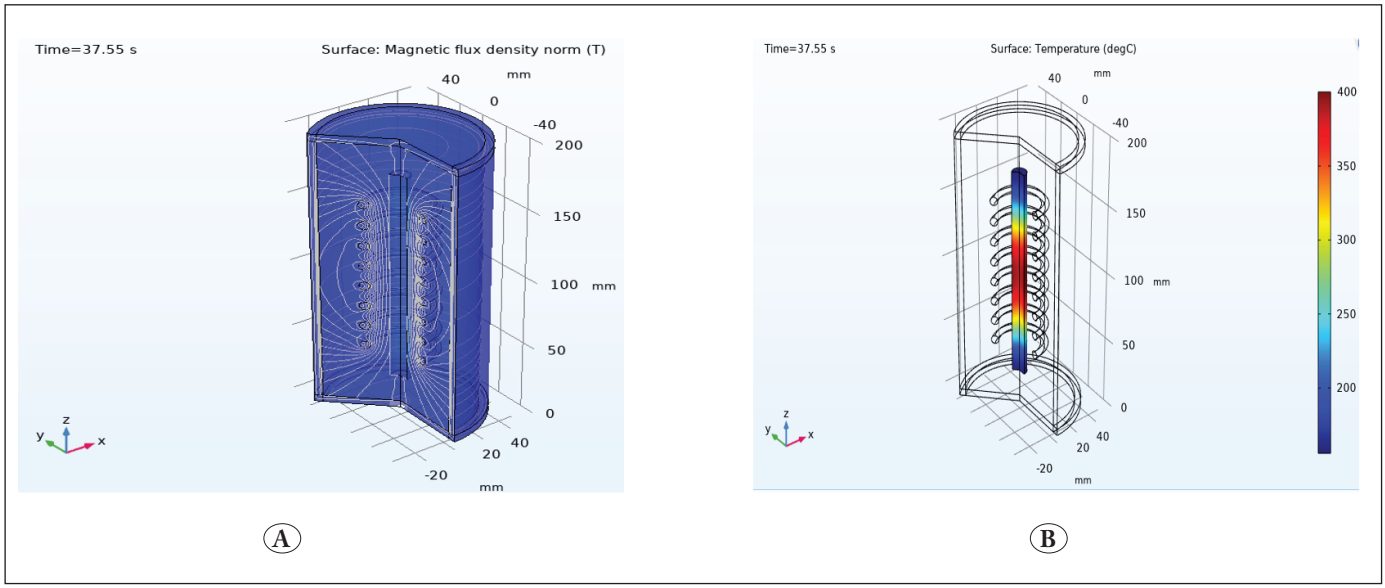
Kullanıcı arayüzü, C# programlama diliyle geliştirilmiş ve malzemenin cilt derinliğine göre frekans seçimi bir veri tabanı üzerinden yapılmıştır. Cilt derinliği, frekansla ters orantılıdır ve Denklem (8) ile hesaplanır.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \tag{8}$$

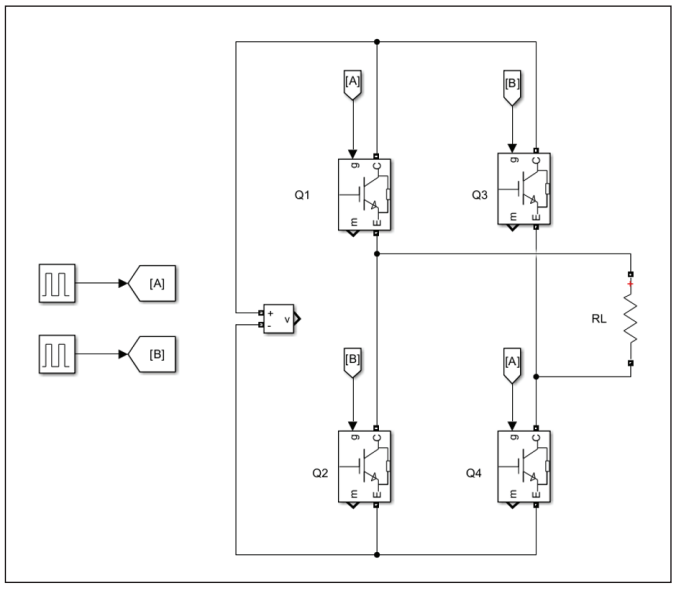
Burada δ cilt derinliği, ρ elektriksel direnç, f frekans ve μ manyetik geçirgenliktir. Bu parametre, yüzey sertleştirme veya tam ısıtma gibi farklı işlemlerde optimizasyon için kritik öneme sahiptir (Pleshivtseva vd., 2017). Veri tabanı, simülasyonlarla doğrulanmış ve COMSOL Multiphysics™ yazılımında elde edilen manyetik akı yoğunluğu ve sıcaklık dağılımı sonuçları Şekil 4 kullanılarak oluşturulmuştur.

Simülasyon sonuçları, tasarımın teorik doğruluğunu desteklemiştir. Deneysel çalışma, sistemin pratik uygulanabilirliğini test etmek için geliştirilmiştir ve devre şeması Şekil 5'te, fiziksel görünümü Şekil 8'de gösterilmiştir. Deneysel düzenek, Arduino mikrodenetleyicisi, IGBT tabanlı H-köprü devresi ve 10 cm uzunluğunda bir indüksiyon bobini kullanılarak kurulmuştur. Şekil 8, deneysel çalışmanın fiziksel görünümünü göstermektedir. Ölçümler, bir osiloskop, bir termokupl ve bir optik yüzey termometresi ile gerçekleştirilmiş; ısıl işlem numunesi olarak 50 mm çaplı bir çelik silindir tercih edilmiştir. Bu düzenek, sistemin endüstriyel koşullarda uygulanabilirliğini test etmek için tasarlanmıştır.

Veri tabanı, COMSOL Multiphysics™ simülasyonları (Şekil 4) ve Denklem (8) kullanılarak oluşturulmuştur. 50 farklı malzeme-işlem kombinasyonu için önceden hesaplanmış veriler içermektedir (örneğin, çelik için ρ=1.7×10^{-8} Ωm, µ=1000). Veri tabanı, C# ile entegre edilmiş SQLite veritabanıdır ve kullanıcı arayüzünden sorgulanır. Algoritma, kullanıcı arayüzünden alınan parametreler (malzeme tipi, hedef cilt derinliği, işlem süresi) ile veri tabanından frekans önerisi çeker.



Şekil 4. (a) Manyetik akı yoğunluğu, (b) Yüzey sıcaklığı.



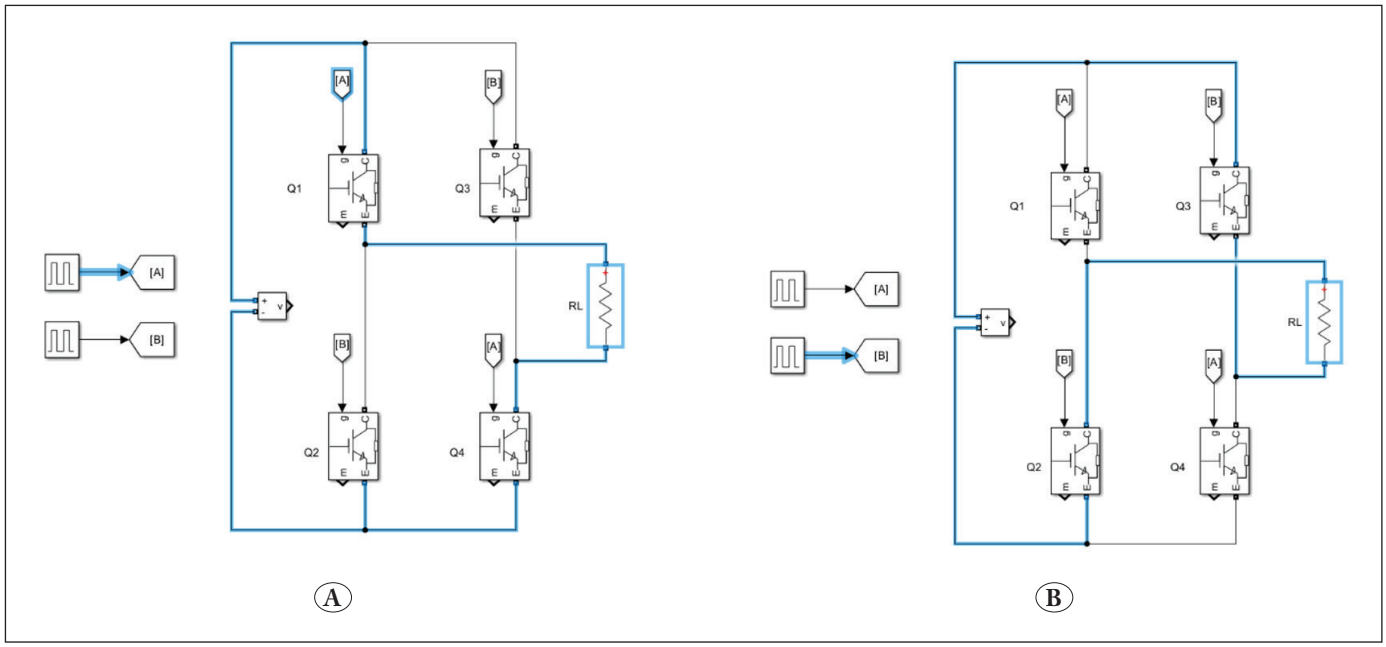
Şekil 5. Deneysel çalışma açık devre şeması.

Deneysel çalışma, Arduino, IGBT kontrol devresi ve indüksiyon bobininden oluşur. Tetikleme sinyalleri, H-köprü devresinde sırayla uygulanarak istenen frekansı üretir. Bu sinyaller, mikrodenetleyici tarafından %50 anahtarlama periyotlarında kontrol edilir.

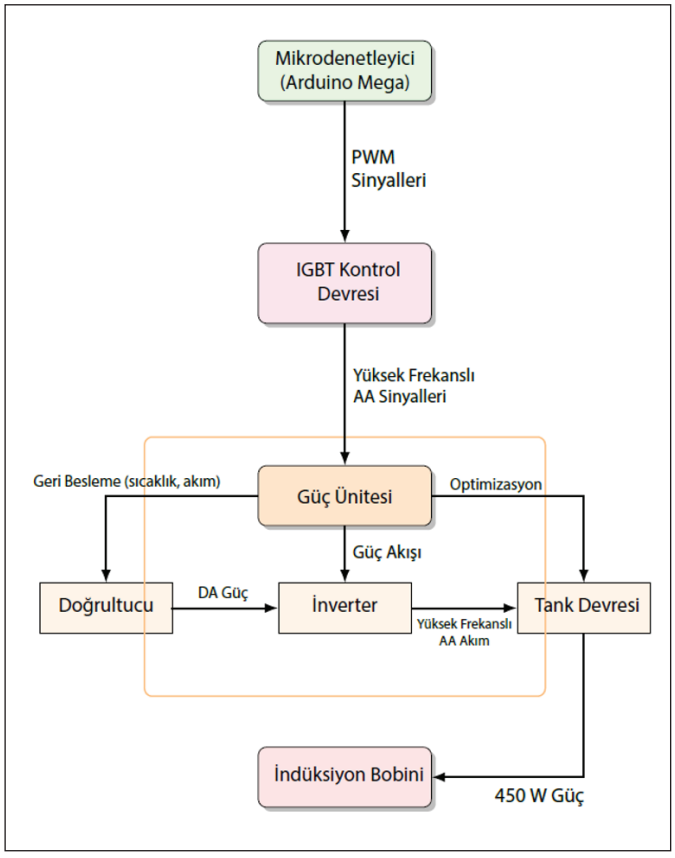
Şekil 6'da verilen pozitif ve negatif tetikleme sinyalleri, H-köprü inverter yapısında kullanılan IGBT anahtarlarının alternatif olarak iletime geçirilmesini sağlamaktadır. Pozitif tetikleme sırasında akım bobinden bir yönde akarken, negatif tetikleme ile akım yönü tersine çevrilmektedir. Bu anahtarlama yapısı sayesinde indüksiyon bobininde alternatif manyetik alan oluşturularak girdap akımları üretilmekte ve ısıtma işlemi gerçekleştirilmektedir. Tetikleme sinyallerinin simetrik ve %50 görev döngüsünde uygulanması, sistemin kararlı çalışması açısından kritik öneme sahiptir. Tasarım süreci, MATLAB Simulink™ ile benzetim yapılarak optimize edilmiştir. Bobin akımı ile gerilim dalga biçimleri incelenmiştir. Sistem, farklı frekans aralıklarında (2-5 kHz tam ısıtma) etkin bir şekilde çalışacak şekilde ayarlanmıştır (Rudnev vd., 2014).

Deneysel düzenekte güç akışı, şebeke AC girişinden doğrultma katına, ardından DC–DC düşürücü/DC barasına ve IGBT tabanlı H-köprü inverter katına aktarılmakta ve indüksiyon bobini beslenmektedir. Arduino tabanlı kontrol birimi PWM sinyalleri üretmekte ve IR2110 gate sürücü devresi üzerinden H-köprü anahtarlaması gerçekleştirilmektedir. Yüksek akım yolu DC barası, güç iletkenleri ve bobin bağlantıları boyunca tanımlanmış olup, blok diyagram bu güç ve kontrol akışını bütüncül biçimde özetlemektedir.

Optimizasyon süreci, malzeme türüne ve işlem hedefine göre frekans seçimini otomatikleştiren bir yazılım algoritmasına dayanır. Geleneksel sistemlerde donanım odaklı çözümler kullanılırken, bu çalışmada yazılım tabanlı kontrol tercih edilerek maliyet ve zaman tasarrufu sağlanmıştır. Literatürde derin öğrenme ile frekans adaptasyonu önerilmişse de bu



Şekil 6. (a) Pozitif tetikleme, (b) Negatif tetikleme.



Şekil 7. Güç katı akış diyagramı.

yöntemler ek donanım gerektirir (Choi vd., 2018). Önerilen sistem ise mevcut bileşenlerle optimizasyonu mümkün kılar. Tasarımın uzaktan kontrol özelliği, TCP protokolü ile mikrodenetleyiciye veri aktarımı sağlayarak endüstriyel uygulamalarda kullanım kolaylığı sunar (Aflyatunov vd., 2022).

Bu yöntem, indüksiyon ısıtma sisteminin temel bileşenlerini korurken, mikrodenetleyici ile optimizasyon yaparak esneklik ve verimlilik sağlar. Sistem, teorik hesaplamalar, simülasyonlar ve deneysel çalışma testleriyle doğrulanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, mikrodenetleyici ile optimize edilmiş bir indüksiyon ısıtma sisteminin tasarımı ve performansı detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Sistem, malzeme özelliklerine ve ısıl işlem hedeflerine bağlı olarak frekans, akım ve gerilim kontrolünü donanımsal değişiklik gerektirmeden sağlayarak endüstriyel uygulamalarda esneklik ve verimlilik sunmuştur. Bulgular, COMSOL Multiphysics™ simülasyonları ve 450 W çıkış gücüne sahip bir deneysel çalışma ile doğrulanmış, elde edilen sonuçlar literatürdeki benzer çalışmalarla kapsamlı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Bu bölümde, sistemin optimizasyon süreci, pratik sonuçları ve literatüre katkısı ele alınmaktadır.

