

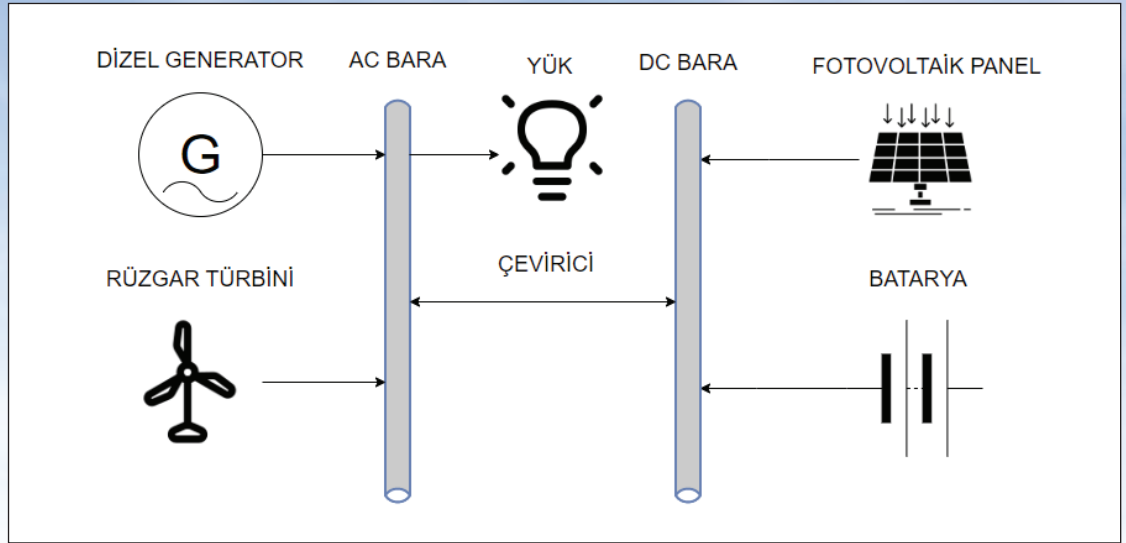


Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Tarafından Yayınlanmaktadır

Published by the Zonguldak Bülent Ecevit University

Karaelmas Science and Engineering Journal



- ❑ Killi Zeminler için Ankrajlı Duvar Analizlerinde Parametrik Bir Çalışma
- ❑ Gıda Takviyesine Giden Yolda *Gynostemma pentaphyllum* (Thunb.) Makino Bitkisi Üzerinde Ön Çalışmalar: Antidiyabetik Aktivite ve Fitokimyasal Analizler
- ❑ Sakarya Nehri Havzasında Yağış ve Yüzeysel Akış Rejiminin Mevcut Potansiyeli ve Eğilimi
- ❑ VDCC Tabanlı Elektronik Olarak Kontrol Edilebilir İkinci Dereceden Filtre
- ❑ Elektrokaplama Yöntemiyle TiO_2 Fotoanotların Boya Duyarlı Güneş Pili Uygulamaları
- ❑ Time Series and Machine Learning Methods for Estimating Missing Meteorological Data: The Western Black Sea Basin Case
- ❑ Accurate, Simple and Rapid Determination of Climbazole as Fungicide in Tap Water Samples by Gas Chromatography-Mass Spectrometry
- ❑ Türkiye'deki *Biarum* Cinsine Ait Türlerin Kloroplast TrnI/TrnF Igs (Intergenic Spacer) Dizilimlerine Dayalı Filogenetik Analizi
- ❑ Hibrit Enerji Sistemlerine Dayalı Mikro-Şebeke Tasarımı ve Optimizasyonu: Zonguldak-Elvanpazarcık Uygulaması
- ❑ Askıda Katı Madde Konsantrasyonunun Tahmininde Yığılma Modelleri ve Hiperparametre Optimizasyonunun Etkisi: Filyos Çayı Örneği
- ❑ *Melissa officinalis* Fidelerinin Gelişimi ve Rizosfer Özelliklerine Bokashi Gübresi Dozlarının Etkisi
- ❑ Microwave-Cured Pervious Geopolymer Concrete: Role of Aggregate Gradation
- ❑ Yüksek Plastisiteli Killerin Konsolidasyon Katsayısının Hesaplanması İçin Mevcut Yöntemlerin Karşılaştırılması

Cilt / Volume: 15
Sayı / Number: 2
Temmuz / July 2025

ISSN: 2146-4987
E-ISSN: 2146-7277



<https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen>
<https://dergipark.org.tr/en/pub/karaelmasfen>

**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 <i>Owner on Behalf of Zonguldak Bülent Ecevit University</i>	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/ <i>Redaction and Technical Support</i>	Salih ERDEM Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Havva KARAHAN Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen 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, Bahriye Üçok Cad. 9/1 06500 Beşevler, Ankara, Tel: +90 312 222 44 06 Faks: +90 312 222 44 07 www.bulustasarim.com.tr
Yayın Türü/Publication Type	Yerel Süreli / <i>Periodical</i> Yılda üç sayı yayımlanır: Nisan, Temmuz, Kasım <i>Published three issues per year: April, July, November</i> ISSN: 2146-4987
E-posta /Email	havvaatar@beun.edu.tr

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



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.

Yayın 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 complimentary 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.



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:

- Türkçe makalelerde

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

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

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



Başlık: Metin ile uyumlu, kısa ve anlaşılır olmalıdır. Ortalanmış olarak, sadece ilk 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 ortalananmış 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 kelimeden 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 kelimeden 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 şekilde verilmelidir. Daha önce yapılmış referanslar ile desteklenmelidir. İstatistiksel 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 editöryal (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:

1. Türkçe Makalelerde:

Tek yazarlı çalışma (Aliskan 2021). İki yazarlı çalışma (Yıldırım ve 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, 2022b) şeklinde olmalıdır.

Herhangi bir kaynaktan alıntı yapılmışsa: Karahan ve 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 and Topaloğlu 2018). Herhangi bir kaynaktan alıntı yapılmışsa.... according to Ünlü and 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 veriliş şekilleri aşağıdaki gibidir:

Kaynaklar alfabetik sıraya göre yazılmalıdır.

Makale:

Tek yazarlı

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

İki yazarlı

Eker Şanlı, G., Tasdemir, Y. 2022. Accumulations and temporal trends of polychlorinated biphenyls (PCBs) in olive tree components. Environ. Geochem. Health., 44(8): 2577-2594. Doi:10.1007/s10653-021-01046-2

Yaralı, O., Duru, H. 2016. Investigation into effect of scratch length and surface condition on Cerchar abrasivity index. Tunn. Undergr. Space Technol., 60: 111-120. Doi: 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. Med. J. West Black Sea, 6(1): 16-23. Doi: 10.29058/mjwbs.1016783

Erkaymaz, O., Yapici, İ.S., Uzun Arslan, R. 2021. Effects of obesity on time-frequency components of electroretinogram signal using continuous wavelet transform. Biomed. Signal Process Control, 66: 102398. Doi: 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 izolatlarda antimikrobiyal etkinliğinin araştırılması. Batı Karadeniz Tıp Dergisi, 7(1): 57-65. Doi: 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, FH., Choi, MJ., Angeli, LL., Harland, AA., Stamos, JA., Thomas, ST., ... Rubin, LH. 2009. Web site usability for the blind and low-vision user. Technical Communication, 57: 323-335.

Kitap:

Reşat, U. 2001. Uygulamalı jeoteknik bilgiler. 4. Basım, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Nitelik Matbaacılık, Ankara, 385 s. Sanford, RJ. 2003.

Principles of fracture mechanics, Prentice Hall, Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, USA, 404 pp.

Kitapta Bölüm:

Atar, H., Çölgeçen, H. 2020. Bioactive compounds of oregano seeds. Victor R. Preedy, Ronald Ross Watson [eds.], Nuts & Seeds in Health and Disease Prevention (2nd ed.). Oxford: Academic Press is an imprint of Elsevier, London, San Diego, Cambridge, pp. 73-77.

Rapor:

Makarewicz, JC., 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 (internette alının 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, MA. 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 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 büyütme 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 ($\text{ort} \pm \text{SE}$; $\text{ort} \pm \text{SD}$, vb.) gibi olmalıdır.

Denklemler: Matematiksel ifadeler Cambria Math yazı stili ile "Equation Editor" (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.

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/m³, g/cm², m/sn, g/m³, 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 Yazım Kontrol Listesi

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?



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 sağlama, 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 vermemelidir.
- 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 editöryal 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 vermemelidir.
- 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.



- 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>



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 editöryal 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 editöryal içeriği ve bu içeriğin yayınlama 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/bağılantılardan 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.

Soruşturmalarla 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

Editöryal kararlara katkı

Akran incelemesi editörlerin editöryal kararlar almalarına yardımcı olur ve yazarlarla editöryal 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 önemini objektif bir tartışmasını sunmalıdır. Yazı, başkalarının eseri çoğaltmasına izin verecek yeterli ayrıntı ve referanslar içermelidir. İnceleme makaleleri doğru, objektif ve kapsamlı olmalı, editöryal '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 editöryal inceleme için yazı ile birlikte sağlamaları istenebilir ve uygulanabilirse verileri kamuya açık



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 davranışdır 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 yansıtmaması 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 yayınlarla 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 başvuru 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.



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 ORCID's 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
- ORCID's of all authors (Authors' ORCID's 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):



Table 1: The Plan of Full Text Page

The Plan of the Full Text Page	
English Title (12 punto)	<i>Türkîsh Title (İtalik 12 punto)</i>
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 literature, 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:

1. In Turkish Paper:

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

2. In English Paper:

- One author (Aliskan 2021). Two authors (Yıldırım and Topaloğlu 2018). If any source is cited: According to Ünlü and 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

- Eker Şanlı, G., Tasdemir, Y. 2022. Accumulations and temporal trends of polychlorinated biphenyls (PCBs) in olive tree components. Environ. Geochem. Health., 44(8): 2577-2594. Doi:10.1007/s10653-021-01046-2
- Yaralı, O., Duru, H. 2016. Investigation into effect of scratch length and surface condition on Cerchar abrasivity index. Tunn. Undergr. Space Technol., 60: 111-120. Doi: 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. Med. J. West Black Sea, 6(1): 16-23. Doi: 10.29058/mjwbs.1016783
- Erkaymaz, O., Yapıcı, İ.S., Uzun Arslan, R. 2021. Effects of obesity on time-frequency components of electroretinogram signal using continuous wavelet transform. Biomed. Signal Process Control, 66: 102398. Doi: 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. Doi: 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, FH., Choi, MJ., Angeli, LL., Harland, AA., Stamos, JA., Thomas,



ST., . . . Rubin, LH. 2009. Web site usability for the blind and low-vision user. Technical Communication, 57: 323-335.

Book:

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

Chapter:

- Atar, H., Çölgeçen, H. 2020. Bioactive compounds of oregano seeds. Victor R. Preedy, Ronald Ross Watson [eds.], Nuts & Seeds in Health and Disease Prevention (2nd ed.). Oxford: Academic Press is an imprint of Elsevier, London, San Diego, Cambridge, pp. 73-77.

Report:

- Makarewicz, JC., 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:

- TÜİK 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/> şeklinde belirtilmelidir.

In press:

- Evans, MA. 2023. Article Title. Journal. (DOI).

A Thesis:

- Duru, H. 2020. Geliştirilen cerchar aşındırıcılık deney aletiyle kayaların 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 embeded 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.

Standart 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 standart errors or deviations must be cited as (means $\pm$ SD, or means $\pm$ SE).

Equations:

Mathematical expressions should be written by an "Equation Editör" (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 cited as below:

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

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/m³, g/cm², m/sn, g/m³, 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.



ETHICAL PRINCIPLES

Official journal of Zonguldak Bülent Ecevit University, Karaelmas Science and Engineering Journal is 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).



- 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>



PUBLICATION ETHICS

The ethics statement of the Karaelmas Science and Engineering Journal 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 refuse 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



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.



İÇİNDEKİLER

Araştırma Makaleleri

Killi Zeminler için Ankrajlı Duvar Analizlerinde Parametrik Bir Çalışma.....	1
Alperen Cevahir, Banu Yağcı	
Gıda Takviyesine Giden Yolda <i>Gynostemma pentaphyllum</i> (Thunb.) Makino Bitkisi Üzerinde Ön Çalışmalar: Antidiyabetik Aktivite ve Fitokimyasal Analizler	15
Methiye Mancak, Fatma Zeynep Uzuner, Ufuk Koca Çalışkan	
Sakarya Nehri Havzasında Yağış ve Yüzeysel Akış Rejiminin Mevcut Potansiyeli ve Eğilimi	22
Recep Emre Çakmak	
VDCC Tabanlı Elektronik Olarak Kontrol Edilebilir İkinci Dereceden Filtre	36
Hasan Sözen	
Elektrokaplama Yöntemiyle TiO ₂ Fotoanotların Boya Duyarlı Güneş Pili Uygulamaları.....	43
Soner Çakar	
Eksik Meteorolojik Verilerin Zaman Serisi ve Makine Öğrenmesi Yöntemleri Kullanılarak Tahmin Edilmesi: Batı Karadeniz Havzası Örneği.....	54
Yusuf Kaya, Berna Aksoy, İsmail Hakkı Özölçer	
Gaz Kromatografisi-Kütle Spektrometresi ile Musluk Suyu Örneklerinde Fungisit Olarak Klimbazölün Doğru, Basit ve Hızlı Tayini.....	68
Tuğçe Göver	
Türkiye'deki <i>Biarum</i> Cinsine Ait Türlerin Kloroplast TrnI/TrnF İgs (Intergenic Spacer) Dizilimlerine Dayalı Filogenetik Analizi	76
Cahit Çeçen, Arif Parmaksız, Hasan Akan	
Hibrit Enerji Sistemlerine Dayalı Mikro-Şebeke Tasarımı ve Optimizasyonu: Zonguldak-Elvanpazarcık Uygulaması	83
Nihat Pamuk	
Askıda Katı Madde Konsantrasyonunun Tahmininde Yığma Modelleri ve Hiperparametre Optimizasyonunun Etkisi: Filyos Çayı Örneği.....	97
Rukiye Uzun Arslan, Berna Aksoy, İrem Şenyer Yapıcı	
Melissa officinalis Fidelerinin Gelişimi ve Rizosfer Özelliklerine Bokashi Gübresi Dozlarının Etkisi	109
Çiğdem Küçük, Göksal Sezen, Abdul Cenap Cevheri	
Mikrodalga Kürü ile Üretilen Geçirimli Geopolimer Beton: Agrega Gradasyonunun Rolü	117
Adil Gultekin	
Yüksek Plastisiteli Killerin Konsolidasyon Katsayısının Hesaplanması İçin Mevcut Yöntemlerin Karşılaştırılması	132
Dilek Cansu Bozacıoğlu, Ömer Faruk Çapar, Ertan Bol	



CONTENTS

Research Articles

- A Parametric Study on Anchored Wall Analysis for Soils with Clay** 1
Alperen Cevahir, Banu Yağcı
- Preliminary Studies on *Gynostemma pentaphyllum* (Thunb.) Makino toward Dietary Supplement Development: Antidiabetic Activity and Phytochemical Analysis** 15
Methiye Mancak, Fatma Zeynep Uzuner, Ufuk Koca Çalışkan
- The Present Potential and Trend of Precipitation and Runoff Regime in the Sakarya River Basin** 22
Recep Emre Çakmak
- VDCC Based Electronical Controllable Second Order Filter** 36
Hasan Sözen
- Dye-Sensitized Solar Cell Applications of TiO₂ Photoanodes by Electrocoating Method** 43
Soner Çakar
- Time Series and Machine Learning Methods for Estimating Missing Meteorological Data: The Western Black Sea Basin Case** 54
Yusuf Kaya, Berna Aksoy, İsmail Hakkı Özölçer
- Accurate, Simple and Rapid Determination of Climbazole as Fungicide in Tap Water Samples by Gas Chromatography-Mass Spectrometry** 68
Tuğçe Göver
- Phylogenetic Analysis of Species of the *Biarum* Genus in Turkey Based on Chloroplast TrnL/TrnF Igs (Intergenic Spacer) Sequences** 76
Cahit Çeçen, Arif Parmaksız, Hasan Akan
- Design and Optimization of a Microgrid Based on Hybrid Energy Systems: A Case Study in Zonguldak-Elvanpazarcık** 83
Nihat Pamuk
- The Impact of Stacking Models and Hyperparameter Optimization on the Prediction of Suspended Solid Concentration: A Case Study of Filyos Stream** 97
Rukiye Uzun Arslan, Berna Aksoy, İrem Şenyer Yapıcı
- The Effect of Bokashi Fertilizer Doses on the Growth and Rhizosphere Characteristics of *Melissa officinalis* Seedlings** 109
Çiğdem Küçük, Göksal Sezen, Abdul Cenap Cevheri
- Microwave-Cured Pervious Geopolymer Concrete: Role of Aggregate Gradation** 117
Adil Gultekin
- Comparison of Existing Methods for Calculating the Coefficient of Consolidation of High Plasticity Clays** 132
Dilek Cansu Bozacıoğlu, Ömer Faruk Çapar, Ertan Bol



Killi Zeminler için Ankrajlı Duvar Analizlerinde Parametrik Bir Çalışma

A Parametric Study on Anchored Wall Analysis for Soils with Clay

Alperen Cevahir¹ , Banu Yağcı^{2*} 

¹Maksoy İnşaat Taah. San. Tic. Ltd. Şti., 34515, İstanbul, Türkiye

²Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Balıkesir, Türkiye

Öz

Geoteknik mühendisliği uygulamalarında, killi zeminler söz konusu olduğunda farklı nedenlerle öngörülemeyen belirsizliklerle karşılaşılabilir. Bu açıdan, killi zeminlerin doğru parametrelerle temsil edilebilmesi ve davranışı için uygun malzeme modellerinin belirlenmesi, kritik önem taşıyan bir konudur. Bu çalışmada, iri ve ince dane oranlarının birbirine yakın olduğu ve bu sebeple CL, ML, SC, SM sınıflarında dağılımın gözlemlendiği bir bölgeyi temsilen killi zeminler için çok sıra ankrajlı bir destek sistemi analiz edilmiştir. Sistemin deformasyonları farklı analiz yöntemlerini kullanan yazılımlar ile hesaplanmış ve bu deformasyonların hangi koşullarda karşılaştırılabilir olacağını açıklamaya yönelik parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Sistemin boyutlandırması Geo5 programı ile yapılmış ve zemin sınıfındaki farklılıkların etkisi karşılaştırılmıştır. Plaxis programı ile gerçekleştirilen deformasyon analizlerinde, zemin malzeme modelinin ve grafik model sınırlarının etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, kullanılan zemin malzeme modelinin sistemin gerçekçi davranışı üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Diğer yandan grafik model sınırlarının, zemin malzeme modeline göre farklı etki yaratabildiği ve analizlerimizde dikkat edilmesi gereken önemli bir husus olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deformasyon analizi, derin kazı destek sistemi, zemin malzeme modeli.

Abstract

In geotechnical engineering applications, unpredictable uncertainties may be encountered for clayey soils for different reasons. In this respect, representing clayey soils with correct parameters and determining appropriate material models for their behaviour is a critical issue. In this study, a multi-row anchored support system was analysed for clayey soils, representing a region where coarse and fine grain ratios are close to each other and therefore distribution in CL, ML, SC, SM classes is observed. The deformations of the system were calculated with software using different analysis methods and parametric analyses were performed to explain under what conditions these deformations would be comparable. Dimensioning of the system was done with the Geo5 program and the effects of differences in soil class were compared. In the deformation analyses performed using the Plaxis program, the effects of the soil material model and graphic model boundaries were investigated. Results showed that the soil material model used had a very significant effect on the realistic behaviour of the system. On the other hand, it was determined that the graphic model boundaries could create different effects compared to the soil material model and that this was an important issue to be considered in the analyses.

Keywords: Deformation analysis, deep excavation support system, soil material model

1. Giriş

Bu çalışmanın içeriği, çok sıra ankrajlı bir destek sistemi için killi zeminlere sahip bir bölgeyi temsilen gerçekleştirilen parametrik analizlerdir. Derin kazı problemlerinde, yetersiz

veri ile modelleme yapma zorunluluğunun bir sonucu olarak zemin parametrelerinin doğru bir şekilde temsil edilemesi sebebiyle parametrik çalışmalar yapılmaktadır (Vural ve Işık 2019, Şahin ve Tonaroğlu 2016, Kökten vd. 2018). Diğer yandan sayısal analizler için, zemin-yapı etkileşimini göz önüne alan farklı analiz yöntemlerinin ve yazılımların mevcut olması da parametrik çalışmaların bir diğer nedeni olarak düşünülebilir (Engin 2012). Bir başka gerekçe de farklı geoteknik uygulamalarda farklı parametrelerin önem kazanmasının beklenmesidir (Kökten vd. 2018, Aslan ve Yağcı 2018a, Aslan ve Yağcı 2018b).

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: byagci@balikesir.edu.tr

Alperen Cevahir  orcid.org/0000-0003-1423-4214

Banu Yağcı  orcid.org/0000-0002-3261-2680



Derin kazı tasarımlarında, emniyet ve ekonominin optimum seviyede kullanılması; uygun sistem seçimi ile seçilen sistemin ve özellikle zemin koşullarının gerçeğe yakın şekilde modellenmesi sonucu mümkün olmaktadır (Alam et al. 2020). Bu durumda derin kazı analizlerinde zemin parametrelerinin ve malzeme modellerinin seçimi kritik önem taşımaktadır (Kökten vd. 2018, Aslan ve Yağcı 2018a, Aktaş vd. 2018). Projelendirmede göz önüne alınan parametrelerin sınırlı sayıda zemin araştırmalarına dayandırılması sonucu öngörülme belirsizlikler ile karşılaşılabilir. Özellikle killi zeminlerin yol açtığı sorunlara geoteknik mühendisliği uygulamalarında sıkça rastlanmaktadır (Mollamahmutoğlu vd. 2021). Diğer yandan zemin araştırmalarının yeterli olduğu durumlarda dahi, killi zeminlerin sınıflandırılması aşamasında, kıvam limitleri için örnek hazırlama yöntemi ile likit limit deney yönteminden kaynaklanan farkların USCS'e göre belirlenen zemin sınıflarının değişmesine yol açabileceği saptanmıştır (Özer 2008, Orhan vd. 2006).

Derin kazılarda ankraj kullanımının özellikle 5 m derinlikten sonra önem kazandığı bilinmektedir ve çoğunluğu killi, siltli zeminlerin (CL-ML-SM-CH) oluşturduğu kesitler üzerinde gerçekleştirilen parametrik bir çalışma ile de ortaya konmuştur (Fenerci 2010). Aynı zamanda kil zeminlerde derin kazılarla ilgili çok sayıda vaka analizi datasına dayalı ampirik bir çalışmanın (Moormann 2004) sonuçları, çok sıra ankrajlı ve içten destekli duvarlar arasında duvar yanıl deplasmanı açısından çok fark olmadığını göstermektedir. Bu doğrultuda zemin malzeme modeli için literatür taramasında, çok sıra ankrajlı sistemler ve içten destekli sistemler birlikte göz önüne alınabilir.

Kil zeminin etkin gerilme-deformasyon davranışını simüle etmek için çok sayıda zemin modeli geliştirilmiştir. Bu modeller, klasik ancak basit olması nedeniyle geoteknik mühendisliği uygulamalarında halen yaygın olarak kullanılan Mohr-Coulomb (MC) modeli ile başlamış ve rijitlik anizotropisini dikkate alan, ileri düzeydeki laboratuvar testlerinden türetilen çok sayıda girdi zemin parametresine sahip sofistike zemin modellerine kadar devam etmiştir (Lim and Ou 2017). Ankrajlı sistemlerde kil zeminlerin MC malzeme modeli ile temsil edildiği bazı vaka analizlerinde, duvar hareketlerinde ölçülen ve hesaplanan değerlerin uyumlu olduğu ve MC zemin modeli kullanımının tatmin edici olabileceği belirtilmiştir (Muntohar and Liao 2013, Bai et al. 2019). Benzer koşullarda MC zemin modeli varsayımıyla çözülen bir proje de ise aletsel gözlem ile elde edilen deplasman değerlerinin analiz sonuçlarından daha az mertebelerde gerçekleştiği gözlenmiştir (Nalçakan vd 2016). Diğer

yandan bir başka ankrajlı derin kazı çalışmasının sonuçları, MC modelin mevcut sahadaki zemin davranışını simüle etmekte yetersiz kalabileceği şeklinde yorumlanmıştır (Hayta 2005). MC modelden farklı olarak gerilme bağımlı rijitlik modelinin hesaplandığı ve boşaltma rijitliğinin göz önüne alındığı Pekleşen Zemin (Hardening Soil-HS) modeli kullanılan vakalarda, killi zeminler için ankrajlı destek sistemi analiz sonuçları ölçülen sonuçlarla karşılaştırılmış ve yanıl yer değiştirme eğrilerinin hem eğilim hem de değer olarak büyük ölçüde aynı olduğu gözlemlenmiştir (Li et al. 2022, Nossan et al. 2009, Tan et al. 2001). Bununla birlikte HS modeli kullanan bir başka vakada, ölçülen yer değiştirmelelerin tasarımıdaki tahminlerin 2 katı kadar olduğu ve literatürdeki üst limitlere yaklaştığı belirtilmiştir (Ünver and Ünver 2022).

Killi zeminler için her iki modelin de (MC ve HS) kullanıldığı ve karşılaştırıldığı çok sıra ankrajlı derin kazı çalışmalarının bir kısmında, deformasyon analizleri, yatay yöndeki maksimum deplasmanların ve derinlik boyunca deplasman davranışlarının yakın olduğunu ve inklinometrik deplasman değerleriyle uyumlu olduğunu göstermektedir (Kökten vd. 2018, Şen 2021). Diğer bir çalışmada ise, HS zemin modelinde kazı alanına doğru gelişen yatay deplasmanların, MC modeline nazaran daha iyi sonuçlar verdiği yani inklinometrik grafik ile farkların daha az olduğu ve MC modelin aksine inklinometre okumalarına kıyasla daha güvenli tarafta kaldığı belirlenmiştir (Bahadır ve Onur 2017). MC model ile yapılan analizlerin, gerçek deplasman eğrilerinden oldukça farklı sonuçlar verdiği, diğer ileri modeller ile kıyaslamaların yapıldığı bir başka çalışmada da görülmüştür (Aktaş vd. 2018). Diğer yandan belirli koşullar altında MC modelin HS model kadar mantıklı sonuçlar verebileceği yorumunu sunan bir çalışma da mevcuttur (Lim and Ou 2017). Bu çalışmanın sonuçları elastisite modülünün önemine yoğunlaşmaktadır. Benzer şekilde sert killer için HS model kullanılmasını öneren Aktaş vd. 2018 çalışması, deplasmanların gerçeğe yakın olarak tahmininin ancak analizlerde gerçekçi deformasyon modülü değerlerinin kullanılması ile mümkün olduğunu belirtmektedir. Bu konuda bir diğer örnek laboratuvar deneyi sonuçlarından yararlanılarak elde edilen parametrelerle modellenen zemin kesitinde, her iki malzeme modeli (HS ve MC) için de deplasman değerlerinin oldukça yüksek olduğudur (Kökten vd. 2018). Bu açıdan bakıldığında parametre seçimi, arazi ve laboratuvar test sonuçları kullanılarak doğru tahmin edilememiş olabilir. Benzer şekilde aşırı yatay deplasman yapmış ankrajlı bir iksa sistemi vakasında, inklinometre ölçümleri ile HS zemin modeli kabulü

ile gerçekleştirilmiş analiz sonuçları karşılaştırılmış ve laboratuvar deneylerinde belirlenmemiş olan aşırı konsolidasyon oranının deplasmanları büyük ölçüde etkilediği tespit edilmiştir (Vural ve Işık 2019). Bu gibi aşırı deformasyon vakalarında, gözlenen yatay duvar deformasyonuna dayalı olarak geri analizler ile kil zemin parametrelerinin optimize edildiği çalışmalar gerçekleştirilmektedir (Ünver and Ünver 2022, Levasseur et al. 2010, Ma'ruf and Darianto 2017, Kim and Finno 2020). Bir başka yaklaşım HS model için kil zemin parametrelerinin kalibrasyonunda tam ölçekli deneylerin kullanımı olarak da gözlenmektedir (Voottipruex et al. 2019).

Kil zeminlerin deformasyon davranışının doğru olarak tahmin edilmesinde, zemin parametrelerinin tahmini ve zemin davranış modellerinin seçimi kadar önemli olabilecek bir diğer kriter de grafik model sınırları olabilir. Yanal destekli derin kazılarda killi zeminlerin MC dışındaki ileri zemin modelleri ile temsil edilmiş olduğu parametrik bir çalışmada, zemin modellerinin deformasyonlar üzerindeki etkisinin sınır koşulları ile de ilgili olduğu belirlenmiştir (Harahap and Ou 2020). Bir başka çalışmada, zemin deformasyonu açısından öngörülenler ile gerçekte gerçekleşenler arasındaki farklar istatistiksel olarak derlenmiş ve 15 adet derin kazı inşaatına ait toplam 152 adet kesit, literatür çalışmalarıyla birlikte incelemiştir (Yıldız ve Berilgen 2017). Çalışma kapsamında sayısal analizlerden elde edilen yer değiştirmeler sahada ölçülenler ile kıyaslanmış ve buna göre jeolojik ortamın zemin olması durumunda, projelerin yaklaşık olarak %28 inde ölçülen ve analiz edilen yatay yer değiştirme değerlerinin birbirine çok yakın ya da eşit değerler aldığı, %60'ında ölçülen yanal yer değiştirme değerlerinin tasarımında tahmin edilenden daha küçük olduğu, geriye kalan yaklaşık %12'sinde ise ölçülen yatay yer değiştirme değerlerinin analizden elde edilenlerden daha büyük olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizler, zemin sınıflarının CL/SC ve ML/SM sınırlarında olduğu, diğer bir ifade ile iri ve ince dane oranlarının yaklaşık olarak %50 civarında birbirine yakın olduğu bir zemin profilini göz önüne almaktadır. Çalışmanın ilk aşamasını Geo5 programı ile analizler oluşturmaktadır. En olumsuz koşulu temsilen CL sınıfı zemin için boyutlandırma yapılmış ve devamında zemin sınıfındaki olası değişimin etkisi gözlenmiştir. Killi zeminlerin, sınıflandırılması ve dolayısıyla zemin parametrelerinin seçimi açısından oldukça hassas oluşu göz önüne alındığında, çalışılan bölge için bu gözlem önemli olmaktadır. Çalışmanın ikinci aşamasında Plaxis programı ile deformasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada farklı analiz yöntemlerine sahip iki ayrı yazılım ile elde edilen deformas-

yonların hangi koşullarda karşılaştırılabilir olabileceğini anlamaya yönelik parametrik bir çalışma oluşturulmuştur. Bu amaçla MC ve HS zemin davranış modelleri kullanılmış ve bu modeller ile farklı grafik model sınırlarında sistemin analizi gerçekleştirilmiştir. Plaxis analizlerinde kullanılan zemin davranış modelinin sistemin davranışı üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olduğu gözlenmiş olmakla birlikte grafik model sınırlarının, zemin malzeme modeline göre farklı etki yaratabildiği ve analizlerimizde dikkat edilmesi gereken önemli bir husus olduğu belirlenmiştir.

2. Geo5 Programı ile Analizler

Geo5 programı çalışma prensibi limit denge analizlerine dayanmakta olup, yüzeysel temeller, derin temeller, zemin çivili şevler, MSE duvarlar, zemin ankrajlı perde duvarlar gibi birçok geoteknik problemin çözümünde kullanılan bir yazılımdır. Geo5 analizlerinin ilk aşamasında, "perde tasarımı" ve "perde kontrolü" bileşenleri kullanılarak, kazı derinliği 9 metre olan çok sıra ankrajlı diyafram duvar boyutlandırılmıştır. "Perde tasarımı" bileşeni ile limit denge analizlerine dayalı ankraj kuvvetleri ve duvar gömülme derinliği hesaplanarak şev stabilite analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde güvenlik katsayısı tahkik yöntemi kullanılmıştır. Ankrajlı diyafram duvar, orta katı kıvamındaki düşük plastisiteli kil (CL) tanımlı zemin için uygulanmıştır. Çalışma için seçilen zemin sınıfında, çok sayıda arazi ve laboratuvar deneylerine dayalı olarak modellenmiş zemin profilinden esinlenilmiştir. Söz konusu profilde zemin, CL, ML, SM, SC sınıflarında bir dağılım göstermektedir. Bu dağılımda en olumsuz koşulu temsilen analizler için CL sınıfı zemin seçilmiş ve malzeme parametreleri Geo5 veri tabanından efektif parametreler olarak belirlenmiştir (Çizelge 1). Analizlerde drenajlı koşullarda efektif parametrelerin tercih edilmesinin temel nedeni, duvarın gömülme derinliğinin belirlenmesinde güvenli tarafta kalmak açısından daha kritik bir rol oynamasıdır.

Yeraltı su seviyesi yüzeyden 2.5 metre derinliğindedir. Yüzeyde trafik yükü olarak, 20 kN/m² büyüklüğünde ve 9 m uzunluğunda sürşarj yükü varsayılmıştır. H=9 m kazı derinliği için 50 cm kalınlığında duvar ve 3 adet ankraj belirlenmiştir. Ankrajlar için seçilen uygulama derinlikleri, açıları, kök boyları ve yatay aralıkları ile hesaplanan ankraj serbest boyları Çizelge 2' de gösterilmiştir (Cevahir 2022).

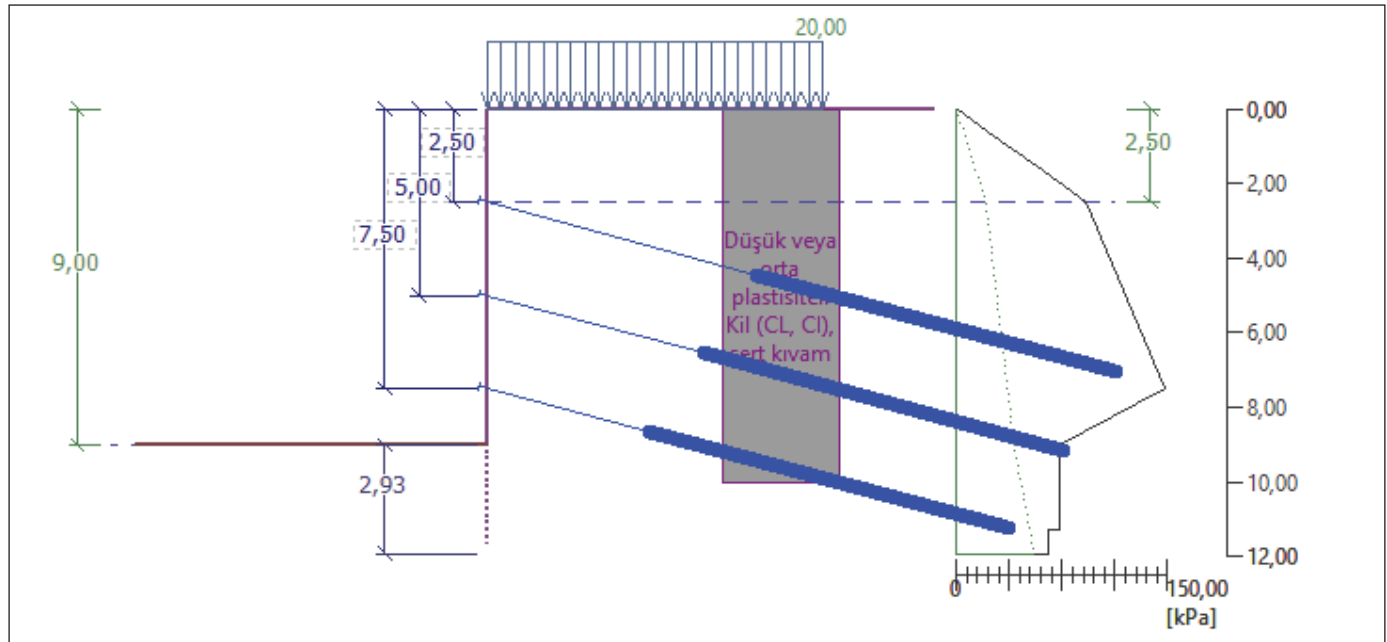
Duvarın geometrisi ve seçilen kriterler doğrultusunda hesaplanan yanal basınç dağılımı Şekil 1'de görüldüğü gibidir. Ön boyutlar ile gerçekleştirilen analiz sonucunda, gömülme derinliği D=9.46 m hesaplanmış ve ankraj kuvvetleri Şekil 2'de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Bu geometride şev sta-

Çizelge 1. Geo5 “perde tasarımı” programında zemin parametreleri.