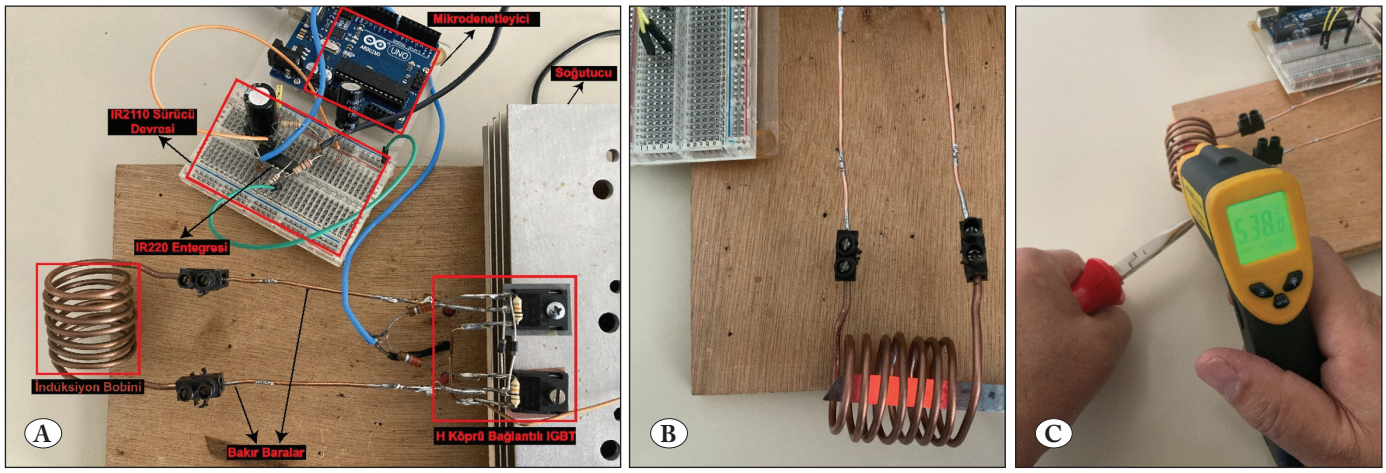
İndüksiyon ısıtma sistemlerinin performansı, malzemenin ısıl iletkenliği, geometrisi ve elektriksel özellikleri gibi faktörlerden etkilenir. Geleneksel sistemlerde, bu değişkenlere uyum sağlamak için tank devresinde fiziksel müdahaleler (örneğin, kapasitör veya indüktör bileşenlerinin değiştirilmesi) yapılması zorunludur (Rudnev vd., 2014). Önerilen sistem, mikrodenetleyici tabanlı kontrol ile bu sınırlamayı aşmış ve frekans seçimini yazılım algoritmalarıyla optimize etmiştir. Tam ısıtma için 50-80 mm çaplı iş parçalarında 2-5 kHz frekans aralığı gerektiğinde, sistem bu ayarlamaları hızlı bir şekilde donanım değişimi olmadan gerçekleştirir (Żelazny vd., 2021). Bu özellik, farklı malzeme türleri ve işlem amaçları için etkin bir adaptasyon kapasitesi sağlar.

Simülasyonlar, sistemin teorik temellerini değerlendirmek amacıyla COMSOL Multiphysics™ yazılımında yürütülmüştür. Şekil 4-(a), manyetik akı yoğunluğunu, Şekil 4-(b) ise yüzey sıcaklık dağılımını göstermektedir. 200 kHz frekansta çelik bir ısıl işlem numunesinde yapılan analiz, yüzeyde homojen bir sıcaklık artışı ve manyetik akının bobin çevresinde etkin bir dağılım sergilediğini göstermiştir. Bu sonuçlar, cilt derinliği denklemi denklem 8 ile tutarlıdır. Simülasyonlar, yüksek frekanslarda (200-400 kHz) yüzeysel ısıtma, düşük frekanslarda (2-5 kHz) ise daha derin penetrasyon sağlandığını kanıtlamıştır.

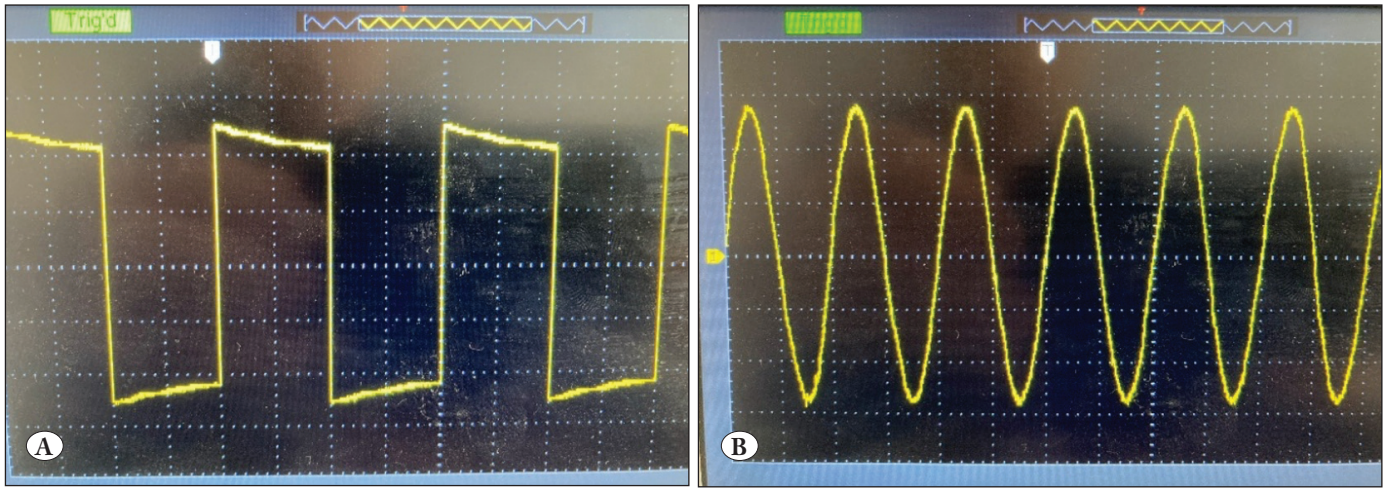
Deneysel çalışma testleri, sistemin pratik uygulanabilirliğini analiz etmek için gerçekleştirilmiştir. Şekil 8'de gösterilen deneysel çalışma devresi, Arduino ve IGBT tabanlı H-köprü devresi ile 450 W çıkış gücüne ulaşmıştır. Deneysel çalışmada, bobin akımı ve gerilim dalga şekilleri osiloskop ile ölçülerek sistemin performansı analiz edilmiştir.

Tetikleme sinyalleri, Şekil 6'da pozitif ve negatif döngülerle uygulanmıştır. Testlerde, 50 mm çaplı bir çelik ısıl işlem numunesinde 5 kHz frekans uygulanmış ve ölçülen yüzey sıcaklığı ortalama 540°C'ye ulaşmıştır. Bu sonuç, simülasyonlarla uyumlu olup, sistemin farklı frekans aralıklarında (15-300 kHz) stabil çalıştığını ve lehimleme gibi işlemlerde etkin olduğunu göstermiştir.

Deneysel çalışmanın işletim karakteristiklerini göstermek amacıyla, H-köprü inverterde kullanılan IGBT'lere uygulanan kapı tetikleme sinyalleri ile indüksiyon bobini üzerinden geçen akımın zamana bağlı ölçümleri osiloskop ile kaydedilmiştir. Bu ölçümler, anahtarlama düzeninin ve yüksek akım seviyelerinde sistem davranışının anlaşılmasına imkân sağlamaktadır. Şekil 9(a)'da IGBT kapı tetikleme sinyalleri, Şekil 9(b)'de ise indüksiyon bobini akımı sunulmaktadır.



Şekil 8. Deneysel çalışma devresi (5 KHz) (a) Genel görünüm, (b) Metal parça ısıtıldığında, (c) Metalin ulaştığı sıcaklık.



Şekil 9. (a) IGBT'lere uygulanan tetikleme sinyalleri, (b) İndüksiyon bobini üzerinden geçen akım.

Optimizasyon süreci, malzeme türüne ve işlem hedefine göre frekans seçimini otomatikleştiren bir veri tabanına dayanır. Geleneksel sistemlerde bu ayarlamalar manuel müdahale veya donanım değişimiyle yapılırken, önerilen tasarımda C# tabanlı kullanıcı arayüzü bu süreci basitleştirir. 1-2 mm sertleştirme derinliği için 60-200 kHz frekans aralığı seçildiğinde, sistem IGBT tetikleme sinyallerini otomatik olarak düzenler. Böylelikle işletme süresini kısaltır ve hata riskini minimize eder (Pleshivtseva vd., 2017). MATLAB Simulink™ ile yapılan benzetimler, akım ve gerilim dalga biçimlerinin stabilitesini doğrulamış ve sistemin enerji verimliliğini artırdığını ortaya koymuştur.

Önerilen sistem, literatürdeki çalışmalarla karşılaştırıldığında özgün katkısını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Choi ve arkadaşları (2018), derin öğrenme ile frekans adaptasyonu önermiş, ancak bu yaklaşım yüksek hesaplama gücü ve ek donanım gerektirerek küçük ölçekli işletmeler için maliyeti artırmaktadır. Benzer şekilde, Lucia ve arkadaşları (2015), sabit frekanslı sistemlerin kontrolünü geliştirmiş, fakat farklı malzeme ve işlemlere uyum için donanım değişikliği zorunluluğu esneklik açısından dezavantaj oluşturmuştur (Lucia vd., 2015; Choi vd., 2018). Esteve ve arkadaşları (2024) hibrit kontrol ile uzaktan erişim sunmuş, Chakrabarti ve arkadaşları (2023) uzaktan izleme sağlamış, ancak sırasıyla donanımsal uyarlama ihtiyacı ve frekans esnekliği eksikliği devam etmiştir (Rudnev vd., 2020; Esteve vd., 2024; Chakrabarti vd., 2023). Demidovich ve arkadaşları elektromanyetik analizlere odaklanırken pratik kontrolü ihmal etmiş, Siesing ve arkadaşları maliyet etkinliği hedeflese de kısmi yazılım kontrolü ve donanım bağımlılığı sınırlılık yaratmış, Peng ve arkadaşları ise malzeme spesifik optimizasyonla genel uygulanabilirlikte yetersiz kalmıştır (Demidovich vd., 2015; Lucia vd., 2019; Peng vd., 2023) Buna karşılık, öneri-

len sistem, mevcut bir mikrodenetleyici ile çalışarak hesaplama yükünü ortadan kaldıran, yazılım tabanlı tam kontrol ve uzaktan erişimle esneklik sunan bir tasarım olarak literatüre temel katkıda bulunmaktadır. Çizelge 1, bu sistemi literatürdeki farklı yaklaşımlarla karşılaştırmaktadır.

Enerji verimliliği, sistemin bir diğer önemli avantajıdır. Şekil 2'de gösterilen güç ünitesi, AA girişini DA'ya çeviren doğrultucu ve ardından DA'yı yüksek frekanslı AA'ya dönüştüren inverter ile çalışır. Tank devresi, rezonans frekansını optimize ederek enerji kayıplarını en aza indirir. Simülasyonlarda, 450 W güçte %90'ın üzerinde verim elde edilmiş, bu da endüstriyel standartlarla rekabet edebilir bir seviye sunmuştur.

Deneysel sonuçlar, sistemin farklı frekans aralıklarında ve işlem türlerinde performansını değerlendirmek amacıyla termokupl, optik yüzey termometresi ve osiloskop ile ölçülmüştür. Çizelge 2, tam ısıtma ve lehimleme testlerinden elde edilen temel sonuçları özetlemektedir. Ölçümler, ±5°C sıcaklık hata payı ve %2 verim sapması ile gerçekleştirilmiştir. Bu sonuçlar, COMSOL Multiphysics™ simülasyonlarıyla yüksek derecede uyum göstermiş ve sistemin endüstriyel uygulamalarda rekabet edebilirliğini kanıtlamıştır. Deneysel çalışma sonuçları, sistemin farklı işlem türlerindeki performansını da kanıtlamıştır. 20-30 mm çaplı bir ısıl işlem numunesinde 15-30 kHz frekansla tam ısıtma gerçekleştirildiğinde, sıcaklık dağılımı homojen olmuş ve cilt derinliği denkleminin pratikteki geçerliliği doğrulanmıştır. Bu bulgular, sistemin çok yönlü endüstriyel uygulamalarda kullanılabileceğini gösterir.

Simülasyon sonuçlarının deneysel bulgularla uyumunu nicel olarak değerlendirmek amacıyla, farklı işlem türleri ve frekans değerleri için elde edilen yüzey sıcaklıkları karşılaştırılmıştır. COMSOL Multiphysics™ tabanlı elektromanyetik–ısıl simülasyonlardan elde edilen sonuçlar ile deneysel ölçümler arasındaki farklar, yüzdesel hata analizi ile değerlendirilmiş ve Çizelge 3'te sunulmuştur. Bu karşılaştırma,

Çizelge 1. Literatür karşılaştırması.

Çalışma	Frekans Kontrolü	Donanım Değişikliği	Uzaktan Kontrol	Maliyet Etkinliği	Uygulama Alanı
Lucia vd., (2019)	Sabit frekans	Gerekli	Yok	Orta	Endüstriyel sertleştirme
Choi vd., (2018)	Derin öğrenme	Gerekli	Yok	Düşük	Yüzey sertleştirme
Esteve vd., (2024)	Hibrit kontrol	Gerekli	Var	Orta	Çoklu işlem
Chakrabarti vd., (2022)	Sabit frekans	Gerekli	Var	Orta	Uzaktan izleme
Demidovich vd., (2021)	Manuel ayar	Gerekli	Yok	Düşük	Elektromanyetik analiz
Siesing vd., (2018)	Yazılım tabanlı (kısmi)	Gerekli	Yok	Yüksek	Maliyet odaklı ısıtma
Peng vd., (2023)	Malzeme spesifik	Gerekli	Yok	Orta	Özel malzemeler
Bu Çalışma	Yazılım tabanlı	Gerekli değil	Var	Yüksek	Çok yönlü endüstriyel

Çizelge 2. Deneysel çalışma sonuçları.

İşlem Türü	Malzeme	Frekans (kHz)	Cilt Derinliği (mm)	Yüzey Sıcaklığı (°C)	Ölçüm Süresi (sn)	Giriş Gücü (W)	Bobin Akımı (A)	Verim (%)	Hata Payı
Tam Isıtma	Çelik	5	50	540 ± 5	40	450	9,5	90	±2%
Lehimleme	Bakır	100	2	450 ± 5	60	450	9,0	89	±2%
Eritme (Simülasyon)	Çelik	20	10	1200 ± 10	180	450	13,0	93	±1% (Simülasyon)

Çizelge 3. Simülasyon ve deneysel sonuçların nicel karşılaştırması.

İşlem Türü	Malzeme	Frekans (kHz)	Simülasyon Sıcaklığı (°C)	Deneysel Sıcaklık (°C)	Mutlak Fark (°C)	Yüzdesel Hata (%)
Tam Isıtma	Çelik	5	555	540	15	2.70
Lehimleme	Bakır	100	465	450	15	3.23

önerilen sistemin teorik modelleme ile pratik uygulama arasındaki tutarlılığını ortaya koymaktadır.

Uzaktan kontrol özelliği, TCP protokolü ile mikrodenetleyiciye veri aktarımı sağlayarak operasyonel esnekliği artırır. Geleneksel sistemlerde bu tür bir erişim bulunmazken, önerilen tasarımda kullanıcı arayüzü üzerinden anlık ayarlamalar yapılabilir. Testlerde, frekans artışı ile voltajın yükseldiği gözlemlenmiş, bu da frekans kontrolünün etkinliğini doğrulamıştır. Manyetik akı yoğunluğu hesaplanmış ve Şekil 4-(a)'daki dağılımla uyumlu bulunmuştur. Maliyet etkinliği, sistemin öne çıkan bir diğer yönüdür. Derin öğrenme veya hibrit sistemler ek donanım maliyeti getirirken, bu tasarım Arduino gibi yaygın bir mikrodenetleyici ile çalışır. Bu, özellikle küçük ve orta ölçekli işletmeler için avantaj sağlar. Ancak, sistemin sınırları da göz ardı edilmemelidir. 450 W ile test edilmiş olan deneysel çalışma, 2 kW üzeri uygulamalarda yeniden değerlendirilmelidir. Ayrıca, alüminyum veya bakır gibi farklı malzemelerle optimizasyonun daha fazla test edilmesi gereklidir. Sonuç olarak, bu sistem, indüksiyon ısıtma teknolojisinde yenilikçi bir çözüm sunar. Donanımsal değişiklik gerektirmemesi, uzaktan kontrol imkanı ve yüksek verimliliği ile literatürdeki yaklaşımlardan ayrılır. Gelecekte, çoklu indüksiyon kontrolü ve farklı malzemelerle testler planlanmaktadır.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, mikrodenetleyici ile optimize edilmiş bir indüksiyon ısıtma sistemi tasarlanmış ve uygulanabilirliği başarılı bir şekilde ortaya konmuştur. Sistem, malzeme özelliklerine ve ısıl işlem gereksinimlerine bağlı olarak frekans, akım ve gerilim kontrolünü donanımsal değişiklik gerektirmeden sağlamış. Böylece esneklik, maliyet etkinliği ve operasyonel verimlilik sunmuştur. Tasarım, Arduino mikrodenetleyicisi ve IGBT tabanlı H-köprü devresi ile geliştirilmiş, yazılım tabanlı kontrol ve uzaktan erişim imkanı ile geleneksel sistemlerin sabit frekanslı yapılarından kaynaklanan sınırlamaları aşmayı başarmıştır. Çalışmanın temel amacı olan farklı işlem türlerine hızlı adaptasyon hedefi, 450 W çıkış gücüne sahip deneysel çalışma ile doğrulanmıştır.

Elde edilen sonuçlar, tam ısıtma ve lehimleme gibi çeşitli işlemlerde etkin olduğunu göstermiş, enerji verimliliğinin %90'ın üzerinde olmasıyla endüstriyel uygulamalara uygunluğu kanıtlanmıştır. Gelecekte, alüminyum ve bakır gibi düşük manyetik geçirgenlikli malzemelerle 2 kW üzeri güç seviyelerinde testler planlanmaktadır. Ayrıca, aynı anda iki indüksiyon bobinini kontrol eden bir multi-indüksiyon sistemi geliştirilerek sistemin çoklu işlem kapasitesi artırılacaktır. Bu çalışmalar, önerilen sistemin daha geniş endüstriyel uygulamalara adaptasyonunu sağlayacak ve enerji verimliliğini optimize etmeye yönelik gerçek zamanlı kontrol algoritmaları ile desteklenecektir. Gelecekteki çalışmalarda, önerilen sistem üzerine adaptif ve geri beslemeli kontrol algoritmalarının entegre edilmesi ve sistem performansına etkilerinin detaylı olarak incelenmesi planlanmaktadır.

Teşekkür: Bu çalışma, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) tarafından STMYO-2025-008 proje numarası ile desteklenmiştir.

Yazar katkısı: Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Etik kurul onayı: Etik kurul izni gerektirmeyen bir çalışma olup, herhangi bir kurumdan etik kurul izni alınmamıştır.

Kaynaklar

Aflyatunov, R. R., Khazieva, R. T., & Vasilyev, P. I. (2022). Development and research of an induction heating system for a long pipeline. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2182, No. 1, p. 012039). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2182/1/012039

Chakrabarti, A., Sadhu, P. K., & Pal, P. (2023). AWS IoT Core and Amazon DeepAR based predictive real-time monitoring framework for industrial induction heating systems. *Micfrosystem Technologies*, *29*(4), 441-456. https://doi.org/10.1007/s00542-022-05311-x

Choi, J. K., Park, K. S., & Lee, S. S. (2018). Prediction of high-frequency induction hardening depth of an AISI 1045 specimen by finite element analysis and experiments. *International journal of precision engineering and manufacturing*, *19*, 1821-1827. https://doi.org/10.1007/s12541-018-0210-0

Demidovich, V. B., Chmilenko, F. V., Andrushkevich, V. V., & Rastvorova, I. I. (2015). 3D-simulation of electromagnetic and temperature fields in the continuous induction heaters. In *COUPLED VI: proceedings of the VI International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering* (pp. 976-984). CIMNE.

Esteve, V., Bellido, J. L., & Jordán, J. (2024). State of the art and future trends in monitoring for industrial induction heating applications. *Electronics*, *13*(13), 2591. https://doi.org/10.3390/electronics13132591

Huang, H., Kong, Y., Chen, J., Jian, W., Sun, F., Sui, J., & Cheng, S. (2024). Research on a New Inverter Control Strategy of Induction Heating Power Supply. *Electronics*, *13*(17), 3469. https://doi.org/10.3390/electronics13173469

Kawshty, H. H., Sayed, K., & Elnozahy, A. (2023). Design and analysis of high frequency inverter for induction heating application. In *2023 24th International Middle East Power System Conference (MEPCON)* (pp. 1-8). IEEE. https://doi.org/

Lucia, O., Navarro, D., Guillén, P., Sarnago, H., & Lucia, S. (2019). Deep learning-based magnetic coupling detection for advanced induction heating appliances. *IEEE access*, *7*, 181668-181677. https://doi.org/ 10.1109/ACCESS.2019.2960109

Lucia, O., Sarnago, H., & Burdio, J. M. (2015). Soft-stop optimal trajectory control for improved performance of the series-resonant multiinverter for domestic induction heating applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *62*(10), 6251-6259. https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2417132

Peng, Y., Wang, Y., Li, Y., Wang, Y., & Lu, J. (2023). A Review of Optimization Methods for Temperature Uniformity of Transverse Flux Induction Heating. In 2023 10th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEEA) (pp. 403-407). IEEE. https://doi.org/10.1109/IFEEA60725.2023.10429680

Pleshivtseva, Y., Rapoport, E., Nacke, B., Nikanorov, A., Di Barba, P., Forzan, M., ... & Sieni, E. (2017). Design concepts of induction mass heating technology based on multiple-criteria optimization. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, *36*(2), 386-400. https://doi.org/10.1108/COMPEL-05-2016-0216

Rudnev, V., Fett, G. A., Griebel, A., & Tartaglia, J. (2014). Principles of induction hardening and inspection. In Induction Heating and Heat Treatment (pp. 58-86). ASM International. https://doi.org/10.31399/asm.hb.v04c.a0005863

Rudnev, V., Loveless, D., & Cook, R. (2020). Handbook of induction heating (2nd ed.). CRC Press.

Shami, U. T., Shami, T. A., Murtaza, A. F., & Alsafrani, A. (2025). Dynamic resonant frequency tracking and synchronization for induction heating using half-cycle measurement algorithm. *Energy Reports, 14*, 3403-3418. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.10.032

Siesing, L., Lundström, F., Frogner, K., Cedell, T., & Andersson, M. (2018). Towards energy efficient heating in industrial processes-Three steps to achieve maximized efficiency in an induction heating system. *Procedia Manufacturing*, *25*, 404-411. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.110

Um, D. Y., Kim, M. J., Chae, S. A., & Park, G. S. (2024). Investigation of dual coil induction heating for enhanced temperature distribution optimization. *IEEE Access*, *12,* 37129-37140. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3373784

Żelazny, R., Jabłoński, P., & Szczegielniak, T. (2021). Operation of the prototype device for induction heating of railway turnouts at various operating frequencies. *Energies*, *14(2),* 476. https://doi.org/10.3390/en14020476

Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi
Dergi web sayfası: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen
DOI: 10.7212/karaelmasfen.1943170

Araştırma Makalesi
Geliş tarihi / Received : 03.05.2026
Kabul tarihi / Accepted : 04.06.2026

Karacaören II Baraj Gölü (Türkiye)'nde Fizikokimyasal Parametrelerin ve Su Kalite İndeksinin (WQI) Mevsimsel Değişimi

Seasonal Variations of Physicochemical Parameters and Water Quality Index (WQI) in Karacaören II Dam Lake (Türkiye)

Selda Tekin-Özan*

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Isparta, Türkiye

Öz

Karacaören II Baraj Gölü Türkiye'nin güneybatısında yer almaktadır. Nisan 2023 ve Ocak 2024 arasında mevsimsel olarak yapılan bu çalışmada Karacaören II Baraj Gölü'nün su kalitesinin Su Kalite İndeksi (WQI) ve bazı istatistiksel yöntemler kullanılarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Gölden alınan su örneklerinde sıcaklık, pH, elektriksel iletkenlik, çözünmüş oksijen, oksijen doygunluğu, biyokimyasal oksijen ihtiyacı, klorür, sülfat, orto-fosfat fosforu, amonyum azotu ve nitrat azotu değerleri ölçülmüştür. Sonuçların değerlendirilmesi için WQI, Pearson Korelasyon Analizi ve Duncan Çoklu Karşılaştırma Testi yapılmıştır. Sonuçlar ulusal ve uluslararası kuruluşlar tarafından verilen içme suyu ve su kalitesi standart değerleri ile kıyaslanmış ve göl suyunun kalite sınıfları belirlenmiştir. Göl suyu, su sıcaklığı, pH, biyokimyasal oksijen ihtiyacı, klorür, sülfat ve elektriksel iletkenlik değerlerine göre tüm mevsimlerde I. kalite sınıfında yer almıştır. Oksijen doygunluğu değerlerine göre yaz mevsiminde III. kalite, diğer mevsimlerde ise II. kalite sınıfında olduğu belirlenmiştir. Nitrat azotu konsantrasyonlarına göre kış mevsiminde II. kalite, diğer mevsimlerde ise I. kalite sınıfında yer alırken, çözünmüş oksijen düzeyleri tüm mevsimlerde II. kalite su sınıfını göstermiştir. Göl suyunda ölçülen fizikokimyasal parametrelerin Avrupa Birliği (EU), Çevre Koruma Ajansı (EPA), Dünya Sağlık Örgütü (WHO), Türk Standardları Enstitüsü (TSE)'nün belirlediği içme suyu standartlarına göre kabul edilebilir değerler içerisinde olduğu belirlenmiştir. WQI sonuçlarına göre göl suyunun mükemmel su sınıfında yer aldığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İçme suyu standartları, limnoloji, Pearson korelasyon analizi, su kalite sınıflandırması, tatlı su ekosistemi

Abstract

Karacaören II Dam Lake is located in southwestern Türkiye. This study, conducted seasonally between April 2023 and January 2024, aimed to determine the water quality of Karacaören II Dam Lake using the Water Quality Index (WQI) and some statistical analyses. In the water samples collected from the lake, temperature, pH, electrical conductivity, dissolved oxygen, oxygen saturation, biochemical oxygen demand, chloride, sulfate, orthophosphate phosphorus, ammonium nitrogen, and nitrate nitrogen values were measured. In order to evaluate the results, WQI, Pearson Correlation Analysis, and Duncan Multiple Comparison Test were performed. The results were compared with drinking water and water quality standard values established by national and international organizations, and the quality classes of the lake water were determined. The lake water was classified as Class I in all seasons based on water temperature, pH, biochemical oxygen demand, chloride, sulfate, and electrical conductivity values. According to oxygen saturation values, it was classified as Class III in summer and Class II in the other seasons. Based on nitrate nitrogen concentrations, the water was classified as Class II in winter and Class I in the remaining seasons, while dissolved oxygen levels indicated Class II water quality in all seasons. The physicochemical parameters measured in the lake water were within acceptable limits according to the drinking water standards specified by the European Union (EU), Environmental Protection Agency (EPA), World Health Organization (WHO), and Turkish Standards Institute (TS 266). According to the WQI results, the lake water falls into the excellent water class.

Keywords: Drinking water standards, limnology, Pearson correlation analysis, water quality classification, freshwater ecosystem

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: seldaozan@sdu.edu.tr

Selda Tekin-Özan orcid.org/0000-0002-8756-8859

Bu eser "Creative Commons Alıntı-GayriTicari-4.0 Uluslararası Lisansı" ile lisanslanmıştır.

1. Giriş

Su, tüm canlılar için vazgeçilmez bir yaşam kaynağıdır. Sanayi üretimi, rekreasyon, enerji üretimi ve içme suyu temini gibi pek çok faaliyetin merkezinde yer almasının yanı sıra toplumların sosyal ve ekonomik gelişiminin temel yapıtaşlarından biridir (Gleick, 1996; Wetzel, 2001; Kocataş, 2008; UN-Water, 2018; UNESCO, 2020). Dünya'daki su miktarı güncel verilere göre 1.386 milyar km^3 olup bu miktarın yaklaşık %97.5'i tuzlu su ve %2.5'i ise tatlı sudur (United States Geological Survey, 2023). İnsanlar da dahil olmak üzere dünyadaki tüm organizmalar yaşamsal gereksinimleri için suya bağımlıdır (Bhateria ve Jain, 2016).

Ancak günümüzde aşırı nüfus artışı, küresel ısınma, iklim değişikliği, hayvancılık, tarımsal üretim ve endüstriyel sebeplerden dolayı kullanılabilir su miktarı azalmakta, mevcut tatlı su sistemleri hem nitelik hem de nicelik açısından tehdit altına girmektedir (Ali & Khairy, 2016; Wu vd., 2018; Tokatlı, 2020; Şener vd., 2023). Bu süreçler, ekosistem sağlığını bozmakta ve toplumlar için sürdürülebilir su temini konusunda ciddi riskler ortaya koymaktadır.

Su kalitesi bir sucul sistemin fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri açısından belirli bir kullanım için uygunluğunu ifade etmektedir (Boyd, 1990). Sucul sistemlerde suyun varlığı kadar kalitesi de oldukça önemlidir (Varol, 2020). Tatlı su sistemlerinin korunması, ekolojik dengenin devamlılığı, su kaynaklarından endüstriyel, evsel ve tarımsal kullanımlar için verimli şekilde yararlanmak amacıyla belirli aralıklarla suyun fiziksel, kimyasal ve biyolojik parametrelerindeki değişimlerin araştırılması ve su kalitesinin takip edilmesi gerekir (Alver & Baştürk, 2019; Gölbaşı & Şen, 2019; Özer & Köklü, 2019; Gümüş, 2021).