Parametreler	Sembol	Değerler	Birim
Zemin sınıfı	CL	-	-
Kohezyon	c'	12	kN/m ²
İçsel sürtünme açısı	φ'	19	°
Zemin-duvar sürtünme açısı	δ	12	°
Birim hacim ağırlık	$\gamma_{unsat} = \gamma_{sat}$	21	kN/m ³
Poisson oranı	ν'	0.4	-

Çizelge 2. Geo5 “perde tasarımı” programında ankraj parametreleri.

Parametreler	1.Ankraj	2.Ankraj	3.Ankraj
Uygulama Derinliği (m)	2.5	5	7.5
Açı °	15	15	15
Serbest boy (m)	7.5	6	4.5
Kök boyu (m)	10	10	10
Yatay aralık (m)	1.3	1.3	1.3

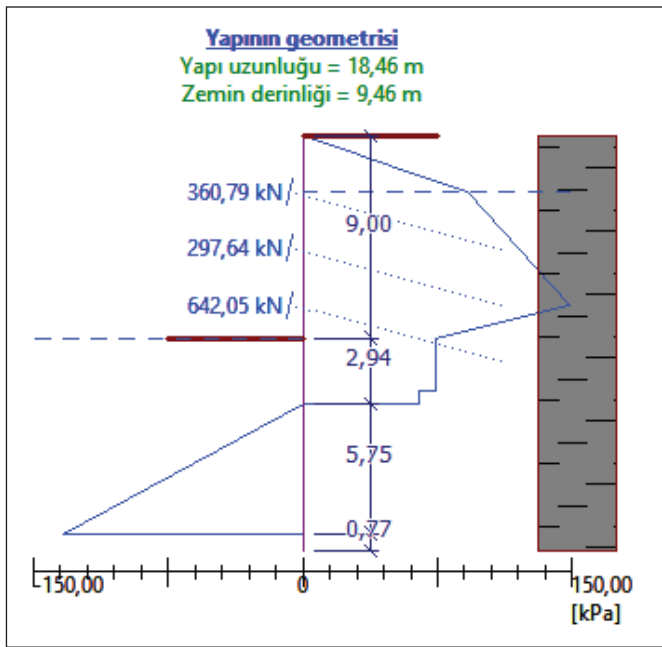
**Şekil 1.** Geo5 “perde tasarımı” programında geometri ve yanal zemin basınç dağılımı.

bilitesi, Bishop yöntemi kullanılarak hesaplanmış ve güvenlik sayısı $FS=1.38 < 1.50$ değeri ile stabilitenin yetersiz olduğu belirlenmiştir. Bu doğrultuda 9.46 m olarak hesaplanmış olan gömülme derinliği 11 metre varsayılarak şev stabilitesi tekrarlanmış ve güvenlik sayısında $FS=1.51 > 1.50$ değeri ile yeterlilik sağlandığından toplam yapı uzunluğu $H=20$ m olarak belirlenmiştir.

Boyutlandırılan destek sistemi “perde kontrolü” bileşeninde aşamalı inşaat yaklaşımı ile tahkikler doğrultusunda düzenlenmiştir. Bu aşamada zemin parametrelerine ek olarak “elastisite modülü” ve “yapısal dayanım katsayısı” eklenmiştir (Çizelge 3). Yatak katsayısı için “otomatik iterasyon” kabulü yapılmıştır. Bu kabul, seçilen zemin yatak katsayısı yönteminin duvarın maksimum yatay deplasmanını önemli oranda

Çizelge 3. Geo5 “perde kontrolü” programında zemin parametreleri.

Parametreler	Sembol	Değerler	Birim
Zemin sınıfı	CL	-	-
Kohezyon	c'	12	kN/m ²
İçsel sürtünme açısı	φ'	19	°
Zemin-duvar sürtünme açısı	δ	12	°
Birim hacim ağırlık	$\gamma_{unsat} = \gamma_{sat}$	21	kN/m ³
Poisson oranı	ν'	0.4	-
Elastisite Modülü	E	4.5	MPa
Yapısal Dayanım Katsayısı	-	0.1	-

**Şekil 2.** Geo5 “perde tasarımı” programında duvar gömülme derinliği ve ankraj kuvvetleri.

değiştirebildiğini göstermiş olan parametrik bir çalışmanın sonuçlarına dayanmaktadır (Aslan ve Yağcı 2018b). Geo5 veri tabanından seçilmiş olan önerilmiş donatı tipindeki 26.5 mm çaplı “DYWIDAG S950/1050 D26.5” model ankrajın çekme dayanımı 578 kN dur. Zemin türüne ve enjeksiyonun uygulanma şekline göre ankraj kök bölgesinin nihai aderans gerilme değerleri değişkenlik göstermektedir. Kök bölgesinin çapı 150 mm seçilmiş ve ankraj kökü boyunca zemin ile harç ara yüzeyindeki ortalama nihai aderans gerilme değeri 130 kPa tanımlanmıştır (Sabatini et al. 1999).

“Perde kontrolü” programında analizler sırayla şu inşaat aşamalarını kapsar şekilde gerçekleştirilmiştir; 3 m derinliğinde kazı, 2.5 m seviyesinde 1. ankrajın uygulanması, kazı derin-

liğinin 6 m ye indirilmesi, 5 m seviyesinde 2. ankrajın uygulanması, 9 m’lik kazı derinliğine inilmesi ve 7.5 m seviyesinde 3. ankrajın uygulanması. Yüzeyden 2.5 m derinliğinde olan yeraltı su seviyesi, her bir kazı aşamasında kazı derinliği kadar indirilmiştir. Tüm inşaat aşamaları için duvar deplasmanları hesaplanmış ve güvenlik katsayısı yaklaşımı ile içsel stabilite, şev stabilitesi ve ankraj doğrulama tahkikleri yürütülmüştür. Ankrajlı diyafram duvar uygulaması sahada da aşamalı olarak inşa edildiğinden her bir aşama kendi içerisinde tüm tahkikleri sağlamalıdır. Analizlerin ikinci inşaat aşamasında, ankraj köklerinin zeminden sıyrılma direnci yetersiz kalmış ve bu doğrultuda kök boyu 12 m ye çıkarılarak stabilite sağlanmıştır. Diğer yandan üçüncü inşaat aşamasından itibaren “perde tasarımı” programında belirlenmiş olan donatı serbest boyları için içsel stabilite sağlanamadığından kademeli olarak serbest boylar arttırılmıştır. Son inşaat aşamasında ise ankraj doğrulama tahkikleri yetersiz kalmıştır. Bu sebeple donatı çapı 36 mm olarak seçilerek çekme dayanımını 1057 kN olacak şekilde arttırılmış ve zeminden sıyrılma direncinin karşılanması amacıyla da kök bölgesinin çapı 200 mm olarak belirlenmiştir (Çizelge 4). “Perde kontrolü” programında duvarın maksimum yatay deformasyonu $u_{x-maks.} = 33$ mm elde edilmiştir (Şekil 3). Tüm tahkiklerin yeterli olduğunu gösteren sonuçlar, Çizelge 5 ve Çizelge 6’ da içsel stabilite ve taşıma kapasitesi doğrulamaları cinsinden gösterilmiştir. Şev stabilitesi için güvenlik katsayısı $FS=1.66$ elde edilmiştir.

Geo5 analizlerinin ikinci aşamasında, ankrajların sayısı, uygulama derinlikleri, açıları ve yatay aralıkları sabit tutulmuş ve zemin sınıfı değiştirilerek, orta katı-ML sınıfı, orta sıkı-SC sınıfı ve orta sıkı-SM sınıfı zeminler (Çizelge 7) için destek sisteminin boyutları stabilite tahkikleri ile düzenlenmiştir. Zemin sınıfı değişimine karşılık “perde tasarımı” programında, duvar gömülme derinliklerinde toplamda 3 m’lik bir fark olduğu ve ankraj kuvvetlerinin beklenildiği

Çizelge 4. Geo5 “perde kontrolü” programında ankraj parametreleri.

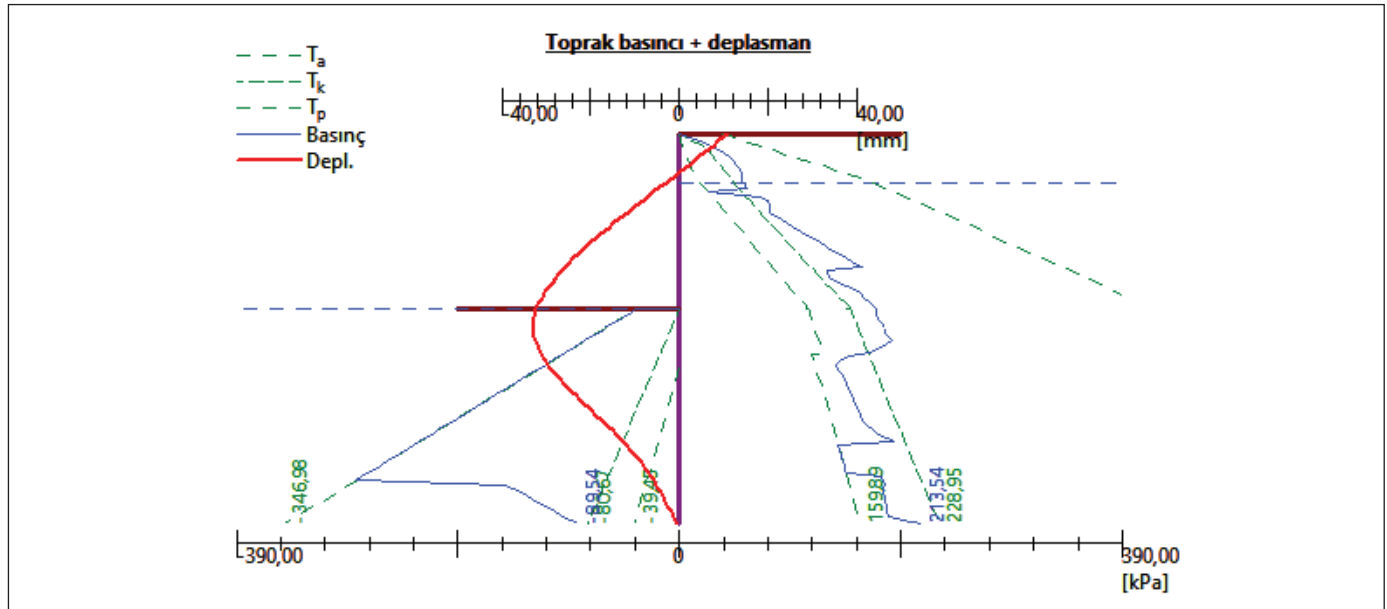
Parametreler	1. Ankraj	2. Ankraj	3. Ankraj
Uygulama Derinliği (m)	2.5	5	7.5
Açı °	15	15	15
Serbest boy (m)	16	15	14
Kök boyu (m)	12	12	12
Yatay aralık (m)	1.3	1.3	1.3
Donatı çapı (mm)	36	36	36
Kök bölgesinin çapı (mm)	200	200	200

Çizelge 5. Geo5 “perde kontrolü” programında ankrajların içsel stabilitesi.

No	Ankraj kuvveti (kN)	Maksimum izin verilen ankraj kuvveti (kN)	Güvenlik katsayısı
1	361.00	734.67	2.04
2	298.00	888.93	2.98
3	643.00	1062.89	1.65

Çizelge 6. Geo5 “perde kontrolü” programında ankraj taşıma kapasiteleri.

No	Maksimum kuvvet (kN)	Ankraj dayanımı (kN)	Sıyırılma direnci (zemin) (kN)	Sıyırılma direnci (enjeksiyon) (kN)	Kullanım (%)
1	361.00	704.67	653.45	1027.30	55.25
2	298.00	704.67	653.45	1027.30	45.60
3	643.00	704.67	653.45	1027.30	98.40

**Şekil 3.** Geo5 “perde kontrolü” programında yanal basınçlar ve duvarın deformasyonu.

Çizelge 7. Geo5 programında farklı sınıfların zemin parametreleri.

Parametreler	Sembol	CL	ML	SC	SM	Birim
Kohezyon	c'	12	12	8	5	kN/m ²
İçsel sürtünme açısı	φ'	19	21	27	29	°
Zemin-duvar sürtünme açısı	δ	12	14	18	20	°
Birim hacim ağırlık	$\gamma_{unsat} = \gamma_{sat}$	21	20	18.5	18	kN/m ³
Poisson oranı	ν'	0.4	0.4	0.35	0.3	-
Elastisite Modülü	E	4.5	4	8	10	MPa
Yapısal Dayanım Katsayısı	-	0.1	0.2	0.3	0.3	-

Çizelge 8. Geo5 “perde tasarımı” programında farklı zemin sınıflarının analiz sonuçları.

	CL	ML	SC	SM
Duvar Gömülme derinliği (m)	11	10	8	8
1. ankraj kuvveti (kN)	360	295	213	207
2. ankraj kuvveti (kN)	297	259	222	214
3. ankraj kuvveti (kN)	642	565	436	433

Çizelge 9. Geo5 “perde kontrolü” programında farklı zemin sınıflarının analiz sonuçları.

		CL	ML	SC	SM
Boyutlar	Ankraj kök boyu (m)	12	12	10	10
	1. ankraj serbest boyu (m)	16	14	11	11
	2. ankraj serbest boyu (m)	15	13	10	10
	3. ankraj serbest boyu (m)	14	12	9	9
	Ankraj kök bölgesi çapı (mm)	200	200	150	150
	Ankraj donatısı çapı (mm)	36	36	32	32
Tahkikler	Duvarın maksimum yatay deplasmanı (mm)	33	22	12	13
	3. ankraj-içsel stabilite doğrulaması-GS	1.65	1.72	1.70	1.76
	3. ankraj-taşıma kapasitesi kullanım yüzdesi	0.98	0.87	0.82	0.81
	Şev Stabilitesi-GS	1.66	1.66	1.63	1.62

gibi zemin rijitliklerinin artışı doğrultusunda azaldığı gözlenmiştir (Çizelge 8).

“Perde kontrolü” programında farklı zemin sınıfları için değişen rijitlikler ile ankraj kök boylarında toplamda 2 m ve ankraj serbest boylarında ise toplamda 5 m fark olduğu söylenebilir (Çizelge 9). Benzer şekilde ankraj kök bölgesi çapı ve ankraj donatı çapında da stabilitelerin sağlanması için gerekli boyutlarda değişim gözlenmektedir. Her bir zemin sınıfı için belirlenen boyutlarda, duvar deplasmanları beklenildiği gibi artan zemin rijitlikleri ile azalmıştır. Ankrajların içsel stabilite doğrulamaları ve ankraj taşıma kapasitesi kullanım yüzdeleri için kritik olan 3 numaralı ankraj dikkate

alınmıştır. Artan zemin rijitliği ile azalan boyutlar için, içsel stabilite güvenlik sayılarında artış ve ankraj taşıma kapasitesi kullanım yüzdelерinde ve duvarın maksimum yanal deplasmanında düşüş belirlenmiştir. Ancak şev stabilitesi güvenlik sayılarında zemin rijitliği ile ters orantılı bir düşüş gözlenmektedir. Bu durum kohezyonu yüksek olan zemin sınıflarında şev stabilitesinin daha yüksek olduğu şeklinde gözlenmiştir.

CL ve SC sınıfı zeminler kendi arasında karşılaştırıldığında; gömülme derinliklerinde 3 m ve ankrajlara gelen kuvvetlerde %25-%40 arasında değişen oranlarda fark görülebilir. Ayrıca stabilitelerin sağlanmasında, ankraj serbest boyların-

da 5 m, kök boyunda 2 m, kök bölgesi çapında 50 mm ve ankraj donatı çapında 4 mm'lik farklar mevcuttur. ML ve SM zemin sınıfları için; gömülme derinliklerinde 2 m ve ankrajlara gelen kuvvetlerde %18-%30 oranlarında farktan söz edilebilir. Ankraj serbest boylarında 3 m, kök boyunda 2 m, kök bölgesi çapında 50 mm ve ankraj donatı çapında 4 mm'lik fark stabilitenin sağlanması için gerekli olmuştur.