Günümüzde Dünya'da ve ülkemizde suyun kalitesinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu nedenle su kalitesinin belirlenmesi için pek çok yöntem önerilmiş ve kullanılmıştır (American Public Health Association, 2017). Su kalite indeksleri 1800'lü yılların ortalarından beri kullanılmaktadır (Abbasi & Abbasi, 2012). İlk WQI modeli ise 10 su kalitesi parametresini temel almış ve Horton (1965) tarafından kullanılmıştır. Daha sonra Horton'un WQI modelinin daha kapsamlı bir hali olan Ulusal Sanitasyon Vakfı Su Kalitesi İndeksi (NSF-WQI) geliştirilmiştir (Abbasi & Abbasi, 2012). Oregon Su Kalite İndeksi (O SKİ), Kanada Çevre Bakanlığı Konseyi Su Kalite İndeksi (KÇBK SKİ) ve ABD Ulusal Sağlık Hizmetleri Kurumu Su Kalite İndeksi (USV SKİ) başta olmak üzere Dünya'da farklı bilim insanları tarafından geliştirilen 35'ten fazla su kalite indeksi bulunmaktadır (Brown vd., 1970; Abbasi, 2002; Khan vd., 2003; Debels vd., 2005; Abbasi & Abbasi, 2012). WQI, içme suyunun genel durumunu ortaya koymak amacıyla farklı fiziksel ve biyolojik parametrelerin ölçüm sonuçlarının belirli matematiksel işlemlerle bütünleştirilmesi esasına dayanan bir ölçeklendirme yaklaşımıdır. Bu yöntemin temel amacı, çok sayıda ve karmaşık su kalite verisinin, suyun kalite düzeyini temsil edebilecek tek bir sayısal göstergeye dönüştürülmesidir (Horton, 1965; Brown vd., 1972). Bu sayede su kalitesi, ayrıntılı parametre tabloları yerine daha sade, karşılaştırılabilir ve yorumlanması kolay bir ölçüt üzerinden değerlendirilebilmektedir (Cude, 2001). WQI'nin bu özelliği, özellikle karar vericiler ve uygulayıcılar açısından su kalitesi durumunun hızlı ve anlaşılır biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Lumb vd., 2011). Ayrıca indeksin hesaplanmasının ve yorumlanmasının basit olması, WQI'nin su kalitesi izleme ve yönetim çalışmalarında yaygın olarak tercih edilmesini sağlamıştır (Sutadian vd., 2016; Taş vd., 2021a). WQI, farklı araştırmacılar tarafından ülkemizdeki bazı sucul sistemlerin su kalitesini belirlemek amacıyla kullanılmıştır (Imneisi & Aydın, 2016; Alver & Baştürk, 2019; Taş vd., 2021a; Şener & Şener, 2022; Tekin-Özan vd., 2024; Özçelik & Tekin-Özan, 2024; Demirkıran & Tekin-Özan, 2025; Ersoy & Tonde, 2025; Gültekin & Hatipoğlu Temizel, 2025; Tunç, 2025; Bakioğlu-Acar, 2026).

Bu çalışmada ülkemizin güneybatısında Burdur ve Isparta sınırları içerisinde yer alan Karacaören II Baraj Gölü'nün su kalitesinin fizikokimyasal parametreler, WQI ve bazı istatistiksel analizler kullanılarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

2. Gereç ve Yöntem

2.1. Çalışma Alanı ve İstasyonlar

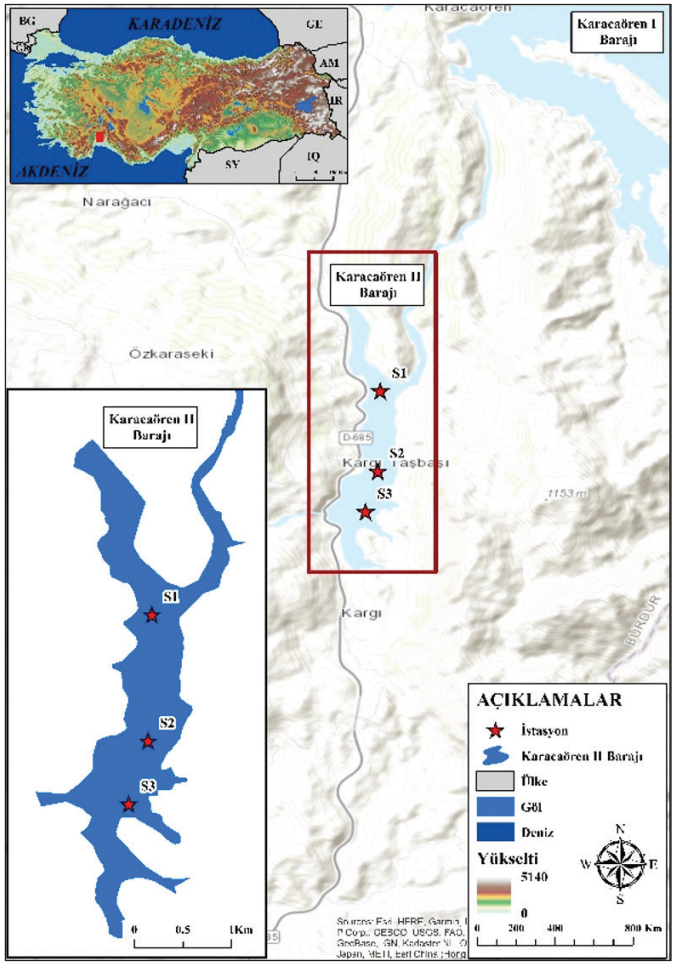
Karacaören II Baraj Gölü Türkiye'nin güneybatısında bulunan Antalya Havzası ve alt havza konumundaki Aksu Nehir Havzası'nın en önemli bileşenlerinden biridir (Varol & Ulusoy, 2023). Burdur ve Isparta il sınırları içerisinde yer alıp koordinatları 37° 18'K, 30° 48'D, denizden yüksekliği ise 347 m'dir. Göl, Antalya-Isparta karayolu üzerinde bulunmaktadır. Aksu Çayı üzerinde bulunan göl enerji elde etmek ve sulama amacıyla 1988-1993 yılları arasında inşa edilmiştir. Barajın akarsu yatağından yüksekliği 49.00 m, gövde hacmi 165.000 m^3, normal su kotunda göl alanı 2.34 km^2 ve normal su kotunda göl hacmi 48.00 hm^3'dir. Baraj 19.330 hektarlık bir alana sulama hizmeti verirken 47 MW güç ile de yıllık 206 GWh'lik elektrik enerjisi sağlamaktadır (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2024). Çevresinde yürüyüş

yolları, seyir terasları ve restoranlar bulunmaktadır. Amatör olarak olta balıkçılığı yapılmaktadır. Göl yakınlarındaki yerleşim alanlarında yapılan seracılık faaliyetleri önemli geçim kaynaklarındandır (Varol & Ulusoy, 2023).

Karacaören II Baraj Gölü'nün su kalitesini belirlemek için yapılan bu çalışmada, göl üzerinde 3 farklı istasyon seçilmiştir (Şekil 1). Birinci istasyon 37° 19' K-30° 49' D koordinatlarında olup gölün kuzeyinde Aksu Çayı'nın göle girdiği bölgenin yakınlarındadır. İkinci istasyon 37° 18' K-30° 48' D koordinatlarında olup gölün orta kısımlarındadır. Üçüncü istasyon 37° 18' K-30° 48' D koordinatlarındadır ve gölün güneyinde yer almaktadır. Hidroelektrik santraline yakın bir bölgededir.

2.2. Arazi Çalışmaları ve Fizikokimyasal Parametreler

Su örnekleri belirlenen istasyonlardan Nisan 2023, Temmuz 2023, Ekim 2023, Ocak 2024 tarihlerinde alınmıştır.



Şekil 1. Çalışma alanı; Karacaören II Baraj Gölü ve numune alma istasyonları.

Göl suyunun sıcaklık değeri (°C), pH ve elektriksel iletkenlik değeri (µS/cm) arazide YSI 556 MPS multiparametre cihazı ile (YSI Inc., Yellow Springs, OH, USA) ve çözünmüş oksijen (mg/L) ve oksijen doygunluğu (%) ise Milwaukee MW600 model oksijenmetre ile yine arazide ölçülmüştür. Arazi çalışmaları sırasında kimyasal analizler için her istasyondan standart metodlara uygun şekilde (TS ISO 5667-4) su örnekleri alınarak 1 litrelik polipropilen kaplara konulmuştur. Bu örnekler, nitrat azotu (NO_3-N mg/L), sülfat anyonu (SO_4^{2-}), amonyum azotu (NH_4-N mg/L), ortofosfat fosforu (PO_4-P mg/L), klorür iyonu (Cl^- mg/L) gibi parametrelerin analizi için Süleyman Demirel Üniversitesi Su, Kayaç ve Mineral Analiz Laboratuvarına getirilmiş ve analizler hizmet alımı yoluyla gerçekleştirilmiştir. 5 günlük biyokimyasal oksijen ihtiyacı ($BOİ_5$) (mg O_2/L) ölçümü Süleyman Demirel Üniversitesi Hidrobiyoloji laboratuvarında yapılmıştır.

2.3. WQI

İlk olarak ABD'de 1965 yılında Horton tarafından kullanılan WQI, suyun kullanım amacının belirlenmesinde temel alınan bir derecelendirme sistemidir. WQI, ABD'den sonra Afrika, Asya ve Avrupa ülkelerinde de kabul görmüş ve kullanımı giderek yaygınlaşmıştır. İçme suyu kalitesini etkileyen farklı fiziksel, kimyasal ve biyolojik parametreler kullanılarak hesaplanmakta ve suyun kalitesi hakkında fikir vermektedir. Elde edilen çok fazla veri bu indeksle birlikte su kalitesi hakkında bilgi verecek tek bir sayıya indirgenmektedir (Taş vd., 2021a). Belirlenen su kalitesi indeksi değeri çok fazla sayı içeren tablolara göre sonucun daha basit ve anlaşılır olmasını sağlamaktadır (Taner, 2007).

Su kalite indeksi kullanarak suyun kalitesini tespit etmek amacıyla genel olarak sıcaklık, bulanıklık, pH, çözünmüş oksijen, biyokimyasal oksijen ihtiyacı, fekal koliform, toplam katı madde, toplam fosfat fosforu ve toplam nitrat gibi parametrelerin kullanılması önerilmiştir (Chaturvedi & Bassin, 2009). Ancak WQI için seçilen parametreler; veri mevcudiyetine, uzman görüşüne ve çalışılan suyun çevresel önemine göre değişiklik gösterebilmektedir (Uddin vd., 2021). Debels vd. (2005) pek çok WQI modelinde önerilen parametrelerin analiz sonuçlarının olmaması durumunda diğer temel su kalitesi parametrelerinin de WQI hesaplamasında kullanılabileceğini belirtmiştir. Bu çalışmada WQI değeri pH, çözünmüş oksijen, elektriksel iletkenlik, $BOİ_5$, Cl^- ve SO_4^{2-} parametreleri kullanılarak hesaplanmıştır. Her parametre için atanan ağırlık değerleri ile hesaplanan göreceli ağırlık değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Her parametrenin ağırlık ve göreceli ağırlık değerleri.

Parametreler	Standart Değerler	Ağırlık Değeri (wi)	Göreceli Ağırlık Değeri (Wi)
pH	6.5-8.5 (WHO, 2022)	4	0.15
O_2	8 (YSKY, 2023)	4	0.15
Eİ	2500 (TSE, 2005)	5	0.19
$BOİ_5$	8 (YSKY, 2023)	3	0.11
Cl^-	250 (WHO, 2022)	5	0.19
SO_4^{2-}	250 (WHO, 2022)	5	0.19
		∑wi=26	

WQI aşağıda verilen formüller kullanılarak dört aşamada hesaplanmaktadır. İlk olarak su kalitesini etkileyen parametrelerin önem derecesine göre, çalışılan her parametreye göreceli olarak 1 ile 5 arasında bir ağırlık değeri (wi) belirlenir ve aşağıdaki formül kullanılarak göreceli ağırlık (Wi) hesaplanır (1).

$$Wi=\frac{wi}{\sum_{i=1}^{n} wi} \quad (1)$$

İkinci olarak, ölçümler sonucunda elde edilen veriler (C_i), her parametre için verilen içme suyu standardına (S_i) bölünür, 100 ile çarpılır ve kalite derecelendirilmesi (Q_i) hesaplanır (2).

$$Q_i=\left(\frac{c_i}{s_i}\right)\times 100 \quad (2)$$

Son aşamada ise göreceli ağırlık (Wi) ve kalite derecelendirmesi (Q_i) çarpılarak alt-indeksler (SI) bulunur (3). Alt-indeksler toplanarak WQI hesaplanır (4).

$$SI_i=Wi\times Q_i \quad (3)$$

$$WQI=\sum_{i=1}^{n} SI_i \quad (4)$$

WQI değerleri WQI<50 (mükemmel su), 50≤WQI≤100 (iyi su), 100≤WQI≤200 (kötü su), 200≤WQI≤300 (çok kötü su) ve WQI≥300 (içme suyu için uygun değil) olmak üzere 5 kategoride sınıflandırılmıştır (Xiao vd., 2019).

2.4. İstatistiksel Analizler

Çalışma bölgesindeki 3 farklı istasyondan elde edilen sonuçları mevsimsel olarak değerlendirmek amacıyla sonuçların minimum değeri, maksimum değeri, aritmetik ortalamaları ve standart sapma değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca suda ölçülen fizikokimyasal parametrelerin mevsimsel olarak değişip değişmediğini ortaya koymak ve fizikokimyasal parametrelerin birbirleri ile ilişkilerini belirlemek amacıyla SPSS 22.0 paket programı kullanılarak One-Way Anova, Duncan Çoklu Karşılaştırmalı Testi ve Pearson Korelasyon Analizi yapılmıştır (Pearson, 1992; Fisher, 1928; Duncan, 1955). Sonuçlar $p<0.05$ düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı olarak kabul edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar EU'nun, WHO'nun, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının, Tarım ve Orman Bakanlığının, EPA'nın ve TSE'nin verdiği suda sınıflandırma kriterleri ile kıyaslanmıştır (TSE, 2005; EPA, 2018; EU, 2020; WHO, 2022; Tarım ve Orman Bakanlığı, 2023; Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2025).

3. Bulgular

3.1. Fiziksel ve Kimyasal Bulgular

Karacaören II Baraj Gölü'nün su kalitesini belirlemek amacıyla Nisan 2023-Ocak 2024 tarihleri arasında gölden alınan su örneklerinde yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler Çizelge 2'de verilmiştir.

Sıcaklık değerleri ilkbahar mevsiminde 18.92-20.10 °C arasında, yaz mevsiminde 24.23-25.41 °C arasında, sonbaharda 17.87-18.18 °C ve kış mevsiminde 7.24-7.35 °C arasında değişmiştir. Ortalama sıcaklık değerinin mevsimsel dağılımın yaz (24.72 °C)>ilkbahar (19.36 °C)>sonbahar(17.99 °C)>kış (7.31 °C) şeklinde olduğu görülmüştür. Sıcaklık de-

ğeri açısından tüm mevsimler arasında anlamlı bir farklılık ($p<0.05$) olduğu belirlenmiştir.

Suda belirlenen pH değerleri ilkbaharda 7.79-8.10, yaz mevsiminde 7.70-8.08, sonbaharda 7.81-8.35 ve kış mevsiminde ise 7.90-8.15 arasında değişim göstermiştir. Ortalama pH değerinin mevsimsel olarak sırasıyla sonbahar (8.12)>kış (8.03)>ilkbahar (7.95)>yaz (7.89) şeklinde olduğu belirlenmiştir. pH değeri açısından tüm mevsimler arasında anlamlı bir farklılık ($p>0.05$) olmadığı tespit edilmiştir.

Karacaören II Baraj Gölü'nün suyundaki çözünmüş oksijen değeri ilkbaharda 7.2-8.2 mg/L arasında, yaz mevsiminde 5.8-6.6 mg/L arasında, sonbaharda 6.4-6.8 mg/L arasında ve kış mevsiminde ise 7.1-7.6 mg/L değerleri arasında değişmiştir. Mevsimler arasında ortalama çözünmüş oksijen değerlerinin sırasıyla ilkbahar(7.73 mg/L)>kış(7.33 mg/L)>sonbahar(6.6 mg/L)>yaz(6.16 mg/L) şeklinde olduğu saptanmıştır. Çözünmüş oksijen miktarının ilkbahar ve kış mevsimlerinde diğer mevsimlere göre istatistiksel olarak farklı olduğu ($p<0.05$) belirlenmiştir.

Oksijen doygunluğu yüzdesi ilkbaharda %79-%90 arasında, yaz mevsiminde %59-%66 arasında, sonbaharda %69-%75 arasında ve kış mevsiminde %80-%87 değerleri arasında olduğu saptanmıştır. Oksijen doygunluğu ortalama değerinin mevsimsel olarak sırasıyla kış(%83.66)>ilkbahar(%83)>sonbahar(%71.66)>yaz(%62.33) şeklinde sıralandığı belirlenmiştir. Oksijen doygunluğu değerinin ilkbahar ve kış mevsimlerinde diğer mevsimlere göre istatistiksel olarak farklı olduğu ($p<0.05$) tespit edilmiştir.

Elektriksel iletkenlik değeri ilkbaharda 301-318.2 µS/cm değeri arasında, yaz mevsiminde 247.8-255.7 µS/cm arasında, sonbaharda 303.7-359.1 µS/cm arasında ve kış mevsiminde ise 314.7-330.8 µS/cm değerleri arasında değişim göstermiştir. Elektriksel iletkenlik ortalama değerlerinin mevsimsel sıralaması sonbahar(326.2 µS/cm)>kış(322.4 µS/cm)>ilkbahar (311.53 µS/cm)>yaz (251.6 µS/cm) olarak belirlenmiştir. Elektriksel iletkenlik değerinin yaz mevsiminde diğer mevsimlere göre istatistiksel açıdan farklı olduğu ($p<0.05$) saptanmıştır.

Çizelge 2. Bazı fizikokimyasal parametrelerin mevsimlere göre minimum değerleri, maksimum değerleri, ortalama değerleri ve standart sapma değerleri.

	İlkbahar-2023	Yaz-2023	Sonbahar-2023	Kış-2024
Sıcaklık	18.92-20.10 19.36±0.64 ^{c*}	24.23-25.41 24.72±0.61 ^{d}	17.87-18.18 17.99±0.16 ^{b}	7.24-7.35 7.31±0.06 ^{a}
pH	7.79-8.10 7.95±0.15 ^{a}	7.70-8.08 7.89±0.20 ^{a}	7.81-8.35 8.12±0.27 ^{a}	7.90-8.15 8.03±0.12 ^{a}
Oksijen (mg/L)	7.2-8.2 7.73±0.50 ^{b}	5.8-6.6 6.16±0.40 ^{a}	6.4-6.8 6.6±0.2 ^{a}	7.1-7.6 7.33±0.25 ^{b}
Oksijen doygunluğu (%)	79-90 83±6.08 ^{c}	59-66 62.33±3.51 ^{a}	69-75 71.66±3.05 ^{b}	80-87 83.66±3.51 ^{c}
Elektriksel iletkenlik (µS/cm)	301-318.2 311.53±9.22 ^{b}	247.8-255.7 251.6±3.95 ^{a}	303.7-359.1 326.2±29.12 ^{b}	314.7-330.8 322.4±8.07 ^{b}
$BOİ_5$ (mg/L)	0.8-1.1 0.96±0.15 ^{a}	1.3-1.9 1.6±0.3 ^{ab}	1.1-1.5 1.26±0.20 ^{ab}	0.9-1.2 1.06±0.15 ^{a}
Cl^- (mg/L)	10.25-10.60 10.34±0.19 ^{a}	10.93-11.06 11.01±0.07 ^{a}	11.07-11.32 11.01±0.12 ^{a}	10.34-10.5 10.44±0.08 ^{a}
SO_4^{2-} (mg/L)	19.59-20.69 19.98±0.61 ^{c}	19.58-20.09 19.88±0.26 ^{c}	14.26-14.72 14.49±0.23 ^{a}	15.62-16.42 15.92±0.43 ^{b}
NO_3-N (mg/L)	0.16-0.21 0.19±0.02 ^{a}	ALA	ALA	0.52-0.53 0.526±0.005 ^{b}
PO_4-P (mg/L)	ALA**	ALA	ALA	ALA
NH_4-N (mg/L)	ALA	ALA	ALA	ALA

* Her bir parametre sütununda aynı harfle gösterilen değerler arasındaki fark 0,05 düzeyinde önemsiz, farklı harfle gösterilen değerler arasındaki fark 0,05 düzeyinde önemlidir.
** Analiz Limitinin Altında

Biyokimyasal oksijen ihtiyacı değeri ilkbaharda 0.8-1.1 mg/L arasında, yaz mevsiminde 1.3-1.9 mg/L arasında, sonbaharda 1.1-1.5 mg/L arasında ve kış mevsiminde 0.9-1.2 mg/L değerleri arasında değişmiştir. Biyokimyasal oksijen ihtiyacı değerinin mevsimsel olarak sırasıyla yaz (1.6 mg/L) > sonbahar (1.26 mg/L) > kış (1.06 mg/L) > ilkbahar(0.96 mg/L) şeklinde sıralandığı belirlenmiştir. Biyokimyasal oksijen ihtiyacı değerinin ilkbahar ve kış mevsimlerinde diğer mevsimlere göre istatistiksel olarak farklı olduğu ($p<0.05$) saptanmıştır.

Klorür iyonu miktarı ilkbaharda 10.25-10.60 mg/L arasında, yaz mevsiminde 10.93-11.06 mg/L arasında, sonbaharda 11.07-11.32 mg/L arasında ve kış mevsiminde 10.34-10.50 mg/L arasında belirlenmiştir. Mevsimler arasında ortalama klorür iyonu miktarı yaz (11.01 mg/L) = sonbahar (11.01 mg/L) > kış (10.44 mg/L) > ilkbahar (10.34 mg/L) şeklinde sıralanmıştır. Klorür iyonu miktarı açısından mevsimler arasında istatistiksel açıdan önemli bir fark olmadığı ($p>0.05$) tespit edilmiştir.

Sülfat iyonu miktarı ilkbaharda 19.59-20.69 mg/L arasında, yaz mevsiminde 19.58-20.09 mg/L arasında, sonbaharda 14.26-14.72 mg/L arasında ve kış mevsiminde 15.62-16.42 mg/L arasında değişiklik göstermiştir. Ortalama sülfat iyonu değerlerinin sırasıyla ilkbahar (19.98 mg/L) > yaz (19.88 mg/L) > kış (15.92 mg/L) > sonbahar (14.49 mg/L) şeklinde sıralandığı saptanmıştır. Sülfat iyonu miktarı açısından ilkbahar ve yaz mevsimlerinin diğer mevsimlerden istatistiksel olarak farklı olduğu ($p<0.05$) belirlenmiştir.

Çizelge 2'ye göre yaz ve sonbaharda nitrat azotu miktarı analiz limitinin altında (<0.01) çıkmıştır. En yüksek nitrat azotu miktarı (0.526 mg/L) kış mevsiminde ölçülmüştür. İlkbahar mevsiminde ise nitrat azotu miktarının 0.19 mg/L olduğu belirlenmiştir. Nitrat iyonu miktarı açısından mevsimler arasında önemli bir fark olduğu ($p<0.05$) tespit edilmiştir.

3.2. Pearson Korelasyon Analizi

Karacaören II Baraj Gölü'nde yapılan bu çalışmanın sonunda belirlenen değerlerin arasında istatistiksel açıdan anlamlı bir ilişki olup olmadığını tespit etmek amacıyla Pearson Korelasyon Analizi yapılmıştır. Belirlenen su kalite parametre verileri arasında kaydedilen anlamlı istatistiksel ilişkiler ve korelasyon katsayıları Çizelge 3'de verilmiştir.

Buna göre sıcaklık ile çözünmüş oksijen, oksijen doygunluğu, elektriksel iletkenlik, klorür ve nitrat azotu miktarları arasında negatif, sıcaklık ile pH, biyokimyasal oksijen ihtiyacı ve sülfat değerleri arasında ise pozitif bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, sıcaklığın artışıyla birlikte pH, biyokimyasal oksijen ihtiyacı ve sülfat değerlerinin artması, çözünmüş oksijen, oksijen doygunluğu, elektriksel iletkenlik, klorür ve nitrat azotu miktarının azalması anlamına gelmektedir. pH ile çözünmüş oksijen, oksijen doygunluğu ve sülfat değerleri arasında negatif, pH ile diğer parametreler arasında ise pozitif bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Bu durum, pH'ın artışıyla beraber çözünmüş oksijen, oksijen doygunluğu ve sülfat değerlerinin azalması, diğer parametrelerin ise artması anlamına gelmektedir. Çözünmüş oksijen ile biyokimyasal oksijen ihtiyacı arasında negatif, çözünmüş oksijen ile oksijen doygunluğu, elektriksel iletkenlik, klorür, sülfat ve nitrat azotu miktarları arasında ise pozitif bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, çözünmüş oksijen miktarının artışıyla beraber oksijen doygunluğu, elektriksel iletkenlik, klorür, sülfat ve nitrat azotu miktarlarının artması anlamına gelmektedir. Oksijen doygunluğu ile biyokimyasal oksijen ihtiyacı, sülfat ve nitrat azotu miktarları arasında negatif, oksijen doygunluğu ile elektriksel iletkenlik ve klorür miktarları arasında ise pozitif bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Oksijen doygunluğu miktarının artmasıyla beraber elektriksel iletkenlik ve klorür miktarları artarken biyokimyasal oksijen ihtiyacı, sülfat ve nitrat azotu miktarlarında ise azalma olmuştur. Elektriksel iletkenlik ile biyokimyasal oksijen ihtiyacı ve sülfat değerleri arasında negatif, elektriksel iletkenlik ile klorür ve nitrat azotu miktarları arasında ise pozitif bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Elektriksel iletkenlik miktarının artışıyla klorür ve nitrat azotu miktarları artarken, biyokimyasal oksijen ihtiyacı ve sülfat miktarlarında ise azalma olmuştur. biyokimyasal oksijen ihtiyacı miktarı ile klorür ve nitrat azotu değerleri arasında negatif ve sülfat miktarı arasında pozitif bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Klorür miktarı ile sülfat ve nitrat azotu miktarı arasında pozitif bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Klorür miktarının artışıyla sülfat ve nitrat azotu değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Sülfat ile nitrat azotu arasında pozitif bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.

Çözünmüş oksijen ile oksijen doygunluğu ve biyokimyasal oksijen ihtiyacı arasında, oksijen doygunluğu ile biyokimyasal oksijen ihtiyacı arasında 0.01 düzeyinde anlamlı korelasyon tespit edilmiştir. Sıcaklık ve oksijen doygunluğu, elektriksel iletkenlik ve nitrat azotu arasında, oksijen doygunluğu ile elektriksel iletkenlik ve nitrat azotu arasında, elektriksel iletkenlik ile biyokimyasal oksijen ihtiyacı ve sülfat arasında 0.05 düzeyinde önemli farklılıklar belirlenmiştir. Diğer tüm ilişkiler istatistiksel olarak anlamlı değildir ($p>0.05$).

Çizelge 3. Karacaören II Baraj Gölü'nün suyunda ölçülen bazı fizikokimyasal parametrelerin Pearson Korelasyon Analizine göre belirlenen değerleri.

	Sıcaklık	pH	Çözünmüş oksijen (mg/L)	Oksijen doygunluğu (%)	Elektriksel iletkenlik (µS/cm)	Biyokimyasal oksijen ihtiyacı ($BOİ_5$)	Cl^- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	NO_3-N (mg/L)
Sıcaklık	1	0.219	-0.480	-0.690*	-0.657*	0.533	-0.476	0.591	-0.911*
pH		1	-0.021	-0.005	0.485	0.229	0.239	-0.378	0.008
Çözünmüş oksijen (mg/L)			1	0.937**	0.507	-0.832**	0.151	0.070	0.536
Oksijen doygunluğu (%)				1	0.655*	-0.744**	0.153	-0.182	0.700*
Elektriksel iletkenlik (µS/cm)					1	-0.659*	0.172	-0.633*	0.408
Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı ($BOİ_5$)						1	-0.329	0.123	-0.471
Cl- (mg/L)							1	0.143	0.503
SO_4^{2-} (mg/L)								1	-0.241
NO_3-N (mg/L)									1

* 0.05 düzeyinde önemli
** 0.01 düzeyinde önemli

3.3. Karacaören II Baraj Gölü Suyunun Su Kalite Kriterlerine Göre Değerlendirilmesi

Çalışmamız sonucunda elde ettiğimiz veriler Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (2025) tarafından bildirilen Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY)'nde belirtilen kriterlere göre değerlendirildiğinde, Karacaören II Baraj Gölü'nün tüm mevsimlerde su sıcaklığı, pH, biyokimyasal oksijen ihtiyacı, klorür iyonu ve sülfat değerlerine göre I. kalite sınıfında olduğu belirlenmiştir. Oksijen doygunluğu değerlerine göre yaz mevsiminde III. ve diğer mevsimlerde ise II. kalite sınıfında yer aldığı tespit edilmiştir. Nitrat azotu değerlerine göre kış mevsiminde II. kalite ve diğer mevsimlerde ise I. kalite sınıfında olduğu belirlenmiştir.

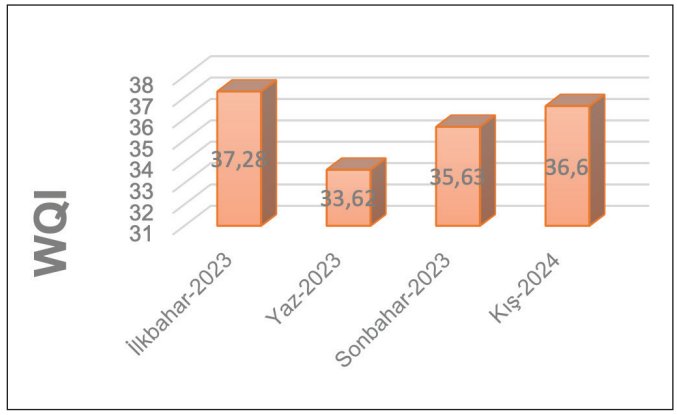
Çalışmamız sonucunda elde ettiğimiz diğer veriler Tarım ve Orman Bakanlığı (2023) tarafından bildirilen Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (YSKY)'nde belirtilen kriterlere göre değerlendirilmiştir. Buna göre Karacaören II Baraj Gölü elektriksel iletkenlik değerleri bakımından ise tüm mevsimlerde I. kalite ve çözünmüş oksijen değerleri açısından tüm mevsimlerde II. kalite sınıfında yer almıştır.

Karacaören II Baraj Gölü suyunda ölçülen bazı fizikokimyasal parametre değerlerinin EU'nun, EPA'nın, WHO'nun ve TS 266 içme suyu standartlarında belirtilen sınır değerlerin altında olduğu belirlenmiştir (TSE, 2005; WHO, 2022; EPA, 2018; EU, 2020).

3.4. WQI Sonuçlarına Göre Su Kalitesinin Değerlendirilmesi

Karacaören II Baraj Gölü suyu WQI değerleri Şekil 2'de gösterilmiştir.

WQI değerlerine göre Karacaören II Baraj Gölü tüm mevsimlerde mükemmel su kalitesi sınıfında yer aldığı belirlenmiştir. WQI değerlerinin ilkbaharda 37.28, yaz mevsiminde 33.62, sonbaharda 35.63 ve kış mevsiminde ise 36.60 olduğu tespit edilmiştir. İndeks değerlerinin mevsimler arasında sınırlı değişim göstermesi gölün su kalite özelliklerinin yıl boyunca kararlı bir yapı sergilediğine işaret etmektedir.



Şekil 2. Karacaören II Baraj Gölü suyunun mevsimlere göre WQI değerleri.