3. Plaxis Programı ile Analizler

Plaxis 2D, geoteknik mühendisliği problemlerinin sayısal analizi için geliştirilmiş bir sonlu elemanlar programıdır. Program geoteknik mühendisliği projelerinin tasarımında ihtiyaç duyulan şekil değiştirme ve stabilize analizlerini gerçekleştirebilecek şekilde geliştirilmiştir. Plaxis analizlerinin ilk aşamasında, Geo5 programı ile CL sınıfı zemin profili için boyutlandırılmış olan sistemin deformasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Orta plastisiteli CL sınıfı, homojen tek bir zemin tabakasının, MC malzeme modeli ile temsil edildiği bu analiz A-1MC olarak tanımlanmıştır. Plaxis ile analiz edilmek istenilen bir problemin ilk olarak sayısal modelini oluşturmak gerekmektedir. Sayısal model, genellikle yarı sonsuz olan çözüm bölgesinin sonlu elemanlara ayrılmış durumunu ifade etmektedir. Sayısal modeli elde etmek için noktalardan, çizgilerden ve hücrelerden oluşan bir grafik model oluşturulmaktadır. Sayısal model, farklı zemin tabakalarını, yapısal elemanları, inşa aşamalarını ve ortamdaki tüm yükleri ve sınır koşullarını kapsamaktadır. Yarı sonsuz problemlerde modelin sınırları sonuçları etkilemeyecek boyutlarda seçilmelidir. A-1MC analizi için grafik modelin sınırları, B=80 m kazı genişliği varsayımı ile hesaplanmıştır. Yatay uzaklık, duvar arkasında kazı genişliğinin minimum 2-3 katı kadar bir mesafe olması gerektiği kabulü ile $x_{max}=320$ m, düşey derinlik kazı tabanından itibaren kazı ge-

nişliğinin minimum 2-3 katı kadar bir mesafe olması gerektiği kabulü ile $y_{min}=-260$ m belirlenmiştir (Berilgen 2011). Plaxis analizi için gerekli olan zemin parametreleri Çizelge 10 ile sunulmuştur.

Plaxis programında, diyafram duvar malzeme özellikleri Çizelge 11'de, ankraj serbest boyu ve kök bölgesi için tanımlanan malzeme özellikleri ise Çizelge 12 ve Çizelge 13'te gösterilmiştir. Ankraj kökünde kullanılacak harcın elastisite modülü $E=10000$ MPa varsayılmıştır. Ankraj kök çevresi direnci, 0.13 MPa seçilmiş (Sabatini et al. 1999) ve bu değer kök çevresi ile çarpılarak, birim uzunluğa gelen kuvvet cinsinden 80 kN/m olarak hesaplanmıştır. Ankrajlı duvar sisteminin grafik modeli Şekil 4'te gösterilmiştir. Modelde sonlu elemanlar ağı, orta büyüklükte üçgen elemanlar seçilerek oluşturulmuştur. Her bir inşaat aşamasındaki kazı ve ankraj uygulama derinlikleri Geo5 programında uygulanan değerlerdir. Her kazı aşamasında, yeraltı su seviyesi kazı derinliği kadar düşürülmüştür.

A-1MC için plaxis analizinin sonucu duvardaki yatay deplasmanın maksimum değeri $u_{x-maxs}=424$ mm elde edilmiştir. Bu değer, Geo5 programında hesaplanan maksimum yatay deplasman değeri olan $u_{x-maxs}=33$ mm ile karşılaştırıldığında hem sayısal olarak hem de maksimum deplasmanın yeri açısından büyük farklar olduğu görülmektedir. Aynı zamanda Geo5 programında belirlenen maksimum yatay deplasman değeri izin verilebilir bir aralıkta kalırken, Plaxis programında belirlenen değer, izin verilebilir sınırlarda değildir. Ankrajlı duvarlar için maksimum yanal duvar hareketlerinin, kazı derinliğine (H) kıyasla yaklaşık %0.2 H ile %0.5 H arasında kabul edilebilir seviyelerde olduğu düşünüldüğünde (Sabatini et al. 1999), H=9 m kazı derinliği için izin verilen maksimum yanal hareket miktarı $0.05H=45$ mm

Çizelge 10. Plaxis A-1MC analizi için zemin parametreleri.

Parametreler	Sembol	Değerler	Birim
Zemin sınıfı	CL	-	-
Malzeme modeli	Mohr-Coulomb	-	-
Drenaj tipi	Drenajlı		
Birim hacim ağırlık	$\gamma_{unsat}=\gamma_{sat}$	21	kN/m ³
Elastisite modülü	E'	4500	kN/m ²
Poisson oranı	ν'	0.4	-
Kohezyon	c'	12	kN/m ²
İçsel sürtünme açısı	φ'	19	°
Dilatasyon açısı	ψ	0	°
Ara yüzey dayanım azaltma katsayısı	R_{inter}	0.65	-

Çizelge 11. Plaxis analizde diyafram duvar malzeme özellikleri.

Özellikler	Sembol	Değerler	Birim
Malzeme tipi	-	Elastik	-
Zımbalamanın önlenmesi	-	Evet	-
Normal rijitlik	EA	15×10^6	kN/m
Eğilme rijitliği	EI	312×10^3	kNm ² /m
Ağırlık	w	2	kN/m ³
Poisson oranı	ν'	0.15	-

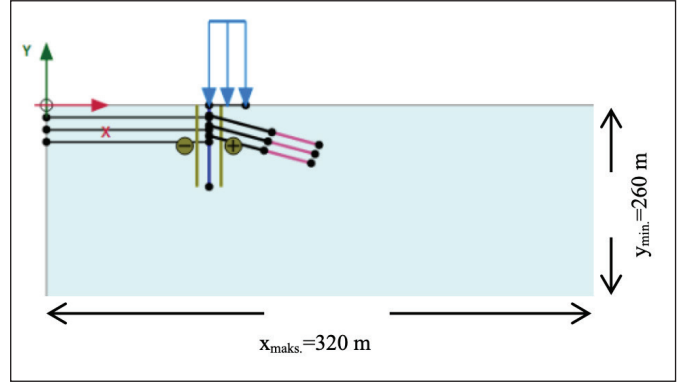
Çizelge 12. Plaxis analizde ankraj serbest boyunun malzeme özellikleri.

Özellikler	Sembol	Değerler	Birim
Malzeme tipi	-	Elastik	-
Normal rijitlik	EA	203.5×10^5	kN
Ankrajlar arası yatay mesafe	L_s	1.3	m

Çizelge 13. Plaxis analizde ankraj kökünün malzeme özellikleri.

Özellikler	Sembol	Değerler	Birim
Malzeme tipi	-	Elastik	-
Elastisite modülü	E	10.10^6	kN/m ²
Birim ağırlık	γ	0	kN/m ³
Kiriş tipi	-	Ön tanımlı	-
Ön tanımlı kiriş tipi	-	Masif dairesel kiriş	-
Çap	D	0.2	m
Yatay mesafe	L_s	1.3	m
Eksenel çevre direnci	T_s	80	kN/m
	T_e	80	kN/m
Yanal çevre direnci	-	Sınırsız	-
Uç direnci	F_{max}	0	kN
Ara yüzey rijitlik faktörü	-	Varsayılan değer	-

olmaktadır. Plaxis analizinde, seçilen grafik model sınırları için homojen tek tabakalı zemin varsayımı sonucu derinlik artışı ile rijitlik artışı göz önüne alınamamış ve MC malzeme modeli yetersiz kalmıştır. Bu açıdan analiz sonuçlarının gerçekçilikten uzaklaştığı söylenebilir.

**Şekil 4.** Plaxis analizde ankrajlı duvarın grafik modeli.

Çalışmanın ikinci aşamasında Plaxis analizlerinin daha gerçekçi olabilmesi ve Geo5 sonuçları ile karşılaştırılabilir olması amacıyla tabakalı zemin kabulü yapılmış ve bu analiz A-3MC olarak adlandırılmıştır. Geo5 programında, geometrinin duvar yüksekliği olan 20 m ile sınırlı oluşu göz önüne alınarak, A-3MC analizinde “orta katı” kıvamdaki CL sınıfı zeminin 20 m kalınlıkta olduğu kabul edilmiştir. Bu derinlikten sonra kıvamın “çok katı” olduğu ve 120 m derinlikte “anakaya” olduğu varsayımı yapılmıştır (Çizelge 14). Bu varsayım, çalışmamızda göz önüne alınan inceleme alanına ait modellenmiş olan zemin profili ile uyumlu olacak şekilde belirlenmiştir (Cevahir 2022). A-3MC analizinin sonucu, duvardaki maksimum yatay deplasman, $u_{x-maks,=}$ 227 mm elde edilmiştir. A-1MC analizi ile kıyaslandığında, maksimum yatay deplasmanda %47 oranında azalma görülmüştür. Fakat yine de duvar deplasmanı izin verilebilir sınırlar içinde değildir.

Üçüncü aşamada, orta plastisiteli CL sınıfı homojen tek zemin tabakasının, HS malzeme modeli ile temsil edildiği A-1HS analizi gerçekleştirilmiştir. HS model, drenajlı üç eksenli basınç deneyinde gözlenen eksenel deformasyon-deviatorik gerilme ilişkisinin yaklaşık hiperbol şeklinde olması esasına dayanır. Modelde kullanılan ek temel parametreler, üç eksenli sekant rijitlik modülü, ödometre tanjant rijitlik modülü, boşaltma/yüklemeye rijitlik modülü ve gerilme bağımlı rijitlik üssel değeridir (Çizelge 15). Çeşitli zemin türleri için varsayılan ortalama değerler $=3$ ve $=$ olarak önerilmektedir (Brinkgereve et al. 2020). A-1HS analizinin sonucu, maksimum duvar yatay deplasmanı $u_{x-maks,=}$ 97 mm elde edilmiştir. Duvar maksimum yatay deplasmanında, A-1MC analiz sonuçlarına kıyasla %77 oranında azalma görülmüştür. Fakat yine de duvar deplasmanı izin verilebilir sınırlar içinde kalmamaktadır.

Çizelge 14. Plaxis A-3MC analizi için zemin parametreleri.

Özellikler	Sembol	CL	CL	Ana kaya	Birim
Malzeme modeli	MC	√	√	√	-
Drenaj tipi	Drenajlı	√	√	√	-
Birim hacim ağırlık	$\gamma_{unsat} = \gamma_{sat}$	21	21	21	kN/m ³
Elastisite modülü	E'	4500	12500	100000	kN/m ²
Poisson oranı	ν'	0.4	0.4	0.4	-
Kohezyon	c'	12	24	24	kN/m ²
İçsel sürtünme açısı	φ'	19	19	19	°
Dilatasyon açısı	Ψ	0	0	0	°
Ara yüzey dayanım azaltma katsayısı	R _{inter}	0.65	0.65	0.65	-

Çizelge 15. Plaxis A-1HS analizi için zemin parametreleri.

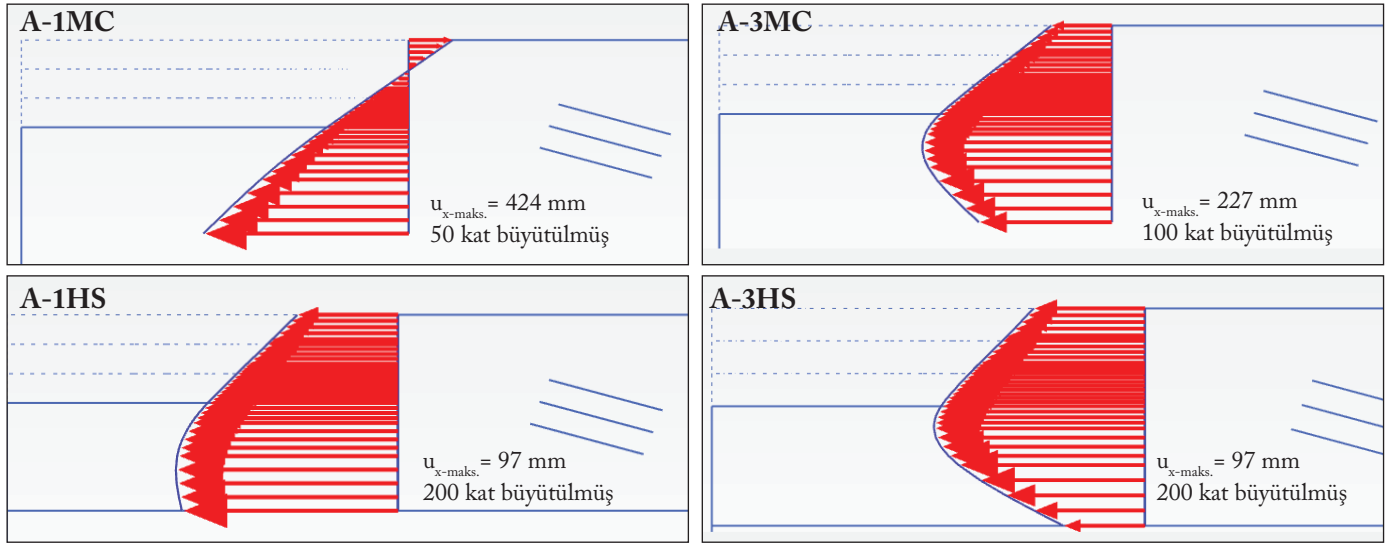
Parametreler	Sembol	CL	Birim
Malzeme modeli	HS	√	-
Drenaj tipi	Drenajlı	√	-
Birim hacim ağırlık	$\gamma_{unsat} = \gamma_{sat}$	21	kN/m ³
Üç eksenli sekant rijitliği		4500	kN/m ²
Ödometre tanjant rijitliği		4500	kN/m ²
Boşaltma/yükleme rijitliği		13500	kN/m ²
Gerilme bağımlı rijitlik üssel değeri	m	0.9	-
Poisson oranı	ν_{ur}'	0.2	-
Kohezyon	c'	12	kN/m ²
İçsel sürtünme açısı	φ	19	°
Dilatasyon açısı	Ψ	0	°
Ara yüzey dayanım azaltma katsayısı	R _{inter}	0.65	-

Son aşamada A-3HS ile gösterilen analizler, tabakalı zemin profili için HS model kabulü ile yapılmıştır (Çizelge 16). Bu yaklaşım ile maksimum duvar yatay deplasmanı $u_{x-maks} = 97$ mm elde edilmiştir. Bu deplasman değerinin, homojen tek zemin profili için HS modelin kullanıldığı A-1HS analizinin sonucu ile tamamen aynı olduğu görülmektedir. Bu doğrultuda malzeme modelinin HS olarak seçilmesi durumunda, zemin profilinin homojen veya tabakalı olmasının fark yaratmadığı ifade edilebilir. Plaxis analizlerinde duvardaki maksimum yatay deplasmanın yeri ve deplasmanların duvar boyunca değişimi açısından da farklılıklar gözlenmektedir (Şekil 5). A-1MC ve A-3MC analizlerinde, maksimum deplasmanlar duvarın alt ucunda ve yakınında iken A-1HS ve A-3HS için maksimum deplasmanlar kazı tabanı civarında gözlenmektedir, bu açıdan farklılığın zemin malzeme modeline bağlı olduğu söylenebilir.

Plaxis ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarının, duvarın maksimum yanal deplasmanı cinsinden Geo5 analiz sonuçlarına kıyasla daha yüksek oluşu, plaxis deki grafik model sınırlarının da kontrolünü gerektirebilir. Geo5 çözümlerinde, kazı genişliği ve duvar alt seviyesinin altındaki zemin, hesaplarda göz önüne alınmamaktadır. Plaxis çözümlerinde ise grafik model sınırları, B=80 m kazı genişliği göz önüne alınarak hesaplanan değerlerdir ($x_{max} = 320$ m, $y_{min} = -260$ m) (Şekil 4) (Berilgen 2011). Diğer yandan literatür araştırmalarında ve örnek saha çalışmalarında, grafik model sınırlarının bizim çalışmamızdaki sınırlara oranla daha küçük olduğu gözlenebilir. Bu doğrultuda çalışmadaki model sınırları değiştirilmiştir. Kazı genişliği B=30 m varsayılmış ve sınırlar kazı genişliği yerine H=9 m olan kazı derinliği göz önüne alınarak hesaplanmıştır. Yatay uzaklık, duvar arkasında kazı derinliğinin minimum 2-3 katı kadar bir mesafe olması ge-

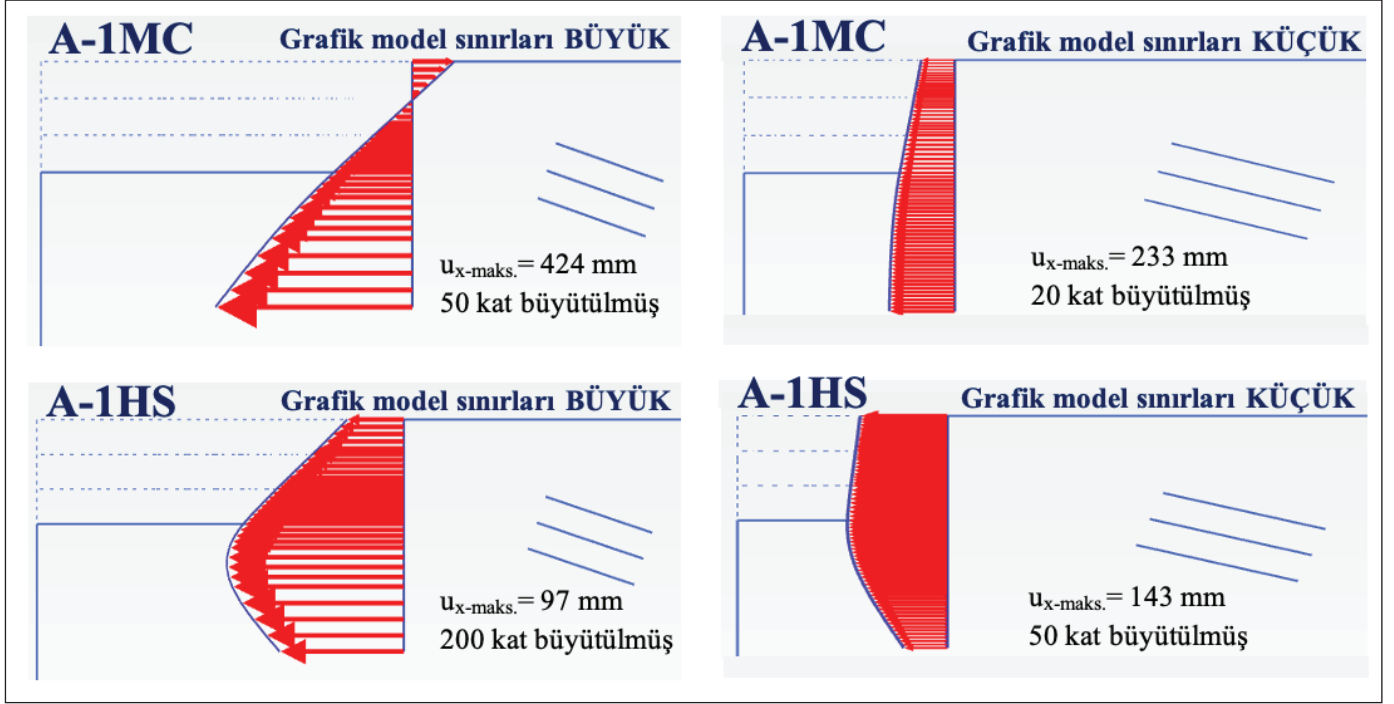
Çizelge 16. Plaxis A-3HS analizi için zemin parametreleri.