4. Tartışma

Sıcaklık su kaynağındaki biyolojik ve kimyasal değişimleri etkileyen ve özellikle göllerde tabakalaşmanın oluşmasında etkin bir role sahip en önemli parametredir (Ünlü vd., 2008). Ayrıca sucul canlıların yaşamını doğrudan ya da dolaylı olarak, su kalitesini ise doğrudan etkileyen önemli bir unsurdur (Boyd, 1990; Wetzel, 2001). Canlıların vücudunda gerçekleşen tüm biyokimyasal reaksiyonların hızları sıcaklığın etkisi altındadır (Odum & Barrett, 2008). Sıcaklık suda yaşayan canlıların büyüme ve üreme hızlarına etki ettiği gibi canlıların sucul sistemlerdeki dağılışları üzerinde de etkilidir (Kocataş, 2008). Suyun bulunduğu coğrafya, topoğrafik yapı, güneşin geliş açısı, derinliği, mevsimler, atmosfer şartları, rakım, antropojenik faktörler ve su yatağının yapısı gibi nedenlere bağlı olarak suların sıcaklığı değişkenlik gösterir (Wetzel, 2001). Su sıcaklığı sulardaki gazların çözünürlüğünü ve suyun yoğunluğunu da etkilemektedir (Boyd, 1990). Karacaören II Baraj Gölü'nde su sıcaklığı kış mevsiminde en düşük düzeyde iken yaz mevsiminde en yüksek düzeye ulaşmıştır. Ortalama sıcaklık değerinin mevsimsel olarak sırasıyla yaz(24.72 ˚C)>ilkbahar(19.36 ˚C)>sonbahar (17.99 ˚C)>kış(7.31 ˚C) şeklinde olduğu görülmüştür. Sıcaklık değeri açısından tüm mevsimler arasında anlamlı bir farklılık ($p<0.05$) olduğu belirlenmiştir. Demirkıran ve Tekin-Özan (2025) Karakuyu Gölü'nde yaptıkları çalışmada su sıcaklığının kışın en düşük, sonbaharda ise en yüksek düzeye ulaştığını bildirmişlerdir. Su sıcaklığının sonbaharda en yüksek düzeye çıkmasını ise çalışma döneminde gölün bağlı olduğu alanda en yüksek yağışın haziran ayında düşmesinden kaynaklanabileceğini bildirmişlerdir. Odioko ve Becer (2025) Karacaören I Baraj Gölü'nde su sıcaklığının yaz mevsiminde en yüksek (30.48 ˚C), kış mevsiminde ise en düşük (13.18 ˚C) olduğunu bildirmişlerdir. Ulusoy (2023) Karacaören II Baraj Gölü'nden belirlediği 2 istasyonun (S2, S3) sıcaklık değerlerini ölçmüş ve su sıcaklığının yaz mevsiminde en yüksek (S2: 28.0 ˚C; S3: 30.0˚C), kış mevsiminde ise en düşük (S2: 10.3 ˚C; S3: 11.2˚C) seviyede olduğunu belirlemiştir. Bu çalışmada yaz mevsiminde belirlenen yüksek su sıcaklığı değerleri, yaz aylarında artan güneşlenme süresi, güneş ışınlarının su yüzeyine daha dik açıyla gelmesi, su kütlesinin daha stabil olması ile açıklanabilir. Karacaören II Baraj Gölü'nde yaz mevsiminde ölçülen sıcaklık değerlerinin aynı havzada yer alan Karacaören I Baraj Gölü'nden bildirilen yaz dönemi sıcaklıklarıyla benzerlik göstermesi, sıcaklığın bölgesel iklim koşulları tarafından güçlü biçimde kontrol edildiğini düşündürmektedir (Boyd, 1990; Wetzel, 2001).

pH suyun asidik ya da bazik karakterini gösteren, sucul sistemlerin kimyasal dengesini yansıtan ve sucul canlıların hayatını etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Göllerde genellikle 6.5-8.5 aralığında değişir ve bu aralığın dışındaki pH değerleri ekosistem üzerinde olumsuz etkilere neden olabilir (Wetzel, 2001; Gümüş & Akköz, 2020). Jeolojik yapı, fotosentez ve solunum gibi biyolojik faaliyetler, mevsimler, yağış, tarımsal ve kentsel kaynaklı girdiler suların pH seviyesi üzerinde etkilidir (Boyd, 1990). Çalışma süresince pH değerleri 7.70-8.35 arasında değişim göstermiş ve en yüksek ortalama düzeye sonbaharda, en düşük ortalama düzeye ise yaz mevsiminde ulaşmıştır. pH değeri açısından tüm mevsimler arasında anlamlı bir farklılık ($p>0.05$) olmadığı belirlenmiştir. Ülkemizde yapılan diğer çalışmalarda pH değerleri Karakuyu Gölü'nde 6.90-7.99 arasında (Demirkıran & Tekin-Özan, 2025), Karacaören I Baraj Gölü'nde 7.50-8.18 arasında (Odioko & Becer, 2025), Işıklı Gölü'nde 6.16-8.6 arasında (Tunç, 2025), Kovada Gölü'nde 4.15-9.84 arasında (Bakioğlu- Acar, 2026) değişiklik göstermiştir. Karacaören II Baraj Gölü'nde ise 7.50-8.12 arasında değişmiş, yaz mevsiminde en yüksek ve sonbaharda en düşük seviyede olduğu belirlenmiştir (Ulusoy, 2023). Eğirdir Gölü'nde (Özçelik & Tekin-Özan, 2024) ve Kovada Gölü'nde (Sancer & Tekin-Özan, 2016) pH değerinin kış mevsiminde azaldığı ve yaz mevsiminde arttığı belirlenmiştir. Bu çalışmada belirlenen pH değerlerinin 7.70–8.35 aralığında olması Karacaören II Baraj Gölü'nün tatlı su ekosistemleri için bildirilen pH sınırları içerisinde yer aldığını göstermektedir (Wetzel, 2001). pH değerinin sonbaharda daha yüksek, yaz mevsiminde ise daha düşük olması; yağış rejimi, su kütlesinin yenilenmesi ve biyolojik aktivitelerdeki mevsimsel değişimlerle ilişkili olabilir. Göllerde pH değerinin yıl içinde bu tür dalgalanmalar göstermesi, literatürde lentik sistemler için yaygın olarak bildirilen bir durumdur (Boyd, 1990; Wetzel, 2001).

Sucul sistemlerde canlı yaşamını doğrudan etkileyen en önemli parametrelerden biri çözünmüş oksijendir. Suda yaşayan tüm canlılar için hayati bir öneme sahiptir (Boyd, 1990; Wetzel, 2001). Sıcaklık, tuzluluk, rüzgâr, fotosentez, solunum, organik maddenin ayrışması, su yüzeyinin atmosferle temas süresi ve derecesi gibi faktörler suyun oksijen miktarını belirler (Boyd, 1990; Wetzel, 2001). Göl ve barajlarda çözünmüş oksijen miktarı karışım ve durgunluk dönemi ile de yakından ilişkilidir (Wetzel, 2001). Çözünmüş oksijen miktarı su kalitesi değerlendirmelerinde temel bir gösterge olarak kabul edilir (Kocataş, 2008). Oksijen doygunluğu ise % ile ifade edilir ve sudaki mevcut oksijen miktarının suyun taşıyabileceği oksijen miktarına oranını

gösterir (Boyd, 1990; Wetzel, 2012). Bu çalışmada Karacaören II Baraj Gölü'nün suyundaki çözünmüş oksijen değerleri 5.8–7.6 mg/L arasında değişim göstermiştir. Oksijen miktarı ilkbahar mevsiminde maksimum, yaz mevsiminde ise minimum düzeye ulaşmıştır. Çözünmüş oksijen miktarının ilkbahar ve kış mevsimlerinde diğer mevsimlere göre istatistiksel olarak farklı olduğu ($p<0.05$) belirlenmiştir. Oksijen doygunluğu değerleri %59–%90 arasında değişmiştir. Ortalama değerlere göre yaz mevsiminde %62.33 ile en düşük, kış mevsiminde ise %83.66 ile en yüksek düzeye ulaşmıştır. Oksijen doygunluğu değerlerinin de ilkbahar ve kış mevsimlerinde diğer mevsimlere göre istatistiksel olarak farklı olduğu ($p<0.05$) tespit edilmiştir. Demirkıran ve Tekin-Özan (2025), Karakuyu Gölü'nde en düşük ortalama çözünmüş oksijen değerinin yaz mevsiminde (4 mg/L), en yüksek ortalama çözünmüş oksijen değerinin ise kış mevsiminde (6.23 mg/L) olduğunu bildirmiştir. Tunç (2025), Işıklı Gölü'nde çözünmüş oksijen değerlerinin yaz mevsiminde minimum, kış mevsiminde ise maksimum düzeyde olduğunu belirtmiştir. Ulusoy (2023) ise Karacaören II Baraj Gölü'nün S2 istasyonunda çözünmüş oksijen değerinin kış mevsiminde en yüksek, sonbaharda ise en düşük düzeyde olduğunu tespit etmiştir. Bu çalışmada elde edilen bulgular, sucul sistemlerde çözünmüş oksijen miktarının mevsimsel olarak değiştiğini ortaya koymaktadır. Yaz mevsiminde oksijen miktarındaki düşüş, su sıcaklığının artmasına bağlı olarak oksijenin çözünürlüğünün azalması ve sucul canlıların metabolik faaliyetlerindeki artıştan kaynaklanmış olabilir (Wetzel, 2012). Buna karşılık ilkbahar ve kış aylarında oksijen miktarının artışı; su sıcaklığının azalmasıyla oksijen çözünürlüğünün artması, rüzgârın etkisiyle suda karışım ve konveksiyon olaylarının meydana gelmesi ve kar ile yağmur şeklinde göle su girişinin artmasıyla ilişkili olabilir (Wetzel, 2001; Demirkıran & Tekin-Özan, 2025). Çözünmüş oksijen değerlerine göre Karacaören II Baraj Gölü'nün tüm mevsimlerde II. kalite sınıfında yer alması, göldeki oksijen düzeyinin genel olarak sucul yaşamın devamı için yeterli olduğunu düşündürmektedir.

Elektriksel iletkenlik suyun elektrik iletme kapasitesini ifade eden ve su içindeki iyonların toplam miktarı ile ilişkili olan, su kalite değerlendirmelerinde kullanılan bir parametredir (Boyd, 1990; Wetzel, 2001). Tatlı su sistemlerinde elektriksel iletkenlik değeri jeolojik yapı, buharlaşma ve yağış rejiminden etkilenmektedir (Wetzel, 2001). Karacaören II Baraj Gölü'nde elektriksel iletkenlik değeri 247.8-359.1 µS/cm arasında tespit edilmiştir. Sonbaharda en yüksek düzeye ulaşırken, yaz mevsiminde en düşük seviyede olduğu görülmüştür. Demirkıran ve Tekin-Özan (2025) Karakuyu Gölü'nde benzer şekilde elektriksel iletkenlik değerinin ilkbaharda en yüksek, yaz mevsiminde en düşük seviyede olduğunu belirtmişler ve bu sonuçların çalışma döneminin yaz periyodunda görülen aşırı yağıştan kaynaklanmış olabileceğini bildirmişlerdir. Eber Gölü'nde elektriksel iletkenlik değeri 697-2590 µS/cm arasında değişmiş ve en düşük değer kış mevsiminde belirlenmiştir (Gümüş & Akköz, 2020). Ulusoy (2023) Karacaören Baraj Gölü'nde 2 farklı istasyonda elektriksel iletkenlik değerlerini ölçmüş ve S3 istasyonunda elektriksel iletkenlik değerinin yaz mevsiminde en düşük, ilkbaharda ise en yüksek seviyede olduğunu belirlemiştir. Elektriksel iletkenlik değerinin mevsimsel olarak farklılık göstermesi, tatlı su sisteminde yaygın olarak gözlenen doğal bir durum olup, literatürde bildirilen benzer göl ve baraj çalışmalarıyla genel olarak örtüşmektedir (Wetzel, 2001; Ulusoy, 2023).

Biyokimyasal oksijen ihtiyacı suda bulunan organik maddelerin mikroorganizmalar tarafından parçalanması esnasında kullanılan oksijen miktarını ifade etmektedir ve su kalitesi izleme çalışmalarında kullanılan temel parametrelerden biridir (Boyd, 1990; Kocataş, 2012; APHA, 2017). Biyokimyasal oksijen ihtiyacı değeri organik madde yükü ile yakından ilişkilidir ve yüksek olması özellikle durgun ve karışımın az olduğu göllerde sucul yaşam açısından risk oluşturmaktadır (Wetzel, 2001). Karacaören II Baraj Gölü'nde biyokimyasal oksijen ihtiyacı değeri 0.8-1.9 mg/L arasında değişmiş, en yüksek düzeye yaz mevsiminde ve en düşük düzeye ise ilkbahar mevsiminde ulaşmıştır. Biyokimyasal oksijen ihtiyacı değerinin ilkbahar ve kış mevsimlerinde diğer mevsimlere göre istatistiksel olarak farklı olduğu ($p<0.05$) saptanmıştır. Karakuyu Gölü'nde biyokimyasal oksijen ihtiyacı değeri 0.3-2.0 mg/L arasında değişmiştir (Demirkıran & Tekin-Özan, 2025). Imneisi ve Aydın (2016), Karaçomak Gölü'nde biyokimyasal oksijen ihtiyacı değerinin 2.1-19.3 mg/L arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Bu çalışmada belirlenen biyokimyasal oksijen ihtiyacı değerlerinin nispeten düşük olması gölde organik madde yükünün sınırlı olduğuna işaret etmektedir. Yaz mevsimindeki artış ise sıcaklığa bağlı olarak ayrışma olaylarının artması ile açıklanabilir (Wetzel, 2001).

Klorür iyonu sularda bulunan başlıca anyonlardan biridir. Jeolojik yapı, buharlaşma, evsel ve tarımsal girdiler sucul sistemlerdeki klorür iyonu miktarını etkilemektedir (Wetzel, 2001; APHA, 2017). Sucul sistemlerde genel olarak düşük konsantrasyonlarda bulunmakta ve sucul canlılar için risk oluşturmamaktadır (Boyd, 1990). Karacaören II Baraj Gölü'nün klorür miktarı 10.25-11.32 mg/L arasında değiş-

şiklik göstermiştir. Sonbahar ve yaz aylarında en yüksek, ilkbaharda ise en düşük seviyede olduğu belirlenmiştir. Klorür iyonu miktarı açısından mevsimler arasında istatistiksel olarak önemli bir fark olmadığı ($p>0.05$) tespit edilmiştir. Saraydüzü Baraj Gölü'nde klorür miktarının 3.01-6.28 mg/L arasında değiştiği bildirilmiştir (Kükrer & Mutlu, 2019). Tunç (2025), Işıklı ve Gökgöl Sulak Alanı'nda klorür seviyesinin 1.29-33.55 mg/L arasında değiştiğini tespit etmiştir. Bulut vd. (2011) Karakuyu Gölü'nde klorür miktarının 4.78 mg/L (Temmuz) ve 11.12 mg/L (Ekim) arasında değiştiğini bildirmişlerdir. Bu çalışmada belirlenen klorür değerleri dar bir aralıkta seyretmiştir ve değerler nisbeten düşüktür. Bu sonuçlar gölün evsel ve tarımsal kaynaklı kirlenme düzeyinin az olduğunu göstermektedir (Jindal vd., 2014).

Sülfat anyonu tatlı sularda doğal olarak bulunur. Sulara kayaçlar, yağmur suları ve endüstriyel atıklar, tarımsal kirleticiler gibi antropojenik etkiler sonucu karışmaktadır (Tanyolaç, 2009; Chen vd., 2016). Bitkilerin gelişimi için çok önemlidir ve eksikliğinde fitoplankton gelişiminin olumsuz etkilendiği bilinmektedir (Atıcı vd., 2005). İlkbaharda maksimum düzeye ulaşırken sonbaharda minimum düzeyde olduğu belirlenmiştir. Sülfat iyonu miktarı açısından ilkbahar ve yaz mevsimlerinin diğer mevsimlerden istatistiksel olarak farklı olduğu (<0.05) belirlenmiştir. Gaga Gölü'nde ortalama sülfat miktarı 4.33 mg/L (Taş, 2011) ve Eber Gölü'nde 113 mg/L (Gümüş & Akköz, 2020) olarak ölçülmüştür. Demirkıran ve Tekin-Özan (2025) Karakuyu Gölü'nde sülfat miktarının 0.09-3.45 mg/L arasında değiştiğini, sonbaharda en yüksek, yaz mevsiminde en düşük seviyede olduğunu bildirmişlerdir. Kovada Gölü'nde sülfat değeri 3.22-13.18 mg/L arasında değişmiştir (Bakioğlu-Acar, 2026). Bu çalışmada belirlenen sülfat anyonu değerleri tatlı sular için bildirilen değerlerle uyumludur. Çalışma alanında sülfat iyonunun ilkbahar ve yaz mevsimlerinde diğer mevsimlerden istatistiksel olarak farklılık göstermesi, mevsimsel yağışlar, yüzeysel akışlar ve biyolojik süreçlerle ilişkilendirilebilir. Literatürde farklı göllerde bildirilen sülfat değerleri, göllerin hidromorfolojik yapısı ve antropojenik baskı düzeyine bağlı olarak önemli farklılıklar gösterebilmektedir (Taş, 2011; Gümüş & Akköz, 2020; Demirkıran & Tekin-Özan, 2025; Bakioğlu-Acar, 2026). Sülfat konsantrasyonlarının yüksekliği genellikle göl çevresindeki tarımsal faaliyetler ile ilişkilendirilirken (Tepe, 2009; Gümüş & Akköz, 2020), bu çalışmada elde edilen düşük sülfat değerlerinin, çalışma alanında yoğun tarımsal baskının bulunmaması ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Sularda sülfat anyonu miktarının 250 mg/L'den fazla olması ciddi bir kirlenmenin söz konusu olduğunu göstermektedir (Nisbet & Verneaux, 1970).

Azotlu bileşikler sucul sistemlerde bulunan ve su kalitesinin belirlenmesinde kullanılan en önemli parametrelerdendir (Cüce vd., 2020). Nitrat organik azotun oksidasyonu sonucu oluşan son üründür ve suda oksijen miktarının azalmasına neden olmaktadır. Sulardaki önemli besin maddelerinden biri olmasına rağmen yüksek konsantrasyonlarda bulunduğunda canlılara toksik etki yapmakta ve ötrofikasyona neden olmaktadır (Tanyolaç, 2009; Göksu, 2014). Bu çalışmada yaz ve sonbaharda nitrat azotu miktarı analiz limitinin altında (<0.01) çıkmıştır. En yüksek nitrat azotu miktarı (0.526 mg/L) kış mevsiminde ölçülmüştür. İlkbahar mevsiminde ise nitrat azotu miktarının 0.19 mg/L olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada tüm mevsimlerde ve istasyonlarda amonyum azotu değeri analiz limitinin altında (<0.05) kalmıştır. Karakuyu Gölü'nde nitrat azotu miktarı tüm mevsimlerde analiz limitinin altında iken en yüksek değer kış mevsiminde 1.53 mg/L olarak ölçülmüştür (Demirkıran & Tekin-Özan, 2025). Işıklı Gölü'nde en yüksek nitrat azotu değerinin 4.02 mg/L olduğu tespit edilmiştir. Azotlu gübre kullanımı ve kanalizasyon atıklarının karışması sucul sistemlerde nitrat düzeyini artırmaktadır (Demir, 2011). Karacaören II Baraj Gölü'nde nitrat düzeyinin düşük seviyede olması göl etrafında yoğun bir tarımsal faaliyet ve yerleşim alanı olmaması ile ilgili olabilir.

Fosfor tatlı sularda biyolojik üretimi yönlendiren temel elementlerden biridir ve fosfat fosforu formunda bulunur. Doğadaki başlıca kaynağı kayaçlar ve fosfat yığınlarıdır. Göllere ise kayaçların ayrışması, gübreler, deterjanlar ve yüzeysel akışlar gibi kaynaklardan karışmaktadır (Wetzel, 2001; Göksu, 2014). Fitoplankton ve su bitkileri tarafından doğrudan kullanılabilir (Kutlu vd., 2015). Bu çalışmada tüm mevsimlerde ve istasyonlarda orto-fosfat fosforunun değeri analiz limitinin altında kalmıştır. Benzer şekilde Karakuyu Gölü'nde de orto-fosfat fosforunun değeri analiz limitinin altında tespit edilmiştir (Demirkıran & Tekin-Özan, 2025). Odioko ve Becer (2025) Karacaören I Baraj Gölü'nde fosfat fosforu miktarının 0.01-4.45 mg/L arasında değiştiğini ve ilkbaharda analiz limitinin altında olduğunu belirtmişlerdir. Tunç (2025) Işıklı ve Gökgöl Sulak Alanı'nda orto-fosfat fosforu miktarının en yüksek değerini 0.61 mg/L olarak belirlemiştir. Bazı istasyonlarda analiz limitinin altında olduğunu tespit etmiştir. Suya fosfat girdisinin en önemli kaynağının gübreler ve kanalizasyon artıkları olduğu düşünülürse Karacaören II Baraj Gölü'nün etrafında yoğun bir tarımsal faaliyetin olmaması ve büyük bir yerleşim merkezinin bulunmaması gölde orto-fosfat fosforunun analiz limitinin altında oluşunu açıklar niteliktedir.

WQI suyun genel kalitesi hakkında fikir veren bir derecelendirme sistemidir (Taş vd., 2021b). Karacaören II Baraj Gölü suyu WQI değerlerinin ilkbaharda 37.28, yaz mevsiminde 33.62, sonbaharda 35.63 ve kış mevsiminde ise 36.60 olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre Karacaören II Baraj Gölü tüm mevsimlerde mükemmel su kalitesi kategorisinde bulunmaktadır. Karakuyu Gölü'nde WQI değerleri 21.94-26.11 arasında değişmiş ve gölün mükemmel su kalitesi kategorisinde olduğu tespit edilmiştir (Demirkıran & Tekin-Özan, 2025). Tunç (2025) Işıklı ve Gökgöl Sulak Alanı'nın ortalama WQI değerlerinin mevsimlere göre 21.02 ve istasyonlara göre 22.40 olduğunu belirterek sulak alanın mükemmel su kategorisinde olduğunu bildirmiştir. Atasu Baraj Gölü havzasında gerçekleştirilen bir çalışmada ise WQI değerlerinin 95.45–96.56 arasında değiştiği ve havzanın tüm örnekleme noktalarının mükemmel su kalitesi sınıfında yer aldığı rapor edilmiştir (Gültekin & Hatipoğlu Temizel, 2025). Karacaören I Baraj Gölü'nün ortalama WQI değerinin 55.45 olduğu saptanmıştır (Odioko & Becer, 2025). Karacaören II Baraj Gölü'nün WQI değerlerine göre mükemmel su sınıfında olması gölde ölçülen bazı fizikokimyasal parametre değerlerinin EPA, EU, WHO ve TSE tarafından verilen içme suyu standartları içinde yer alması ile uyumludur (TSE, 2005; WHO, 2022; EPA, 2018; EU, 2020).

Karacaören II Baraj Gölü'nün suyunda belirlenen bazı fizikokimyasal parametrelerin birbirleri ile ilişkilerini belirlemek amacıyla Pearson Korelasyon Testi yapılmıştır. Buna göre sıcaklık ile çözünmüş oksijen, oksijen doygunluğu, elektriksel iletkenlik, klorür ve nitrat azotu miktarları arasında, pH ile çözünmüş oksijen, oksijen doygunluğu ve sülfat değerleri arasında negatif, çözünmüş oksijen ile biyokimyasal oksijen ihtiyacı arasında negatif, oksijen doygunluğu ile biyokimyasal oksijen ihtiyacı, sülfat ve nitrat azotu miktarları arasında negatif, elektriksel iletkenlik ile biyokimyasal oksijen ihtiyacı ve sülfat değerleri arasında negatif bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Diğer tüm ilişkilerin ise pozitif olduğu belirlenmiştir. Demirkıran ve Tekin-Özan (2025) Karakuyu Gölü'nde sıcaklık ile pH, elektriksel iletkenlik, çözünmüş oksijen, klorür ve sülfat arasında negatif bir ilişki olduğunu bildirmiştir. Kangabam vd. (2017), Loktak Gölü'nde sıcaklık ile nitrat arasında pozitif, biyokimyasal oksijen ihtiyacı arasında negatif bir ilişki olduğunu bildirmişlerdir. Sıcaklık arttıkça gazların sudaki çözünürlüğü azalmaktadır. Ayrıca oksijen doygunluğu suyun sıcaklığına bağlı olarak suyun oksijen tutma kapasitesi ile yakından ilgilidir. Sıcaklık artışına bağlı olarak çözünmüş oksijen ve oksijen doygunluğu değerinin azalışı limnolojik çalışmalarda yaygın olarak bildirilmektedir (Wetzel, 2001; Kalff, 2002). Temponeras vd. (2000), sucul sistemlerdeki elektriksel iletkenlik değerlerinin yağış miktarı ve jeolojik yapıyla ilişkili olduğunu bildirmiştir. Demirkıran ve Tekin-Özan (2025) Karakuyu Gölü'nde sıcaklık artışına karşılık elektriksel iletkenlik değerinin düşüşünü çalışma dönemindeki yoğun yağışlara bağlamıştır. Nitrat azotu düzeyinin sıcaklık artışıyla azalması nitratın bitkiler tarafından kullanılması nedeniyle olabilir. Sucul sistemlerde organik yükün arttığı dönemlerde ayrışma olayları nedeniyle oksijen miktarı azalırken CO_2 suya geçerek karbonat dengesi üzerinden suyun pH'ını etkilemektedir (Stumm & Morgan, 1996; Wetzel, 2001). Çözünmüş oksijen ve biyokimyasal oksijen ihtiyacı arasındaki negatif ilişki limnolojik çalışmalardaki klasik göstergelerden biridir. Ortamda ayrışmanın yoğun olduğu dönemde oksijen miktarı azalırken ayrıştırıcıların kullandığı oksijen miktarı da artış göstermektedir (Chapman, 1996; APHA, 2017). Nitrifikasyon sürecinde oksijen kullanıldığından bu süreç çözünmüş oksijen düzeyleriyle yakından ilişkilidir. Ayrıca organik maddelerin ayrışması sırasında oksijen miktarı azalırken sülfat miktarı da artmaktadır (Göksu, 2014).

Bu çalışmada elde edilen bulgular Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (2025) tarafından bildirilen SKKY'de belirtilen kriterlere göre değerlendirildiğinde, Karacaören II Baraj Gölü'nün tüm mevsimlerde su sıcaklığı, pH, biyokimyasal oksijen ihtiyacı, klorür iyonu ve sülfat anyonu değerlerine göre I. kalite sınıfında olduğu belirlenmiştir. Oksijen doygunluğu değerlerine göre yaz mevsiminde III. ve diğer mevsimlerde ise II. kalite sınıfında yer aldığı tespit edilmiştir. Nitrat azotu değerlerine göre kış mevsiminde II. kalite ve diğer mevsimlerde ise I. kalite sınıfında olduğu belirlenmiştir. Diğer veriler Tarım ve Orman Bakanlığı (2023) tarafından bildirilen YSKY'de belirtilen kriterlere göre değerlendirilmiştir. Buna göre Karacaören II Baraj Gölü elektriksel iletkenlik değerleri bakımından tüm mevsimlerde I. kalite ve çözünmüş oksijen değerleri açısından tüm mevsimlerde II. kalite sınıfında yer almıştır. Karacaören II Baraj Gölü suyunda ölçülen bazı fizikokimyasal parametre değerlerinin EU, EPA, WHO ve TS 266'da belirtilen içme suyu standartlarına göre kabul edilebilir değerler içerisinde yer aldıkları belirlenmiştir (TSE, 2005; EPA, 2018; EU, 2020; WHO, 2022). WQI sonuçlarına göre göl suyunun mükemmel su sınıfında olduğu belirlenmiştir. Genel değerlendirme yapıldığında Karacaören II Baraj Gölü'nün su kalitesinin çoğu parametre açısından iyi düzeyde olduğu ve ölçülen değerlerin büyük bölümünün yönetmelik ve standartlarla uyum gösterdiği görülmektedir. Özellikle sıcaklık, pH, biyokimyasal oksijen ihtiyacı, klorür ve sülfat değerleri

açısından gölde belirgin bir kirlilik baskısı tespit edilmemiştir. Ancak oksijen doygunluğu ve çözünmüş oksijen değerlerinde mevsimsel değişimlerin ortaya çıkması, özellikle yaz döneminde su kalitesinin daha yakından izlenmesi gerektiğine işaret etmektedir.

5. Sonuç

Bu çalışmada Karacaören II Baraj Gölü'nün mevsimsel su kalite özellikleri fizikokimyasal parametreler, Pearson korelasyon analizi ve WQI kullanılarak değerlendirilmiştir. Bulgular, göl suyunun çoğu parametre açısından yönetmelik ve içme suyu standartları ile uyumlu olduğunu ve genel olarak iyi kalite özellikleri gösterdiğini ortaya koymuştur. WQI sonuçlarına göre göl tüm mevsimlerde mükemmel su kalitesi sınıfında yer almıştır. Bununla birlikte çözünmüş oksijen ve oksijen doygunluğu değerlerinde görülen mevsimsel değişimler özellikle yaz döneminde su kalitesinin dikkatle izlenmesi gerektiğini göstermektedir.

Baraj gölleri, iklim değişikliği, azalan su seviyeleri, tarımsal faaliyetler ve çevresel baskılara karşı oldukça hassas ekosistemlerdir. Bu kapsamda Karacaören II Baraj Gölü'nün su kalitesinin korunması, potansiyel kirletici kaynakların sınırlandırılması ve ekolojik dengenin devamlılığının sağlanması önem arz etmektedir. Uzun dönemli izleme programlarının oluşturulması ve elde edilecek verilerin bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesi, gölün sürdürülebilir yönetimine katkı sağlayacaktır.

Teşekkür: Bu çalışma Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi (Proje no: FYL-2023-9097) tarafından desteklenmiştir. Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimine teşekkür ederiz.

Yazar katkısı: Selda Tekin Özan: Çalışmayı planlamış ve tasarlamış, arazi ve laboratuvar verilerini toplamış, analizlerini gerçekleştirmiş ve makaleyi yazmıştır.

Etik beyan: Bu çalışma insan veya hayvan deneyi içermediğinden etik kurul izni gerekmemektedir.

5. Kaynaklar

Abbasi, S.A. (2002). *Water quality indices, state of the art report*. Roorkee, India: Scientific Contribution Published, 73 s.

Abbasi, T., & Abbasi, S.A. (2012). Water-quality indices: looking back, looking ahead. In T. Abbasi & S.A. Abbasi (Eds.), *Water quality indices* (pp. 353–356). Amsterdam, Netherlands: Elsevier.