Parametreler	Sembol	CL	CL	Ana kaya	Birim
Malzeme modeli	HS	√	√	√	-
Drenaj tipi	Drenajlı	√	√	√	-
Birim hacim ağırlık	$\gamma_{unsat} = \gamma_{sat}$	21	21	21	kN/m ³
Üç eksenli sekant rijitliği		4500	12500	100000	kN/m ²
Ödometre tanjant rijitliği		4500	12500	100000	kN/m ²
Boşaltma/yükleme rijitliği		13500	37500	300000	kN/m ²
Gerilme bağımlı rijitlik üssel değeri	m	0.9	0.9	0.9	-
Poisson oranı	ν'	0.2	0.2	0.2	-
Kohezyon	c'	12	24	24	kN/m ²
İçsel sürtünme açısı	φ'	19	19	19	°
Dilatasyon açısı	Ψ	0	0	0	°
Ara yüzey dayanım azaltma katsayısı	R_{inter}	0.65	0.65	0.65	-

**Şekil 5.** Plaxis analizlerinde duvarın yatay deplasmanları.

rektiği kabulü ile $x_{max}=70$ m, düşey derinlik kazı tabanından itibaren kazı derinliğinin minimum 2-3 katı kadar bir mesafe olması gerektiği kabulü ile $y_{min}=-40$ m belirlenmiştir (Berilgen 2011). Homojen tek tabakalı zemin profili ve MC malzeme modelinin kullanıldığı A-1MC çözümünde, grafik model sınırlarının küçüldüğü koşullar için analiz tekrarlanmış ve duvardaki maksimum yatay deplasman, $u_{x-maks.}=233$ mm elde edilmiştir. Bu sonuçlar, grafik model sınırlarının daha büyük olduğu analiz sonucu ile kıyaslandığında duvarın maksimum yatay deplasmanında %45 oranında azalma gözlenmiştir. Benzer şekilde homojen tek tabakalı zemin profili için HS malzeme modelinin kullanıldığı A-1HS analizi, grafik model sınırlarının azaldığı koşullarda tekrar

gerçekleştirilmiş ve duvardaki maksimum yatay deplasman, $u_{x-maks.}=143$ mm elde edilmiştir. Bu değer daha büyük model sınırlarına sahip analiz sonucu ile kıyaslandığında, duvarın maksimum yatay deplasmanında %47 oranında artış gözlenmiştir. Bu aşamada gerçekleştirilen analiz sonuçları, grafik model sınır şartlarındaki değişimin zemin malzeme modeline göre farklı etki yarattığını göstermektedir (Şekil 6). Grafik model sınırlardaki küçülme, MC malzeme modelinin kullanıldığı analizde duvarın maksimum yatay deplasmanında azalmaya sebep olur iken, HS malzeme modelinin kullanıldığı analizde duvarın maksimum yatay deplasmanında artış gözlenmiştir.



Şekil 6. Farklı grafik model sınırları için plaxis analizlerinde duvar yatay deplasmanları.

4. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, bir inceleme alanındaki yerel zemin profilini temsilen killi zeminlerde, çok sıra ankrajlı bir destek sistemi için parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Zemindeki iri ve ince danelerin yaklaşık olarak %50 oranlarında birbirine çok yakın olduğu ve zeminlerin CL, ML, SM, SC sınıflarında bir dağılım gösterdiği bölgede, en olumsuz koşulu temsilen orta katı kıvamdaki CL sınıfı zemin için kazı derinliği 9 metre olan bir sistem analiz edilmiştir. Boyutlandırmalar, limit denge analizlerine dayalı Geo5 programı ile oluşturulmuştur. Geo5 programında stabilite tahkikleri aşamalı inşaat yaklaşımı ile yapılabilmekte ve yatak katsayısı yaklaşımı ile sistemin deformasyonu belirlenebilmektedir. Geo5 analizleri ile sistemdeki maksimum yatay deformasyonlar, literatürde belirtilen izin verilebilir sınırlar içinde kalmıştır. Zemin sınıfındaki dağılımın etkisi için, ankrajların sayısı, uygulama derinlikleri, açıları ve yatay aralıkları sabit tutularak, ML, SC ve SM sınıfı zeminler için analizler tekrarlanmıştır. Artan zemin rijitliği ile beklenildiği üzere azalan boyutlara karşılık, duvarın yanal deplasmanında düşüş ve stabilite güvenlik sayılarında genel olarak artış belirlenmiştir. Sonuçlar, arazi ve laboratuvar çalışmalarına dayalı olarak zemin sınıfının belirlenmesi aşamasındaki hatalar ve/veya veri yetersizliği sebebiyle ortaya çıkabilecek olası zemin sınıfı farklılıklarının, destek sisteminin boyutları ve stabilitesi üzerindeki etkisini göstermektedir.

Geo5 programı ile boyutlandırılan sistem, sonlu elemanlar yazılımı Plaxis ile modellenmiş ve deformasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada farklı analiz yöntemlerine sahip iki ayrı yazılım ile elde edilen deformasyonların hangi koşullarda karşılaştırılabilir olabileceğine yönelik olarak parametrik çalışma yapılmıştır. Bu doğrultuda farklı zemin davranış modelleri kullanılmış ve farklı grafik model sınırları uygulanmıştır. Sonlu eleman yazılımlarında grafik model sınırlarının sonuçları etkilemeyecek boyutlarda seçilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda literatürde önerilen sınırlar, kazı genişliği veya kazı derinliğini göz önüne almaktadır. Çalışmada varsayılan kazı genişliği göz önüne alınarak hesaplanan grafik model sınırlarında, orta plastisiteli CL sınıfı zemin tabakası Geo5 analizlerinde olduğu gibi homojen tek bir tabaka olarak modellenmiş ve Mohr-Coulomb malzeme modeli ile temsil edilmiştir. Analiz sonucu duvardaki maksimum yatay deplasmanın, Geo5 programı ile hesaplanan değer ve literatürde izin verilen sınır değerlerin çok üstünde oluşu plaxis uygulamasındaki modellemenin birçok açıdan gerçekçilikten uzaklaştığını göstermektedir. Destek sisteminin geometrisi ile sınırlı zemin koşullarını göz önüne alan Geo5 analizlerinden farklı olarak, daha geniş sınırlara sahip grafik modelin oluşturulduğu plaxis analizinde, homojen tek tabakalı zemin varsayımı sonucu, derinlik artışı ile rijitlik artışı göz önüne alınamamış ve bu açıdan Mohr-Coulomb zemin modelinin kullanılması da yetersiz kalmıştır. Gerçeğe

daha yakın bir modelleme için çalışmada göz önüne alınan zemin profili ile uyumlu olacak şekilde destek sisteminin alt ucundan başlayarak artan rijitlikte zemin tabakalanması ve anakaya varsayımı yapılmıştır. Bu varsayım ile duvardaki maksimum yatay deplasman %47 oranında azalmış olsa da Geo5 analiz sonuçlarının ve izin verilebilir sınır değerlerin halen oldukça üstünde kalmıştır.

Plaxis analizlerinde, davranışın Pekleşen Zemin modeli ile temsil edildiği durumda, zemin profilinin homojen tek tabaka olması ile derinlikle artan rijitlikte tabakalı oluşunun, duvardaki maksimum yatay deplasman değeri açısından fark yaratmadığı görülmüştür. Deplasmanlar, tek tabakalı ve Mohr-Coulomb davranış modeline sahip çözüme nazaran %77 oranında azalmış, Geo5 analiz sonuçları ile karşılaştırılabilir daha makul bir seviyeye gelmiş ancak yine de izin verilebilir sınırları aşmıştır. Bu durum analiz edilen sistem için Pekleşen Zemin modelinin, davranışın temsil edilmesinde daha uygun olduğu şeklinde yorumlanabilir.

Plaxis analizlerinde kullanılan zemin davranış modelinin sistemin davranışı üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olduğu gözlenmiş ve bu etkinin aynı zamanda farklı grafik model sınırlarındaki sonuçları incelenmiştir. Bu amaçla varsayılan kazı genişliği küçültülmüş, sınırlar kazı derinliği kriterine göre belirlenmiş ve yeni grafik model sınırları ilkine oranla daha küçük elde edilmiştir. Grafik model sınırlardaki küçülme, Mohr-Coulomb malzeme modelinin kullanıldığı analizde, duvarın maksimum yatay deplasmanında azalmaya sebep olur iken, Pekleşen Zemin malzeme modelinin kullanıldığı analizde duvarın maksimum yatay deplasmanında artış gözlenmiştir. Bu sonuçlar ile Plaxis analizlerinde grafik model sınırlarının, zemin malzeme modeline göre farklı etki yaratabildiği ve analizlerimizde dikkat edilmesi gereken önemli bir husus olduğu belirlenmiştir. Literatürde zemin malzeme modellerini kıyaslayan vaka analizlerine ait parametrik çalışmalar göstermiştir ki; belirli koşullar altında her zemin modeli gerçeğe yakın, mantıklı sonuçlar verebilir. Çünkü sonuçlar üzerinde başka parametrelerin de etkisi olduğu ve bu parametrelerin hangi doğrulukta belirlenip kullanıldığı önemli olmaktadır. Kullanılan diğer parametreler dışında, belirli ve uygun koşulların oluşturulmasında grafik model sınırlarının da önemli olduğu bu çalışma ile gösterilmiştir. Bu çalışmanın devamında grafik model sınırları için daha kapsamlı örnekler üzerinde çalışılmasının gerekli olduğu düşünülmektedir.

Yazar katkısı: Alperen Cevahir: Yüksek lisans tezi kapsamında çalışmanın analizlerini yapmıştır, Banu Yağcı: Çalışmaya danışmanlık yapmış ve makaleyi yazmıştır.

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

5. Kaynaklar

- Aktaş, T., Çalışan, O., Çokça, E. 2018.** Ankara Kilinde 18.5 m Derinliğindeki Bir Kazının Geri Analizi: Örnek Olay İncelemesi. Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 17. Ulusal Kongresi, Türkiye.
- Alam, M., Chaallal, O., Galy, B. 2020.** Protection Practices for Trench and Excavation in Quebec Sensitive Clay Soils: Review of Codes, Guidelines, and Research Needs. Safety Science, 131:104918. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104918>.
- Aslan, V., Yağcı, B. 2018a.** Derin Kazı Destek Sistemlerinin Analizinde Geoteknik Modelleme Farklılıkları. BAUN Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 20(1): 514-526. <https://doi.org/10.25092/baunfbed.418714>
- Aslan, V., Yağcı, B. 2018b.** Konsol Diyafram Duvarların Yatay Deplasmanı için Parametrik Bir Çalışma. AKÜ FEMÜBİD, 18:015601, 616-628. <https://doi.org/10.5578/fmbd.66938>
- Bahadır, AA., Onur, Mİ. 2017.** Derin Kazı Destek Sistemi Tasarımında Zemin Modeli Seçimi: Bir Vaka Analizi. 7. Geoteknik Sempozyumu, s. 583, Türkiye.
- Bai, X., Chen, X., Zhang, M. 2019.** Pile-Steel Support-Anchor System for Foundation in Rock-Soil Layer. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 55 (6): 425-432. <https://doi.org/10.1007/s11204-019-09559-w>
- Berilgen, MM. 2011.** Model sınırları. Plaxis ile Hesaplamalı Geoteknik Kursu, GEOgrup A.Ş., Kültür Üniversitesi, İstanbul.
- Cevahir, A. 2022.** Ankrajlı Diyafram Duvarların Nümerik Analiz Yöntemleri ile Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 71 s.
- Engin, V. 2012.** Comparison of Factor of Safety Obtained from Limit Equilibrium Methods with Strength Reduction Factors in Finite Element Modeling. Master's Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, 141 s.
- Fenerci, E. 2010.** Palpaş Perdeli Derin Kazı Destek Sistemlerinde Zemin Kesiti ve Tasarım Yönteminin Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 120 s.
- GEO5 2022.** Geotechnical Software, Fine company, Czech Republic.
- Harahap, SE., Ou, C. 2020.** Finite element analysis of time-dependent behavior in deep excavations. Computers and Geotechnics 119: 103300. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103300>
- Hayta, Ö. 2005.** Finite Element Analysis of Tieback Wall Using Plaxis: A Case Study. Master's Thesis, Graduate Program in Civil Engineering Boğaziçi University, 123 s.

- Kim, S., Finno, R.J. 2020.** Inverse analysis of Hypoplastic Clay model for computing deformation caused by excavations. *Computers and Geotechnics*, 122: 103499. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103499>
- Kökten, Ö., Özgörgün, P., Ghalandari, MT. 2018.** Çok Sıra Ankrajlarla Destekli Derin Kazıların Deplasmana Dayalı Tasarımı. *Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 17. Ulusal Konferansı, Türkiye.*
- Levasseur, S., Malecot, Y., Boulon, M., Flavigny, E. 2010.** Statistical inverse analysis based on genetic algorithms and principal component analysis: Applications to excavation problems and pressuremeter tests. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 34: 471-491. <https://doi.org/10.1002/nag.813>.
- Li, G., Li, Q., Wang, J., Dong, J., Sun, Q. 2022.** The Deformation Characteristics of a 40-m-Deep Excavation Supported by a Suspended Diaphragm Wall in Rock and Soil Composite Ground. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26 (3): 1040-1050. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-1810-2>.
- Lim, A., Ou, C. 2017.** Stress Paths in Deep Excavations Under Undrained Conditions and Its Influence on Deformation Analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 63: 118-132. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.12.013>.
- Ma'ruf, MF., Darjanto, H. 2017.** Back Calculation of Excessive Deformation on Deep Excavation, *Procedia Engineering*, 171: 502-510. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.362>.
- Mollamahmutoglu, M., Avcı, E., Devenci, E., Gökçe, A. 2021.** Çok İnce Taneli Yüksek Fırın Cürufu Çimento ile Stabilize Edilmiş Düşük Plastisiteli Killi Zeminin Mühendislik Özellikleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36 (2): 985-996. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.642402>
- Moormann, C. 2004.** Analysis of Wall and Ground Movements Due to Deep Excavations in Soft Soil Based on a New Worldwide Database. *Soils and Foundations*, 44 (1): 87-98. <https://doi.org/10.3208/sandf.44.87>
- Muntohar, AS., Liao, H. 2013.** Finite Element Analysis of the Movement of the Tie-Back Wall in Alluvial-Silty Soils. *Procedia Engineering*, 54: 176-187. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.017>
- Nalçakan, MS., Binzet, S., Cabarkapa, Z. 2016.** Derin Bir Kazının Gözlem ve Davranışı. *Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 16. Ulusal Konferansı*, s. 667, Türkiye.
- Nossan, AS., Sokolic, I., Plepelic, G. 2009.** Design of Anchored Retaining Structures by Numerical Modelling. *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, s. 1381, Egypt.
- Orhan, M., Özer, M., Işık, NS. 2006.** Doğal Zeminlerin Likit Limitinin Belirlenmesinde Casagrande ve Koni Batma Yöntemlerinin Karşılaştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21 (4): 711-720. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gazimmfd/issue/6670/88862>
- Özer, M. 2008.** Örnek Hazırlama Yönteminin Likit Limit ve Plastik Limit Değerlerine Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23 (3): 689-698. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gazimmfd/issue/6677/88531>
- Plaxis 2D 2018.** Geotechnical Software, Bentley Systems, USA.
- Sabatini, PJ., Pass, DG., Bachus, RC. 1999.** Ground Anchors and Anchored Systems. FHWA-IF-99-015, Office of Bridge Technology Washington D.C.
- Şahin, M., Tonaroğlu, M. 2016.** Derin Kazılarda Oluşan Yanal Deformasyonların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Tahmin Edilenler ile Karşılaştırılması. *Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi*, s. 455, Türkiye.
- Şen, B. 2021.** Bir Ankrajlı İksa Sistemi Geoteknik Tasarımında Malzeme Modeli Etkisinin İncelenmesi ve Aletsel Ölçüm Sonuçları ile Karşılaştırılması. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, 197 s. Sayfa sayısı eklenmelidir
- Tan, YC., Liew, SS., Gue, SS., Taha, MR. 2001.** A Numerical Analysis of Anchored Diaphragm Walls for a Deep Basement in Kuala Lumpur, Malaysia. *Proc. 14th Southeast Asian Geotechnical Conf.*, s. 453, Hong Kong.
- Ünver, M., Ünver, İS. 2022.** Monitoring of a Deep Excavation Supported by Anchored Retaining Walls. *Indian Geotech J.*, 52 (1): 227-236. <https://doi.org/10.1007/s40098-021-00544-5>
- Vural, U., Işık, NS. 2019.** Ankrajlı İksalarda Analiz Sonuçlarının Saha Deneyleri ile Karşılaştırılması. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2 (1): 74-83. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/bufbd/issue/46478/558451>
- Voottipruex, P., Jamsawang, P., Sukontasukkul, P., Jongpradist, P., Horpibulsuk, S., Chindaprasirt, P. 2019.** Performances of SDCM and DCM walls under deep excavation in soft clay: Field tests and 3D simulations. *Soils and Foundations*, 59: 1728-1739. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.07.012>.
- Yıldız, Ö., Berilgen, MM. 2017.** Destekli Derin Kazıların İnşaa ve Tasarım Performansı. *7. Geoteknik Sempozyumu, Türkiye.*



Gıda Takviyesine Giden Yolda *Gynostemma pentaphyllum* (Thunb.) Makino Bitkisi Üzerinde Ön Çalışmalar: Antidiyabetik Aktivite ve Fitokimyasal Analizler

Preliminary Studies on Gynostemma pentaphyllum (Thunb.) Makino toward Dietary Supplement Development: Antidiabetic Activity and Phytochemical Analysis

Methiye Mancak^{1*} , Fatma Zeynep Uzuner² , Ufuk Koca Çalışkan^{1,3} 

¹Gazi Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi, Farmakognozi Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi, Ankara, Türkiye

³Düzce Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi, Farmakognozi Anabilim Dalı, Düzce, Türkiye

Öz

Gynostemma pentaphyllum (Thunb.) Makino, jiaogulan olarak adlandırılan Cucurbitaceae familyasına ait bir bitkidir. Bitkinin toprak üstü kısımları uzun yıllardır diyabet tedavisi için kullanılmaktadır. Literatürde, *G. pentaphyllum*'un antidiyabetik etkisi in vivo ve klinik çalışmalar ile belirlenmiştir. Diğer taraftan bitkinin etki mekanizmasını aydınlatmaya yönelik in vitro aktivite çalışmalarının kısıtlı olduğu tespit edilmiştir. Amerika, Avrupa, Çin ve Asya ülkelerinde bitkiyi içeren ticari preparatları bulunsada Türkiye'de herhangi bir ürünü bulunmadığı belirlenmiştir. Bu eksiklerden yola çıkarak bu çalışmada *G. pentaphyllum*'un antidiyabetik aktivitesinin belirlenmesi, etki mekanizmasının aydınlatılması ve ileride standardize ekstrelerinin hazırlanabilmesi için ön fitokimyasal analizlerinin yapılması amaçlanmıştır. Araştırmalar sonucunda bitkinin hem metanollü hem de sulu ekstresinin in vitro koşullarda α -amilaz ve α -glukozidaz enzimlerini inhibe ederek antidiyabetik aktivite gösterdiği tespit edilmiştir. Fenolik madde ve flavonoid içeriği bakımından metanollü ekstrenin sulu ekstreten çok daha zengin olduğu belirlenmiştir. Araştırmalarımız *G. pentaphyllum*'dan standart ekstre ve gıda takviyesi hazırlanması için ön verileri sağlamakta olup ileri çalışmalar için öncü bir çalışmadır.

Anahtar Kelimeler: Diyabet, fitokimyasal analiz, *Gynostemma pentaphyllum*, saponin, YPSK.

Abstract

Gynostemma pentaphyllum (Thunb.) Makino is a plant belonging to the Cucurbitaceae family called jiaogulan. The herb of the plant is used for the treatment of diabetes for many years. In the literature, the antidiabetic effect of *G. pentaphyllum* was determined by in vivo and clinical studies. On the other hand, it was determined that in vitro activity studies aimed at elucidating the mechanism of action of the plant are limited. Although there are commercial preparations containing the plant in America, Europe, China and Asian countries, it was determined that there is no product in Turkey. Based on these deficiencies, the aim of this study was to determine the antidiabetic activity of *G. pentaphyllum*, to elucidate its mechanism of action and to perform preliminary phytochemical analyses to prepare standardized extracts in the future. As a result of the studies, it was determined that both methanol and aqueous extracts of the plant showed antidiabetic activity by inhibiting α -amylase and α -glucosidase enzymes under in vitro conditions. The methanol extract was much richer than the aqueous extract in terms of phenolic and flavonoid content. Our research provides preliminary data for the preparation of standardized extracts and food supplements from *G. pentaphyllum* and is a pioneering work for further studies.

Keywords: Diabetes, *Gynostemma pentaphyllum*, HPLC, phytochemical analysis, saponin.

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

Methiye Mancak  orcid.org/0000-0002-0085-7552

Fatma Zeynep Uzuner  orcid.org/0009-0007-4763-3728

Ufuk Koca Çalışkan  orcid.org/0000-0002-5216-7588



1. Giriş

Gynostemma pentaphyllum (Thunb.) Makino (GP), Cucurbitaceae familyasından *Gynostemma* Blume cinsinin 19 türünden biridir (Nguyen vd. 2021). 'Jiaogulan' olarak adlandırılan bu bitki Vietnam, Çin ve diğer bazı Asya ülkelerinde yabancı olarak yetişen, çok yıllık sürünen bir bitkidir. *G. pentaphyllum* bitkisi pürüzsüz veya tüylü olan ince dallarla karakterizedir. Yapraklar tüylü, zarımsı ve 4 ila 7 foliatlıdır. Yapraklar oval-eliptik ve dikdörtgen, oval veya keskindir ve nadiren yukarı dönüktür. Üst kısmı koyu yeşil ve alt kısmı soluk yeşildir. İki evcikli çiçekli bir bitkidir. Erkek çiçekler konik ve çiçek açmış olup çapı 15-20 cm'dir. Küçük, çok dallı tütün 4-5 (15'e kadar) cm uzunluğunda dalları vardır. Sap 2-3 mm uzunluğunda ve iplik benzeridir. Küçük kaliks, her biri 0,7 mm uzunluğunda 5 üçgen, apikulat loba sahiptir. Açık yeşil veya beyaz taç yaprağında beş yarık vardır. Sivri uçlu, tek damarlı çiçekler oval-mızrak şeklinde ve biraz çentiklidir (2,5-3,0 mm uzunluk, 1 mm genişlik). Stamenler, tepesinde anterler bulunan bir sütun oluşturan beş bitişik iplikten oluşur (Ahmed vd. 2023). Türkiye'de doğal olarak yetişmeyen bitkinin çeşitli şehirlerinde kültürü yapılmaktadır. Bitkiden hazırlanan çaylar uzun yıllardır geleneksel olarak kullanılmaktadır. Guizhou'da "ölümsüzlük otu" olarak da adlandırılan bitkinin yaşlı bireyler tarafından sıklıkla yutulduğu tespit edilmiştir (Bensky vd. 2004). Bitkinin toprak üstü kısımları geleneksel olarak astım, bronşit, diyabet, gastrit, hipertansiyon, kanser ve uykusuzluk gibi hastalıklar için kullanılmıştır (Blumert ve Liu 1999, Ahmed vd. 2023). Literatür taramaları sonucunda GP'nin çok çeşitli güçlü biyoaktiviteleri dolayısıyla büyük ilgi çeken ve umut veren bir bitki olduğu tespit edilmiştir. Türün antioksidan, anti-diyabetik, anti-aterojenik, antikanser, anti-obeze, nöroprotektif, anti-anksiyete, antihiperlipidemik, immunomodülatör ve hepatoprotektif etkileri bilimsel çalışmalarla araştırılmıştır (Cheng vd. 2011, Li vd. 2015, Liou vd. 2010, Megalli vd. 2006, Wang vd. 2020, Yang vd. 2008, Zhai vd. 2021). GP fitokimyasal açıdan değerlendirildiğinde gypenosid veya gynosaponin olarak isimlendirilen dammaran tipi saponinler açısından zengin olduğu bulunmuştur. Saponinlere ek olarak polisakkaritler, flavonoidler, fitosteroller, amino asitler ve inorganik elementler de bitki içeriğinde yer alan bileşenler olarak belirlenmiştir (Su vd. 2021).

Amerika, Avrupa, Çin ve Asya ülkelerinde jiaogulanın çay, meşrubat, spor içeceği, tablet, hazır toz, kapsül, oral sıvı ve hap formlarında hazırlanmış ticari ürünleri bulunmaktadır (Nguyen vd. 2021, Razmovski-Naumovski vd. 2005). Ülkemizde bitkinin kültürü yapılsa da standardize ekstresini

içeren takviyeler de dahil olmak üzere herhangi bir ürünü bulunmamaktadır. Bu eksikten yola çıkılarak bu çalışmada ülkemizde kültürü yapılan GP'nin standart ekstresini içeren gıda takviyesi hazırlanabilmesi için ön çalışmalar yapılmıştır. GP'nin geleneksel kullanımına ve literatür verilerine dayanarak farklı solvanlarla hazırlanan ekstrelerinin antidiyabetik aktivitelerinin tanımlanması amaçlanmıştır. Antidiyabetik aktivite sonuçlarından yola çıkarak etkili ekstrenin belirlenmesi ve bu aktiviteden sorumlu bileşiklerin tanımlanması hedeflenmiştir. Bu hedefler doğrultusunda in vitro antidiyabetik enzim inhibisyon analizleri ve fitokimyasal analizler gerçekleştirilmiştir.

2. Gereç ve Yöntemler

Bu çalışmada GP'nin Muğla'da kültürü yapılan örnekleri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle GP'nin toprak üstü kısımlarından metanollü ve sulu ekstreleri hazırlanmıştır. Antidiyabetik aktivitesinin belirlenmesi için in vitro α -amilaz ve α -glukozidaz inhibisyon analizleri yapılmıştır. Fitokimyasal analizler kapsamında toplam fenol miktar tayini, toplam flavonoid miktar tayini ve YPSK (Yüksek Basıncılı Sıvı Kromatografisi) analizleri yapılmıştır. YPSK analizlerinde miktar tayinleri rutin üzerinden gerçekleştirilmiştir.

2.1. Bitkiden Ekstre Hazırlanması

GP bitkisinin toprak üstü kısımları kurutulmuş, toz edilerek metanollü ve sulu ekstreleri hazırlanmıştır. Metanollü ekstresi için maserasyon ve sulu ekstre için infüzyon tekniği kullanılmıştır.

Metanollü ekstre hazırlanırken toz edilmiş bitki örnekleri üzerine metanol ilave edilmiş ve oda sıcaklığında 24 saat bekletilmiştir. Süre sonunda ekstre süzülüş düşük basınç altında ve 40-45 °C sıcaklıkta rotavaporda yoğunlaştırılmıştır. Sulu ekstre halk arasında kullanımına uygun olacak şekilde, kurutulmuş bitki örnekleri üzerine kaynar su ilave edilip 10 dakika bekletilerek, ve süre sonunda süzülerek hazırlanmıştır. Süzünü lıyofilizatörde yoğunlaştırılmıştır. Prosedürler her iki ekstre için de üçer kere tekrar edilmiştir. Ekstraksiyon işlemi sonucunda sulu ekstre %28.53 ve metanollü ekstre %22.48 verimle elde edilmiştir. Ekstreler çalışma esnasında buzdolabında muhafaza edilmiştir.

2.2. In vitro Antidiyabetik Aktivite Çalışmaları

α -Amilaz inhibisyon aktivite tayini, Eruygur vd. 2019 tarafından kullanılan in vitro yöntem modifiye edilerek gerçekleştirilmiştir. 250 μ g/ml, 125 μ g/ml, 62.5 μ g/ml, 31.25 μ g/ml, 15.625 μ g/ml konsantrasyonlarda bitki ekstreleri ve

amilaz enzimi (Sigma-Aldrich Type VI-B, ≥ 5 U/mg A3176-500KU) çözeltisi fosfat tamponu içinde hazırlanmıştır. Bitki ekstralarının olduğu ortama 50 μ L amilaz enzimi (0.8 U/mL) ilave edilmiş ve 37 °C de 10 dakika inkübasyona bırakılmıştır. Sonrasında üzerine 50 μ L nişasta çözeltisi (%0.05) eklenerek 10 dakika daha inkübe edilmiştir. İnkübasyon süresi sonunda ortama 25 μ L HCl (1 M) ve 100 μ L lugol çözeltisi ilave edilmiş ve 540 nm de absorbansları okunmuştur. Kontrol grubu için ekstre yerine tampon çözeltisi ve referans madde olarak akarboz kullanılmıştır. α -amilaz enzimi üzerindeki inhibisyon etki düzeyleri absorbans değerleri sayesinde aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır (Denklem 1):

$$\text{İnhibisyon (\%)} = [1 - (\text{Absorbans (örnek)} / \text{Absorbans (kontrol)})] \times 100 \quad (1)$$

Absorbans (örnek): Örneklerin 540 nm'deki absorbans değeri

Absorbans (kontrol): Kontrolün 540 nm'deki absorbans değeri

α -Glukozidaz inhibisyon aktivite tayini, Eruygur vd. 2019 tarafından kullanılan in vitro yöntem modifiye edilerek yapılmıştır. Deneyin esası p-nitrofenil-D-glukopiranozid'in α -glukozidaz enzimi ile hidroliz reaksiyonu sonucu açığa çıkan p-nitrofenol'ün 405 nm'de absorpsiyonunun spektrofotometrik olarak ölçümüne dayanmaktadır. 250 μ g/ml, 125 μ g/ml, 62.5 μ g/ml, 31.25 μ g/ml, 15.625 μ g/ml konsantrasyonlardaki bitki ekstraları ve α -glukozidaz enzimi (Sigma-Aldrich Type I, ≥ 10 U/mg G5003-1KU) çözeltisi fosfat tamponu ile hazırlanmış olup substrat olarak p-nitrofenil- α -D-glukopiranozid, referans madde olarak akarboz kullanılmıştır. Bitki ekstralarının olduğu ortama 50 μ L α -glukozidaz enzimi ilave edilerek 37 °C de 5 dakika inkübasyona bırakılmıştır. Daha sonra 50 μ L p-nitrofenil- α -D-glukopiranozid (5 mM) eklenerek 37 °C de 30 dakika ikinci kez inkübe edilmiştir. İnkübasyon sonrası absorbans 405 nm de okunmuştur. Spektrofotometrik olarak ölçülen absorbans değerleri sayesinde bitki ekstralarının α -glukozidaz üzerindeki inhibisyon etki düzeyleri aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır (Denklem 2):

$$\text{İnhibisyon (\%)} = [1 - (\text{Absorbans (örnek)} / \text{Absorbans (kontrol)})] \times 100 \quad (2)$$

Absorbans (örnek): Örneklerin 405 nm'deki absorbans değeri

Absorbans (kontrol): Kontrolün 405 nm'deki absorbans değeri

2.3. Fitokimyasal Analiz Çalışmaları

Fitokimyasal analiz çalışmaları kapsamında öncelikle toplam fenol ve toplam flavonoid miktarı tayinleri yapılmıştır. YPSK analizleri kapsamında GP'nin ana flavonoidlerinden biri olmasının yanı sıra nispeten kolay erişilebilir olması da göz önünde bulundurularak rutin kantitatif analizi yapılmıştır.

2.3.1. Toplam Fenol Miktar Tayini

Analiz, Singleton ve Rossi, 1965 tarafından kullanılan in vitro Folin-Ciocalteu yöntemi modifiye edilerek gerçekleştirilmiştir. Deneyde referans madde olarak gallik asit kullanılmıştır. Ekstreler 5mg/mL konsantrasyonda hazırlanmıştır. Ekstre örneklerinden 10 μ L alınıp üzerine Folin-Ciocalteu reaktifi ve doymuş Na₂CO₃ eklenerek 2 saat inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon sonunda 765 nm de köre (distile su) karşı absorbanslar okunmuştur. Gallik asite ait kalibrasyon denklemi $y = 2.5565x + 0.0263$ ($r^2 = 0.99$) olarak belirlenmiştir. Toplam fenol konsantrasyonu gallik asit mg/g ekstre eşdeğeri olarak hesaplanmıştır.

2.3.2. Toplam Flavonoid Miktar Tayini

Toplam flavonoid miktar tayini Woisky ve Salantino, 1998 tarafından kullanılan in vitro alüminyum klorür kolorimetrik yöntemi ile hesaplanmıştır. 2mg/mL konsantrasyonlarında hazırlanan ekstre örneklerinden 0.5 mL alınmıştır. Üzerine sırasıyla %75 etanol, 100 μ L AlCl₃ (% 10), 100 μ L sodyum asetat çözeltisi (1 M) ve distile su ilave edilmiş oda sıcaklığında 30 dakika inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon sonrası 415 nm'de köre karşı (etanol) absorbansları ölçülmüştür. Referans madde olarak kersetin kullanılmış ve kersetine ait kalibrasyon denklemi $y = 3.0537x - 0.0042$ ($r^2 = 0.99$) olarak belirlenmiştir. Toplam flavonoid miktarı kersetin mg/g ekstre eşdeğeri olarak hesaplanmıştır.

2.3.3. Yüksek Basınçlı Sıvı Kromatografisi (YPSK)

Analizleri

GP'nin metanollü ve sulu ekstralarının UV-VIS spektrumlarından ve literatürde daha önce yapılmış çalışmalardan yola çıkılarak YPSK analiz koşulları belirlenmiştir. Analiz C18 (150 $\times$ 4.6 mm, 5 μ m) kolon ve %0.1 formik asit-su (A) ile %0.1 formik asit-asetonitril (B) mobil faz sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. YPSK analiz koşulları Çizelge 1'de sunulmuştur.

Rutine ait kalibrasyon denkleminin belirlenmesi için rutin metanol içerisinde çözülerek stok çözeltisi hazırlanmıştır. Stok çözelti metanol ile 100 ppm, 50 ppm, 25 ppm, 10 ppm ve 5 ppm konsantrasyonlarına seyreltilerek açıklanan YPSK prosedüründe analizleri gerçekleştirilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

In vitro antidiyabetik aktivite tayini sonuçları GP bitkisinin α -amilaz ve α -glukozidaz enzimlerini doza bağlı olarak artıran bir şekilde inhibe ettiğini göstermiştir. Analiz sonuçları, bitkinin metanollü (IC50: 117.7 $\mu\text{g/ml}$) ve sulu ekstralarının (IC50: 106.2 $\mu\text{g/ml}$) α -amilazı benzer ölçüde inhibe ettiğini göstermiştir. Ekstrelerin α -amilaz inhibitör etkisinin referans madde akarbozdan (IC50: 34.43 $\mu\text{g/ml}$) daha düşük düzeyde olduğu bulunmuştur (Çizelge 2).

Çizelge 1. YPSK analiz koşulları.