Ali, E.M., & Khairy, H.M. (2016). Environmental assessment of drainage water impacts on water quality and eutrophication level of Lake Idku, Egypt. *Environmental Pollution*, 216, 437–449. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.05.064

Alver, A., & Baştürk, E. (2019). Karasu Nehri su kalitesinin farklı su indeksleri açısından değerlendirilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(2), 488–497. https://doi.org/10.19113/sdufenbed.528611

APHA (American Public Health Association) (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). APHA, AWWA, WPCF, Washington.

Atıcı, T., Obalı, O., & Çalışkan, H. (2005). Control of water pollution and phytoplanktonic algal flora in Bayındır Dam Reservoir (Ankara). *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 22(1–2), 79–82.

Bakioğlu-Acar, B. (2026). Kovada Gölü ve Kovada Kanalı (Isparta)'nın makrofit florası, ekolojik kalite, ağır metal riskleri ve fitoremediasyon potansiyelinin değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, 398 s.

Bhateria, R., & Jain, D. (2016). Water quality assessment of lake water: a review. *Sustainable Water Resources Management*, 2, 161–173. https://doi.org/10.1007/s40899-015-0014-7

Boyd C.E. (1990). Water quality in ponds for aquaculture. Auburn: Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn University. 482 s.

Brown, R.M., McClelland, N.I., Deininger, R.A., & O'Connor, M.F. (1972). A water quality index: crashing the psychological barrier. In W.A. Thomas (Ed.), *Indicators of environmental quality* (pp. 173–182). Heidelberg, Germany: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2856-8_15

Brown, R.M., McClelland, N.I., Deininger, R.A., & Tozer, R.G. (1970). A water quality index: do we dare? *Water and Sewage Works*, 117(10), 339–343.

Bulut, C., Atay, R., Uysal, K., & Köse, E. (2011). Karakuyu Gölü (Afyon) yüzey suyu kalitesindeki mevsimsel değişimlerin değerlendirilmesi. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24, 1–8.

Chapman, D. (1996). *Water quality assessments*. UNESCO/WHO/UNEP. CRC Press, 60 p.

Chaturvedi, M.K., & Bassin, J.K. (2009). Assessing the water quality index of water treatment plant and bore wells in Delhi, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 163(1–4), 449–453. https://doi.org/10.1007/s10661-009-0848-2

Chen, M., Li, X.H., He, Y.H., Song, N., Cai, H.Y., Wang, C., & Jiang, H.L. (2016). Increasing sulfate concentrations result in higher sulfide production and phosphorous mobilization in a shallow eutrophic freshwater lake. *Water Research*, 96, 94–104. https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.03.030

Cude, C. (2001). Oregon water quality index: a tool for evaluating water quality management effectiveness. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(1), 125–137. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb05480.x

Cüce, H., Kalıpcı, E., Taş, B., & Yılmaz, M. (2020). Rakım farklılığı nedeniyle oluşan meteorolojik değişimlerin su kalitesine olan etkilerinin CBS ile değerlendirilmesi: morfolojik olarak farklı iki göl için bir karşılaştırma. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 10(1), 1–26. https://doi.org/10.31466/kfbd.649297

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (2025). Su kirliliği kontrol yönetmeliğinde değişiklik yapılmasına dair yönetmelik. Erişim adresi: https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2025/10/20251023-3.htm (Erişim tarihi: 10 Ocak 2026).

Debels, P., Figueroa, R., Urrutia, R., Barra, R., & Niell, X. (2005). Evaluation of water quality in the Chillán River (Central Chile) using physicochemical parameters and a modified water quality index. *Environmental Monitoring and Assessment*, 110, 301–322. https://doi.org/10.1007/s10661-005-8064-1

Demir, H. (2011). Tarımsal kaynaklı nitrat kirliliği ve olumsuz etkileri. Uluslararası Katılımlı I. Ali Numan Kıraç Tarım Kongresi ve Fuarı, Eskişehir, Türkiye.

Demirkıran, E., & Tekin-Özan, S. (2025). Karakuyu Gölü (Afyonkarahisar) su kalitesinin bazı indeks ve istatistiksel analizler kullanılarak belirlenmesi. *LimnoFish*, 11(1), 38–54. https://doi.org/10.17216/limnofish.1495007

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (2024). Karacaören-2 Barajı ve hidroelektrik santrali. https://www.dsi.gov.tr

Duncan, D.B. (1955). Multiple range and multiple F tests. *Biometrics*, 11(1), 1–42. https://doi.org/10.2307/3001478

Ersoy, A.F., & Tonde, B.S. (2025). Ordu ili yüzey suyu kaynaklarının kalitesinin farklı su kalite indeksleri ile değerlendirilmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi,* 15(3), 854-865. https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1654193

EU (European Union) (2020). Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption. Erişim adresi: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj/eng (Erişim tarihi: 22 Ocak 2026).

Fisher, R.A. (1928). The general sampling distribution of the multiple correlation coefficient. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 121(788), 654–673. https://doi.org/10.1098/rspa.1928.0224

Gleick, P.H. (1996). Basic water requirements for human activities: meeting basic needs. *Water International*, 21(2), 83–92. https://doi.org/10.1080/02508069608686494

Göksu, M.Z.L. (2014). *Su kirliliği.* Ankara: Akademisyen Kitabevi, 200 s.

Gölbaşı, S., & Şen, B. (2019). Atatürk Baraj Gölü'ne dökülen Kahta Çayı'nın (Adıyaman) su kalitesi. *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 36(4), 337–346. https://doi.org/10.12714/egejfas.36.4.04

Gültekin, F., & Hatipoğlu Temizel, E. (2025). Atasu Barajı havzasının (Maçka-Trabzon) su kalitesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 31(2), 288-301. https://doi.org/10.5505/pajes.2024.65712

Gümüş, N.E. (2021). Akarçay Akarsuyu (Afyonkarahisar) su kalitesi ve ağır metal kirliliğinin belirlenmesi. *Anadolu Çevre ve Hayvancılık Bilimleri Dergisi*, 6(1), 120–127. https://doi.org/10.35229/jaes.839147

Gümüş, N.E., & Akköz, C. (2020). Eber Gölü (Afyonkarahisar) su kalitesinin araştırılması. *LimnoFish*, 6(2), 153–163. https://doi.org/10.17216/limnofish.638567

Horton, R.K. (1965). An index number system for rating water quality. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 37, 300–306.

Imneisi, I.B., & Aydın, M. (2016). Water quality index (WQI) for main source of drinking water (Karaçomak Dam) in Kastamonu City, Türkiye. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 6(5), 1–8. https://doi.org/10.4172/2161-0525.1000407

Jindal, R., Thakur, R.K., Singh, U.B., & Ahluwalia, A.S. (2014). Phytoplankton dynamics and water quality of Prashar Lake, Himachal Pradesh, India. *Sustainable Water Quality and Ecology*, 3–4, 101–113. https://doi.org/10.1016/j.swaqe.2014.12.003

Kalff, J. (2002). *Limnology: inland water ecosystems*. New Jersey: Prentice Hall, 592 p.

Kangabam, R.D., Bhoominathan, S.D., Kanagaraj, S., & Govindaraju, M. (2017). Development of a water quality index (WQI) for the Loktak Lake in India. *Applied Water Science*, 7, 2907–2918. https://doi.org/10.1007/s13201-017-0579-4

Khan, A.A., Paterson, R., & Khan, H. (2003). Modification and application of the CCME WQI for the communication of drinking water quality data in Newfoundland and Labrador. 38th Central Symposium on Water Quality Research, Burlington, Canada.

Kocataş, A. (2008). *Ekoloji çevre biyolojisi* (10. Baskı). İzmir: Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Ders Kitapları Serisi, 585 s.

Kutlu, B., Sesli, A., Tepe, R., & Mutlu, E. (2015). Assessment of physico-chemical water quality of Birecik Dam, Şanlıurfa, West East Region, Turkey. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 3(7), 623–628. https://doi.org/10.24925/turjaf.v3i7.623-628.423

Kükrer, S., & Mutlu, E. (2019). Assessment of surface water quality using water quality index and multivariate statistical analysis in Saraydüzü Dam Lake, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(2), 1–16. https://doi.org/10.1007/s10661-019-7197-6

Lumb, A., Sharma, T.C., & Bibeault, J.F. (2011). A review of genesis and evolution of water quality index (WQI) and some future directions. *Water Quality, Exposure and Health*, 3, 11–24. https://doi.org/10.1007/s12403-011-0040-0

Nisbet, M., & Verneaux, J. (1970). Composants chimiques des eaux courantes: discussion et propositions des classes en tant que base d'interprétation des analyses chimiques. *Annales de Limnologie*, 6(2), 161–190.

Odioko, E., & Becer, Z.A. (2025). Evaluation of the seasonal changes associated with the water quality of Karacaören I Dam Lake using water quality index (WQI) method. *Aquaculture Studies*, 25(6), 335–344. https://doi.org/10.4194/AQUAST2446

Odum, E.P., & Barrett, G.W. (2008). *Ekolojinin temel ilkeleri*. Ankara: Palme Yayıncılık, 624 s.

Özçelik, Ş., & Tekin-Özan, S. (2024). Evaluation of selected heavy metal and selenium pollution in water and sediments of Lake Eğirdir (Isparta/Türkiye) using statistical analysis and pollution indices. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 53(2), 186–207. https://doi.org/10.26881/oahs-2024.2.09

Özer, Ç., & Köklü, R. (2019). Aşağı Sakarya Nehri su kalitesinin sulama suyu açısından değerlendirilmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 5(2), 237–246. https://doi.org/10.21324/dacd.483146

Pearson, K. (1992). On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling. In S. Kotz & N.L. Johnson (Eds.), *Breakthroughs in statistics volume II: methodology and distribution*. New York: Springer, 628 s.

Sancer, O., & Tekin-Özan, S. (2016). Seasonal changes of metal accumulation in water, sediment and *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel growing in Lake Kovada (Isparta, Türkiye). *Süleyman Demirel Üniversitesi Journal of Science*, 11(2), 45-60.

Stumm, W., & Morgan, J.J. (1996). *Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters*. New York: Wiley-Interscience, 1005 p.

Sutadian, A.D., Muttil, N., Yılmaz, A.G., & Perera, B.J.C. (2016). Development of water quality indices: a review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188, 58. https://doi.org/10.1007/s10661-015-5050-0

Şener, E., Şener, Ş., & Bulut, C. (2023). Assessment of heavy metal pollution and quality in lake water and sediment by various index methods and GIS: a case study in Beyşehir Lake, Turkey. *Marine Pollution Bulletin*, 192, 115101. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115101

Şener, Ş., & Şener, E. (2022). Tavşanlı (Kütahya) Ovası yüzey sularının hidrojeokimyası ve su kalite indeks (WQI) yöntemi ile su kalitesinin değerlendirilmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10(2), 380–391. https://doi.org/10.21923/jesd.1017100

Taner, M.Ü. (2007). Development of water quality index as a sustainability indicator in Küçükçekmece watershed, Istanbul. Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, 114 s.

Tanyolaç, J. (2009). *Limnoloji: tatlı su bilimi* (5. Baskı). Ankara: Hatiboğlu Yayıncılık, 294 s.

Tarım ve Orman Bakanlığı (2023). Yerüstü su kalitesi yönetmeliğinde değişiklik yapılmasına dair yönetmelik. Erişim adresi: https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2021/06/20210616-1.htm (Erişim tarihi: 10 Ocak 2026).

Taş, B. (2011). Gaga Gölü (Ordu, Türkiye) su kalitesinin incelenmesi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 2(1), 43–61.

Taş, B., Aydın, G., & Tepe, Y. (2021a). Surface water quality assessment using water quality index and multivariate statistical methods. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, 87. https://doi.org/10.1007/s10661-021-08843-8

Taş, B., Yılmaz, Ö., & Ustaoğlu, F. (2021b). Ilıman bir Türkiye nehir havzasında dere su kalitesinin çok değişkenli analiz ve biyolojik yaklaşımlarla değerlendirilmesi. *Acta Aquatica Turcica*, 17(1), 34–55. https://doi.org/10.22392/actaquatr.751773

Tekin-Özan, S., Tunç, M., & Bakioğlu-Acar, B. (2024). Evaluation of heavy metals and selenium pollution in Karataş Lake (Burdur/Turkey) using various pollution indices and statistical analysis. *Marine Pollution Bulletin*, 199, 115927. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115927

Temponeras, M., Kristiansen, J., & Moustaka-Gouni, M. (2000). Seasonal variation in phytoplankton composition and physical-chemical features of the shallow Lake Doirani, Macedonia, Greece. *Hydrobiologia*, 424(1), 109–122. https://doi.org/10.1023/A:1003909229980

Tepe, Y. (2009). Reyhanlı Yenişehir Gölü (Hatay) su kalitesinin belirlenmesi. *Ekoloji*, 18(70), 38–46. https://doi.org/10.5053/ekoloji.2009.706

Tokatlı, C. (2020). Water quality assessment of Ergene River Basin using multivariate statistical analysis. *LimnoFish*, 6(1), 38–46. https://doi.org/10.17216/limnofish.524036

Tunç, M. (2025). Işıklı (Çivril) ve Gökgöl Sulak Alanı (Denizli)'nın makrofit florası, ekolojik kalite, ağır metal riskleri ve fitoremediasyon potansiyelinin değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, 526 s.

TSE (Türk Standardları Enstitüsü) (2005). Sular - insani tüketim amaçlı sular - TS266. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü, 20 s.

Uddin, G.M., Nash, S., & Olbert, A.I. (2021). A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological Indicators*, 122, 107218. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218

Ulusoy, M. (2023). Aksu Çayı üst havzası yüzey sularının hidrojeokimyasal özellikleri ve su kalitesinin belirlenmesi. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, 254 s.

UNESCO (2020). *The United Nations world water development report 2020: water and climate change*. UNESCO Publishing. https://unesdoc.unesco.org/

EPA (United States Environmental Protection Agency) (2018). 2018 edition of the drinking water standards and health advisories tables. Erişim adresi: https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-01/dwtable2018.pdf (Erişim tarihi: 22 Ocak 2026).

United States Geological Survey (2023). How much water is there on Earth? https://www.usgs.gov/water-science-school/science/how-much-water-there-earth

UN-Water (2018). Sustainable development goal 6: synthesis report on water and sanitation 2018. https://www.unwater.org/

Ünlü, A., Çoban, F., & Tunç, M.S. (2008). Hazar Gölü su kalitesinin fiziksel ve inorganik-kimyasal parametreler açısından incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(1), 119–127.

Varol, M. (2020). Spatio-temporal changes in surface water quality and sediment phosphorus content of a large reservoir in Turkey. *Environmental Pollution*, 259, 113860. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113860

Varol, S., & Ulusoy, M. (2023). Karacaören Baraj Gölleri ve çevresi için standartlaştırılmış yağış indeksi (SYİ) yöntemi ile kuraklık sınıflaması ve etkisinin belirlenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11(3), 1142–1153.

Wetzel, R.G. (2001). *Limnology*. United States: Academic Press, 1006 s.

WHO (World Health Organization) (2022). Guidelines for drinking-water quality (4th ed., incorporating the first addendum). Erişim adresi: https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/254637/9789241549950-eng.pdf?sequence=1 (Erişim tarihi: 03 Temmuz 2024).

Wu, Z., Wang, X., Chen, Y., Cai, Y., & Deng, J. (2018). Assessing river water quality using water quality index in Lake Taihu Basin, China. *Science of the Total Environment*, 612, 914–922. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.293

Xiao, J., Wang, L., Deng, L., & Jin, Z. (2019). Characteristics, sources, water quality and health risk assessment of trace elements in river water and well water in the Chinese Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 650, 2004–2012. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.322