Çizelge	Çizelge
Kolon	C18 (150 $\times$ 4.6 mm, 5 μm) kolon
Kolon sıcaklığı	30 $^{\circ}\text{C}$
Mobil faz	A: %0.1 formik asit -su B: %0.1 formik asit-asetonitril 0-10 dk, %0 $\rightarrow$ 10 B 10-15 dk, %10 B 15-30 dk, %10 $\rightarrow$ 15 B 30-40 dk, %15 B 40-60 dk, %15 $\rightarrow$ 25 B 60-70 dk, %25 $\rightarrow$ 35 B 70-80 dk, %35 $\rightarrow$ 40 B 80-90 dk, %40 $\rightarrow$ 50 B 90-110 dk, %50 $\rightarrow$ 70 B 110-115 dk, %70 $\rightarrow$ 90 B 115-120 dk, %90 $\rightarrow$ 10 B
Akış hızı	0.8 ml/dk
Enjeksiyon hacmi	5 μL
Dalga boyu	280 nm
Analiz süresi	120 dk

Literatür taramalarında GP'un α -amilaz üzerindeki etkinliğini araştıran çok az çalışma olduğu tespit edilmiştir. Vo vd. (2022) çalışmasında bizim çalışmamıza benzer şekilde GP bitkisinin etanollü ekstresinin α -amilaz inhibitör aktivitesi akarbozdan daha düşük seviyede bulunmuştur. Çalışma sonuçlarına göre, 100 $\mu\text{g/ml}$ konsantrasyonda etanollü ekstre %38.5 $\pm$ 3.8 inhibisyon sağlarken akarboz %59 $\pm$ 5.3 inhibisyon sağlamıştır (Vo vd. 2022).

α -Glukozidaz inhibisyon analizleri doğrultusunda, GP bitkisinin hem metanollü (IC50: 13.57 $\mu\text{g/ml}$) hem sulu ekstresinin (IC50: 11.40 $\mu\text{g/ml}$) α -glukozidaz enzimini akarboza (IC50: 9.25 $\mu\text{g/ml}$) benzer ve güçlü bir şekilde inhibe ettiği belirlenmiştir (Çizelge 3).

Literatürde bitkinin farklı çözücüler kullanılarak hazırlanmış ekstralarının α -glukozidaz enzimini inhibe ettiği gösterilmiştir. Yang vd. (2013) çalışmasında bizim çalışmamıza benzer şekilde, GP metanol ekstresinin (%12.79) α -glukozidaz enzimi üzerinde akarboza (%13.26) yakın bir inhibe edici aktivite gösterdiği tespit edilmiştir. Phanjaroen vd. (2024) çalışmasında sıcak su kullanılarak hazırlanan sulu ekstre 2.5 mg/ml konsantrasyonda %25.75 inhibisyon göstermiştir. Çalışmada, GP'nin sıcak su kullanılarak hazırlanan sulu ekstresinin ve *Gymnema inodorum* (GI) bitkisinin sulu ekstresiyle kombine edilerek hazırlanan formülasyonlarının α -glukozidaz enzimi üzerindeki aktivitelerini karşılaştırmıştır. Çalışma verileri, 1.25 mg/ml konsantrasyonda α -glukozidaz enzimini, GP ekstresinin %18.60, GI ekstresinin %18.26, GP:GI (1:1,w/w) formülasyonunun %30.40 ve GP:GI (2:1,w/w) formülasyonunun %34.04 oranından inhibe ettiğini göstermiştir. Bahsi geçen çalışma GP ve GI'nin kombine formülasyonlarının α -glukozidaz enzimi üzerinde sinerjistik bir etkiye sahip olduğu tespit etmiş

Çizelge 2. GP ekstralarının α -amilaz enzim inhibisyonu sonuçları.

Ekstre	250 $\mu\text{g/ml}$	125 $\mu\text{g/ml}$	62.50 $\mu\text{g/ml}$	31.25 $\mu\text{g/ml}$	15.62 $\mu\text{g/ml}$	IC50 $\mu\text{g/ml}$
Metanollü ekstre	64.11 $\pm$ 1.37	49.44 $\pm$ 1.44	40.37 $\pm$ 0.41	28.51 $\pm$ 1.94	11.27 $\pm$ 0.71	117.7
Sulu ekstre	68.53 $\pm$ 1.02	50.76 $\pm$ 3.47	42.43 $\pm$ 1.84	24.18 $\pm$ 1.97	14.93 $\pm$ 1.65	106.2
Akarboz (Referans madde)	91.61 $\pm$ 0.46	83.85 $\pm$ 1.45	65.37 $\pm$ 0.02	51.54 $\pm$ 0.11	24.02 $\pm$ 0.74	34.43

Çizelge 3. GP ekstralarının α -glukozidaz enzim inhibisyonu sonuçları.

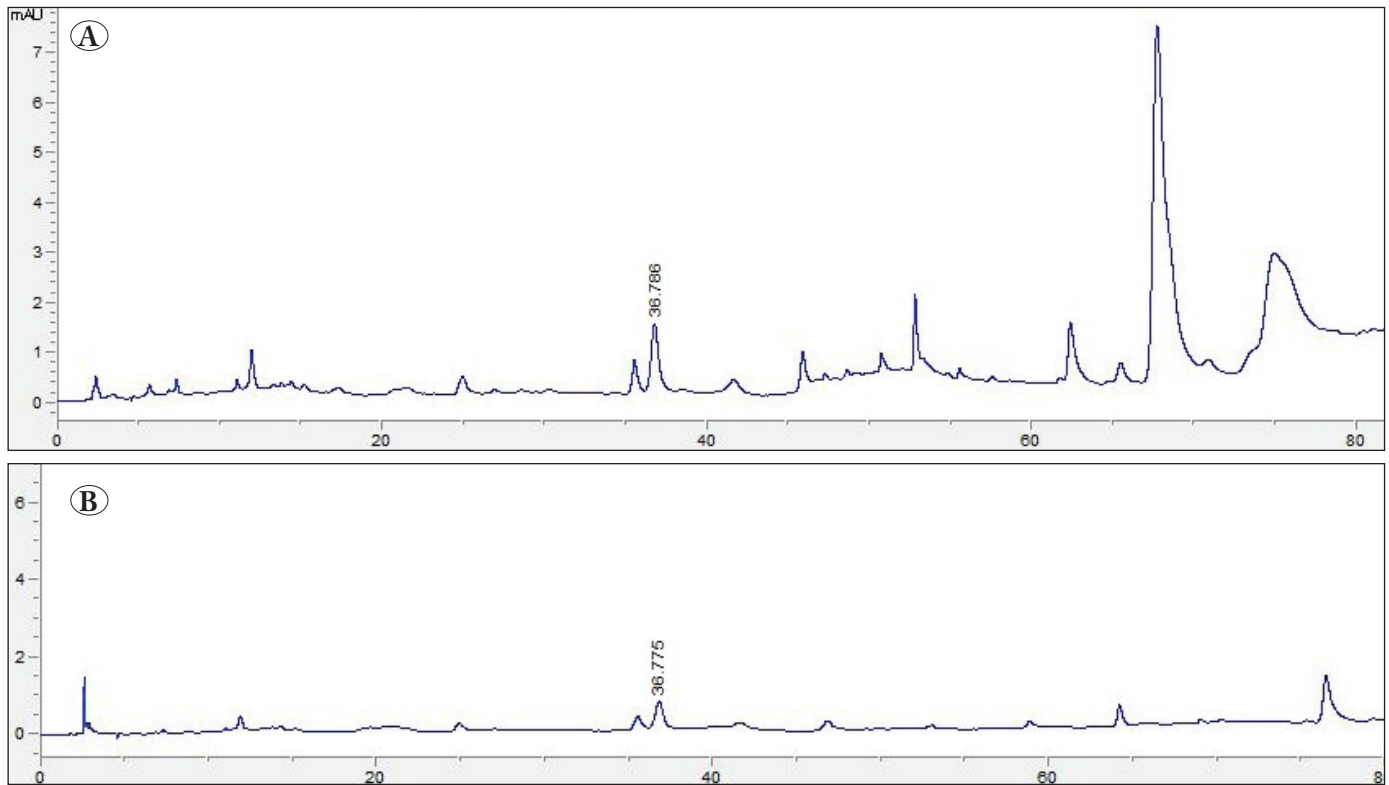
Ekstre	250 $\mu\text{g/ml}$	125 $\mu\text{g/ml}$	62.50 $\mu\text{g/ml}$	31.25 $\mu\text{g/ml}$	15.62 $\mu\text{g/ml}$	IC50 $\mu\text{g/ml}$
Metanollü ekstre	89.13 $\pm$ 1.58	75.92 $\pm$ 0.67	72.45 $\pm$ 1.69	62.97 $\pm$ 0.77	52.35 $\pm$ 2.53	13.57
Sulu ekstre	91.63 $\pm$ 0.51	84.73 $\pm$ 1.75	81.40 $\pm$ 0.73	69.49 $\pm$ 1.17	55.34 $\pm$ 2.98	11.40
Akarboz (Referans madde)	92.24 $\pm$ 0.91	85.65 $\pm$ 0.74	80.24 $\pm$ 2.64	73.86 $\pm$ 0.04	58.11 $\pm$ 0.36	9.25

olsa da çalışmada referans bir madde kullanılarak kıyaslama yapılmamıştır (Phanjaroen vd. 2024). Daha önceki yıllarda yapılan başka bir çalışmada bitkinin etanol ekstresinin akarbozdan daha güçlü bir α -glukozidaz inhibitörü olduğu bulunmuştur. Akarbozun 53.9 $\mu\text{g/ml}$ konsantrasyonda % 50 lik bir inhibe edici etkiye sahipken, etanol ekstresinin 42.8 $\mu\text{g/ml}$ konsantrasyonda aynı oranda inhibe edici etkiye sahip olduğu gösterilmiştir (Megalli vd. 2006).

Fitokimyasal analiz sonuçları, GP bitkisinin metanollü ekstresinin toplam fenolik ve flavonoid içeriği bakımından daha zengin olduğunu göstermiştir. Metanollü ekstrenin toplam fenol miktarı 18.77 mg/g gallik asit iken toplam flavonoid miktarı 34.53 mg/g kersetin olarak tespit edilmiştir. Sulu ekstrenin toplam fenolik içeriği 16.94 mg/g gallik asit ve toplam flavonoid miktarı 9.81 mg/g kersetin bulunmuştur. Bu çalışmaya benzer şekilde, farklı yerlerde üretilen jiaogulan çaylarının karşılaştırıldığı Şamec vd. (2016) çalışmasında, %80 metanol kullanılarak hazırlanan ekstraktların toplam fenol içeriğinin (10.42 ve 11.57 mg/g gallik asit), sulu ekstraktlarının fenolik içeriğinden (6.61 ve 8.11 mg/g gallik asit) daha fazla olduğu belirlenmiştir. Phanjaroen vd. (2024) çalışmasında GP sulu ekstresinin fenolik içeriği bu çalışmadan çok daha düşük (2.36 ± 0.04 mg/g gallik asit) bulunmuştur (Phanjaroen vd. 2024). Flavonoid içeriği açısından

değerlendirildiğinde de benzer şekilde metanollü ekstraktların (5.39 mg/g rutin ve 4.75 mg/g rutin), sulu ekstraktlardan (2.76 mg/g ve 1.89 mg/g rutin) daha fazla flavonoid içerdiği tespit edilmiştir (Şamec vd. 2016). GP farklı genotiplerinin (di- ve tetraploidler) ve farklı kısımlarının (yaprak ve tüm bitki) incelendiği başka bir çalışmada, bitkinin genotiplerine göre farklılık göstermekle birlikte yaprak kısımlarının toplam fenol miktarı 22.5-41.2 mg/g gallik asit aralığında iken tüm bitki için bu değerler 8.1-24.1 mg/g gallik asit eşdeğeri aralığında bulunmuştur (Xie vd. 2011). Zhao vd. (2012) çalışmasında on bir ticari jiaogulan örneğinin kimyasal bileşimlerini incelenmiştir. Örneklerin toplam fenolik içerikleri metanol ekstresi için 1.4-35.1 mg/g ve %50 aseton ekstresi için 6.3-52.3 mg/g iken toplam flavonoid içeriği metanollü ekstre için 1.7-25.5 mg/g ve %50 asetonlu ekstre için 3.8- 50.3 mg/g olarak belirlemiştir (Zhao vd. 2012). Bu çalışmada bulunan sonuçlar literatürdeki çalışmalarla uyumludur. Elde edilen veriler, ekstre içeriğinin bitkinin yetiştirme, toplama, kurutma gibi aşamaların yanı sıra ekstrenin hazırlandığı solvan ve ekstre etme koşullarına göre değiştiğini göstermiştir.

YPSK analizleri sonucunda, GP bitkisinin metanollü ve sulu ekstresinin elde edilen kromatogramları Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. GP bitkisinin metanollü (A) ve sulu (B) ekstraktlarının YPSK kromatogramları.

YPSK koşullarında rutine ait pik 36.7 dakikada tespit edilmiş olup pik alanlarından yola çıkılarak kalibrasyon denklemi $y = 14468x - 11.19$ ($r^2 = 0.99$) olarak belirlenmiştir. Ekstrelerin rutin içeriği bu kalibrasyon denklemi üzerinden tespit edilmiştir. Kantitatif analiz verilerine göre, GP bitkisinin metanollü ekstresinin 18.85 mg/g ekstre ve sulu ekstresinin 2.76 mg/g ekstre rutin içerdiği bulunmuştur. Bu sonuçlar, ekstre hazırlanırken kullanılan çözücünün ekstrenin içerdiği rutin miktarını önemli ölçüde değiştirdiğini göstermiştir. Literatürdeki verilerle karşılaştırıldığında elde edilen sonuçların literatürü destekler nitelikte olduğu tespit edilmiştir. GP farklı genotipleri (di- ve tetraploitler) ve farklı kısımları (yaprak ve tüm bitki) ile gerçekleştirilen bir çalışmada rutin miktarının 1.92- 23.03 mg/g aralığında değiştiği tespit edilmiştir. (Xie vd. 2011). 11 ticari GP örneğinin değerlendirildiği farklı bir çalışmada ise rutin içeriği 0.01- 21.49 mg/g aralığında bulunmuştur (Zhao vd. 2012). Diğer bir çalışmada, GP yapraklarından hazırlanan ekstrenin 23.10 mg/g rutin taşıdığı belirlenmiştir (Jo vd. 2024).

4. Sonuç ve Öneriler

GP uzun yıllardır geleneksel olarak diyabet için kullanılan bir bitki olup antidiyabetik etkisi literatürde yer alan daha önceki birkaç çalışmada gösterilmiştir. Bu çalışmada bitkinin antidiyabetik etkisi bir kez daha kanıtlanmıştır. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bu araştırma ile GP'nin antidiyabetik etkisini α -amilaz ve α -glukozidaz enzimlerini inhibe ederek gösterdiği tespit edilmiş olup bitkinin etki mekanizması aydınlatılmıştır. GP bitkisinin metanollü ve sulu ekstralarının her ikisinin de enzimleri inhibe edebildiği bulunmuştur. Ekstrelerin enzimler üzerinde aynı dozlarda benzer inhibisyon oranlarına sahip olduğu belirlenmiştir. Diğer taraftan rutin içeriği ve toplam flavonoid içeriği bakımından ekstralar arasında ciddi farklılıklar olduğu gözlenmiştir. Literatür incelendiğinde GP bitkisi dammaran tipi saponinler açısından oldukça zengin olduğu tespit edilmiştir (Zhao vd. 2012). Bu bilgiler bitkinin antidiyabetik aktivitesinin flavonoid içeriğinden ziyade saponin içeriğinden kaynaklanabileceğini düşündürmüştür. Bitkinin dammaran tipi saponinlerinden biri olan Gylongiposid P'nin insülin salınımını uyardığını gösteren bir çalışma bu düşüncemizi desteklemektedir (Lundqvist vd. 2019). Diğer taraftan bu düşüncenin kanıtlanması için saponinlerin de dahil edildiği daha ileri çalışmalara ihtiyaç vardır.

Bu çalışma bildiğimiz kadarıyla GP bitkisinin metanollü ve sulu ekstralarının hem α -amilaz hem de α -glukozidaz enzimleri üzerindeki etkilerinin kıyaslandığı, ekstraların

fitokimyasal açıdan da karşılaştırıldığı ilk çalışma olarak literatüre ciddi katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Bu çalışma verilerine göre GP'nin α -amilaz ve α -glukozidaz enzimlerini inhibe ederek antidiyabetik etki gösterdiğini, hem metanollü hem de sulu ekstralarının antidiyabetik aktivite için kullanılabileceğini öne sürüyoruz. Ön çalışma olarak tasarlanan bu çalışmanın devamında antidiyabetik aktivitenin saponinlerle ilişkisinin kanıtlanması için daha ileri fitokimyasal analizlerinin yapılmasını, standart ekstralarının hazırlanmasını ve toksisite çalışmalarının gerçekleştirilmesini amaçlıyoruz. Çalışmalar neticesinde değerli bir bitki olan GP'den ülkemizde üretilen yerli ve milli, kaliteli ürünlerinin elde edilmesini umuyoruz.

Teşekkür: Bu araştırma, 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında gerçekleştirilmiştir. Destekleri için TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız. (Proje no: 1919B012305993)

Bitki temini için Muhlis Partal'a teşekkür ederiz.

Yazar katkısı: Methiye Mancak: Çalışmayı planlamış ve tasarlamış, deneyleri gerçekleştirmiş, verileri toplamış ve analiz etmiş, makaleyi yazmıştır. Fatma Zeynep Uzuner: Deneyleri gerçekleştirmiş ve makaleyi yazmıştır. Ufuk Koca Çalışkan: Çalışmayı planlamış ve tasarlamış, verileri analiz etmiş, makaleyi yazmıştır.

5. Kaynaklar

- Ahmed, A., Saleem, MA., Saeed, F., Afzaal, M., Imran, A., Nadeem, M., Ambreen, S., Imran, M., Hussain, M., Aljbawi, E. 2023. *Gynostemma pentaphyllum* an immortal herb with promising therapeutic potential: A comprehensive review on its phytochemistry and pharmacological perspective. Int. J. Food Prop., 26(1):808-832. Doi: 10.1080/10942912.2023.2185566
- Bensky, D., Clavey, S., Stöger, E. 2004. Materia medica. Chinese Herbal Medicine. 3. Basım, 3-6.
- Blumert, M., Liu, J.L. 1999. Jiaogulan China's "Immortality" Herb. In Torchlight Publishing Inc. (3rd ed). Badger: USA.
- Cheng, T.C., Lu, J.F., Wang, J.S., Lin, L.J., Kuo, H.L., Chen, B.H. 2011. Antiproliferation effect and apoptosis mechanism of prostate cancer cell PC-3 by flavonoids and saponins prepared from *Gynostemma pentaphyllum*. J. Agric. Food Chem., 59(20):11319-11329. Doi: 10.1021/jf2018758
- Eruygur, N., Ucar, E., Akpulat, H.A., Shahsavari, K., Safavi, S.M., Kahrizi, D. 2019. In vitro antioxidant assessment, screening of enzyme inhibitory activities of methanol and water extracts and gene expression in *Hypericum lydiu*m. Mol. Biol. Rep., 46(2):2121-2129. Doi: 10.1007/s11033-019-04664-3

- Jo, HG., Baek, CY., Hwang, Y., Baek, E., Park, C., Song, HS., Lee, D. 2024. Investigating the anti-inflammatory, analgesic, and chondroprotective effects of *Gynostemma pentaphyllum* (Thunb.) Makino in osteoarthritis: an in vitro and in vivo study. *Int. J. Mol. Sci.*, 25(17):9594. Doi: 10.3390/ijms25179594
- Li, B., Zhang, X., Wang, M., Jiao, L. 2015. Characterization and antioxidant activities of acidic polysaccharides from *Gynostemma pentaphyllum* (Thunb.) Markino. *Carbohydr. Polym.*, 127:209-214. Doi: 10.1016/j.carbpol.2015.03.069
- Liou, CJ., Huang, WC., Kuo, ML., Yang, RC., Shen, JJ. 2010. Long-term oral administration of *Gynostemma pentaphyllum* extract attenuates airway inflammation and Th2 cell activities in ovalbumin-sensitized mice. *Food Chem. Toxicol.*, 48(10):2592-2598. Doi: 10.1016/j.fct.2010.06.020
- Lundqvist, LC., Rattigan, D., Ehtesham, E., Demmou, C., Östenson, CG., Sandström, C. 2019. Profiling and activity screening of dammarane-type triterpen saponins from *Gynostemma pentaphyllum* with glucose-dependent insulin secretory activity. *Sci. Rep.*, 9(1):627. Doi: 10.1038/s41598-018-37517-3
- Megalli, S., Davies, NM., Roufogalis, BD. 2006. Anti-hyperlipidemic and hypoglycemic effects of *Gynostemma pentaphyllum* in the Zucker fatty rat. *J. Pharm. Pharm. Sci.*, 9(3):281-291.
- Nguyen, NH., Ha, TKQ., Yang, JL., Pham, HTT., Oh, WK. 2021. Triterpenoids from the genus *Gynostemma*: Chemistry and pharmacological activities. *J. Ethnopharmacol.*, 268:113574. Doi: 10.1016/j.jep.2020.113574
- Phanjaroen, T., Haideri, MH., Khiolaongam, W., Somsak, V., Boonyapranai, K., Ounjaijean, S. 2024. Phytochemical content, antioxidant and α -glucosidase inhibitory activities of *Gynostemma pentaphyllum* and *Gymnema inodorum* extracts. *J. Curr. Sci.*, 14(3):54-54. Doi: 10.59796/jcst.V14N3.2024.54
- Razmovski-Naumovski, V., Huang, TH., Tran, VH., Li, GQ., Duke, CC., Roufogalis, BD. 2005. Chemistry and pharmacology of *Gynostemma pentaphyllum*. *Phytochem. Rev.*, 4:197-219. Doi: 10.1007/s11101-005-3754-4
- Šamec, D., Valek-Žulj, L., Martinez, S., Grúz, J., Piljac, A., Piljac-Žegarac, J. 2016. Phenolic acids significantly contribute to antioxidant potency of *Gynostemma pentaphyllum* aqueous and methanol extracts. *Ind. Crops Prod.*, 84:104-107. Doi: 10.1016/j.indcrop.2016.01.035
- Singleton, VL., Rossi, JA. 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *Am. J. Enol. Vitic.*, 16(3):144-158. Doi: 10.5344/ajev.1965.16.3.144
- Su, C., Li, N., Ren, R., Wang, Y., Su, X., Lu, F., Zong, R., Yang, L., Ma, X. 2021. Progress in the medicinal value, bioactive compounds, and pharmacological activities of *Gynostemma pentaphyllum*. *Molecules*, 26(20):6249. Doi: 10.3390/molecules26206249
- Vo, TS., Le, PU., Ngo, DH. 2022. In vitro hypoglycemic and radical scavenging activities of certain medicinal plants. *Exp. Appl. Biomed. Res.*, 23(4):291-298. Doi: 10.2478/sjccr-2019-0083
- Wang, Z., Wang, Z., Huang, W., Suo, J., Chen, X., Ding, K., Sun, K., Zhang, H. 2020. Antioxidant and anti-inflammatory activities of an anti-diabetic polysaccharide extracted from *Gynostemma pentaphyllum* herb. *Int. J. Biol. Macromol.*, 145:484-491. Doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.12.213
- Woisky, RG., Salatino, A. 1998. Analysis of propolis: some parameters and procedures for chemical quality control. *J. Apic. Res.*, 37(2):99-105. Doi: 10.1080/00218839.1998.11100961
- Xie, Z., Zhao, Y., Chen, P., Jing, P., Yue, J., Yu, L. 2011. Chromatographic fingerprint analysis and rutin and quercetin compositions in the leaf and whole-plant samples of di- and tetraploid *Gynostemma pentaphyllum*. *J. Agric. Food Chem.*, 59(7):3042-3049. Doi: 10.1021/jf104329v
- Yang, X., Zhao, Y., Yang, Y., Ruan, Y. 2008. Isolation and characterization of immunostimulatory polysaccharide from an herb tea, *Gynostemma pentaphyllum* Makino. *J. Agric. Food Chem.*, 56(16):6905-6909. Doi: 10.1021/jf801101u
- Yang, F., Shi, H., Zhang, X., Yang, H., Zhou, Q., Yu, LL. 2013. Two new saponins from tetraploid jiaogulan (*Gynostemma pentaphyllum*), and their anti-inflammatory and α -glucosidase inhibitory activities. *Food Chem.*, 141(4):3606-3613. Doi: 10.1016/j.foodchem.2013.06.015
- Zhai, XF., Zu, ML., Wang, YR., Cui, WY., Duan, Y., Yang, C., Piao, XL. 2021. Protective effects of four new saponins from *Gynostemma pentaphyllum* against hydrogen peroxide-induced neurotoxicity in SH-SY5Y cells. *Bioorg. Chem.*, 106:104470. Doi: 10.1016/j.bioorg.2020.104470
- Zhao, Y., Xie, Z., Niu, Y., Shi, H., Chen, P., Yu, LL. 2012. Chemical compositions, HPLC/MS fingerprinting profiles and radical scavenging properties of commercial *Gynostemma pentaphyllum* (Thunb.) Makino samples. *Food Chem.*, 134(1):180-188. Doi: 10.1016/j.foodchem.2012.02.090



Sakarya Nehri Havzasında Yağış ve Yüzeysel Akış Rejiminin Mevcut Potansiyeli ve Eğilimi

The Present Potential and Trend of Precipitation and Runoff Regime in the Sakarya River Basin

Recep Emre Çakmak*

Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

Öz

Sakarya Nehri Havzası, yüzölçümü ve drenaj alanı ile birlikte havza sınırları içerisinde yerleşik nüfus büyüklüğü, tarım, hayvancılık, madencilik, sanayi, turizm faaliyetleri ile büyük bir habitat olarak nitelendirilebilir. Yağış ve yüzeysel akış rejimindeki değişimler, su potansiyeli, taşkın riski ve yüksek debi ile taşınan katı madde potansiyeli yönünden havza genelinde ve kıyı şeridinde risk faktörüdür. Bu nedenle mevcut çalışmada, Sakarya Nehir Havzası'ndaki tarihsel süreçte, uzun dönemli yağış ve yüzeysel akış ortalamaları ve eğilimleri araştırılmıştır. Mevcut çalışmalarda havzada konuşlandırılmış meteorolojik ve hidrolojik istasyon ölçümleri sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Sakarya Havzası'nın mekânsal ve zamansal ölçekte süreklilik arz eden bir yağış ve yüzeysel akış rejimi değişimini göstermek amacıyla, havzanın tamamını alansal olarak kapsayan eğilimler değerlendirilmiştir. Mekânsal ve zamansal olarak sürekli veri sunan ve küresel olarak tercih edilen Avrupa Orta Vadeli Hava Tahmin Merkezi (ECMWF) ERA5 yeniden analiz verileri kullanılmıştır. 1984-2023 tarihsel periyodunda, ERA5 saatlik yağış ve yüzeysel akış birikim verileri işlenerek, toplamda 40 yıllık dönem için mevsimlik toplam ve yıllık toplam yağış ve yüzeysel akış değerleri elde edilmiştir. Açık kaynaklı coğrafi bilgi sistemi programı olan QGIS yardımıyla akarsu havzası sınırları elde edilmiş ve iklim ortalamaları ile eğilimleri bu havza sınırı içerisinde analiz edilmiştir. Havzada en yüksek yıllık toplam değerlerin gözlemlendiği İnegöl, Bilecik, Sakarya civarlarında 800-1000 mm arasında yağış yüksekliği ortalamaları, 120-180 mm arasında yüzeysel akış yüksekliği ortalamaları bulunmuştur. Mevsimlik ve yıllık toplam yağışlarda 3 mm/yıl eğime varan belirgin artış eğilimleri, yüzeysel akışta ise -1 mm/yıl eğime kadar belirgin azalış eğilimleri hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: ERA5, iklim eğilimleri, sakarya havzası, yağış, yüzeysel akış.

Abstract

Sakarya River Basin can be characterized as a large habitat considering the population density, agriculture, husbandry, mining, industry, and tourism activities as well as the landscape and drainage area. Changes in precipitation and runoff regime are risk factors in the basin and coastline in terms of drought, flood risk, and the potential of sediment transported due to high flow rates. Therefore, in the present study, long-term precipitation and runoff means and trends were investigated during the historical period in the Sakarya River Basin. In the existing studies, meteorological and hydrological station measurements are frequently used. In this study, to demonstrate a continuous change in the precipitation and runoff regime of the Sakarya Basin in spatial and temporal scales, the spatial trends covering the entire basin were evaluated. The globally preferred European Centre for Medium Term Weather Forecasting (ECMWF) ERA5 reanalysis, which provides spatially and temporally continuous data, was used. For the period of 1984-2023, ERA5 hourly precipitation and runoff accumulation data were processed to obtain seasonal total and annual total precipitation and surface runoff values for 40 years. With the help of QGIS, river catchment boundaries were extracted and climate means and trends were analyzed within this catchment boundary. The highest annual total values in the basin were observed around İnegöl, Bilecik, and Sakarya, where the mean precipitation height is between 800-1000 mm and the mean surface runoff height is between 120-180 mm. Significant increasing trends up to 3 mm/year in seasonal and annual total precipitation and significant decreasing trends up to -1 mm/year in surface runoff were found.

Keywords: Climate trend, ERA5, precipitation, sakarya basin, surface runoff.

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: remrecakmak@uludag.edu.tr

Recep Emre Çakmak orcid.org/0000-0003-0700-8622



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

1. Giriş

İklim olaylarındaki doğal döngüler ve periyodik değişimlerin dışında, antropojenik etkiler sebebiyle çoğu iklim parametrelerinde döngüsel olmayan değişikliklerin meydana geldiği belirtilmektedir (Trenberth 2011, Cook vd. 2018). Su potansiyeli açısından önemli iklim parametrelerinden olan yağışlar, iklim değişikliğinin etkileri üzerine yapılan çalışmalarda (Dai vd. 2018, Giorgi vd. 2019) ön plana çıkmaktadır. Yağış rejimindeki değişimlerin birinci derecede etkilediği hidrolojik faktör yüzeyde akışa geçen su miktarının değişimi (Anache vd. 2018) de incelenmeye değerdir. Bilindiği üzere, yeryüzüne düşen yağış bazı hidrolojik süreçlerden sonra yüzey akışı ile akım ağlarını beslemektedir. Akarsu ağına ulaşan artık yağış hem su kaynağı olması, hem de aşırı yağış durumlarında risk teşkil etmesi nedeniyle önem arz etmektedir.

Yağışlar, insan ve diğer canlıların ihtiyaç duyduğu yaşam kaynağı olan suyun yeryüzündeki bütçesine katkı sağlayan önemli bir meteorolojik olaydır. Suyun farklı fiziksel hallerde yeryüzüne yağış olarak ulaşması sonucunda, doğal veya yapay birçok biriktirme sistemi ile su bütçesine dâhil olması, Dünya'da diğer su rezervlerine (Yılmaz 2015) nazaran çok daha düşük oranda bulunan kullanılabilir tatlı su rezervine katkı sağlamaktadır. Yağışların yaşam için gerekli bir kaynak olmasının yanı sıra, şiddetli bir şekilde gerçekleşmesi durumunda taşkın olaylarına sebep olarak, can kayıplarına ve ekonomik kayıplara sebebiyet vermesi açısından da önemli çokça tecrübe edilmiştir (Curebal vd. 2016, Haltas vd. 2021, Özdemir ve Özkaynak Yolcu 2024). Özellikle yağmur şeklinde meydana gelen kısa süreli ve şiddetli yağışlardan kaynaklanan taşkın olayları küresel olarak birçok bölgeyi etkilemektedir. Yeryüzündeki suyun, yağış kaynaklı taşkın olayları ile yaşamsal faaliyetlere etkisinin dışında, havzadaki akım ağında taban akım olarak bilinen akışa etkisi sebebiyle de doğal dengeye etkisi olmaktadır. Yağış sonrası akım ağına katılan su kütlesi ana akım kanalıyla göl ve deniz gibi sistemlere ulaşmaktadır. Bu su kütlesi taşıdığı katı madde potansiyeli ile sistemdeki dengeyi etkilemektedir (Church ve Ferguson 2015, Tu vd. 2019). Akarsuların taşıdığı katı maddeler, akıntı ve dalgalarla kıyı boyunca taşınarak kıyı çizgisini şekillendirmektedir. Yağış rejimine bağlı olarak katı madde taşınımının fazla veya az olması kıyının denge profiline bozarak; kıyı yerleşimlerindeki yapılar, turizm, ulaşım ve liman faaliyetleri üzerinde risk oluşturmaktadır.

Sakarya akarsu havzasında, geniş bir coğrafyayı geçen bir akım ağı ile önemli bir büyüklükte debi Sakarya Nehri ana kolu ve yan kolları ile Karadeniz'e ulaşmaktadır. Nehir su

toplama havzası geniş bir alana sahip olduğu için yağış iklimi ve yüzeysel akış hacminin mevcut durumunun ve eğiliminin irdelenmesi önem arz etmektedir. Sakarya Havzası ile ilgili mevcut çalışmalar incelendiğinde, havza içerisinde mevcut olan meteorolojik istasyonlardan alınan veriler ile yağışların eğiliminin değerlendirildiği çalışmalar (Büyükyıldız ve Berktaş 2004, Çeribaşı ve Doğan 2015a) bulunmaktadır. Bu çalışmalarda havzada konuşlandırılmış Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) yağış ölçüm istasyonlarındaki veriler kullanılarak eğilim analizi gerçekleştirilmiş ve noktasal olarak eğilimler sunulmuştur. Yağıştan bağımsız olarak havzada akım miktarlarının eğiliminin değerlendirildiği çalışmalar da (Özel vd. 2004, Çeribaşı ve Doğan 2015b) mevcuttur. Bu çalışmalarda havzanın tamamında yüzeysel akışın değerlendirilmesinden ziyade, akarsu akım ağı üzerinde akım gözlem istasyonundan alınan veriler kullanılarak eğilimleri incelenmiştir. Yukarı Sakarya Havzası'nda hidrolojik kuraklığın incelendiği Varol vd. (2023) çalışmasında, çeşitli kuraklık indeksleriyle beraber yüzeysel akış indeksi (SRI) değerlendirilmiştir. 2003-2021 periyodunda SPEI Küresel Kuraklık İzleme ve ERA5 veri tabanından yağış, buharlaşma ve yüzeysel akış verileri kullanılarak kuraklık analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı zaman ölçeklerinde kuraklık değerlendirmeleri yapılmış ve 12 aylık ölçekte 2016 ve 2021 yılları en kurak yıllar olarak bulunmuştur. Sakarya Havzasının tamamında alansal olarak kuraklık analizi niteliğinde olan başka bir çalışmada (Duvan vd. 2021), yağışın iklim değişikliği etkisinde farklı gelecek senaryolarına dayalı olarak zamansal değişimi incelenmiştir. 2020-2098 döneminin 1956-2011 dönemine kıyasla değişimi, standart yağış indeksi üzerinden değerlendirilmiştir. Sunulan literatür araştırmasına dayanarak, havzanın tamamını kapsayacak şekilde yağış ve yüzeysel akış eğilimlerini değerlendiren çalışmanın eksikliği dikkat çekmektedir. Bu çalışmada, Sakarya Havzası'nın mekânsal ve zamansal ölçekte süreklilik arz eden bir yağış ve yüzeysel akış rejimi değişimini göstermek amaçlanmıştır. Bu kapsamda mekânsal ve zamansal olarak boşluk arz etmeyen ERA5 yağış ve yüzeysel akış verileri kullanılarak, havzanın tamamını temsil eden uzun dönemli ortalamalar ve eğilimler değerlendirilmiştir. Açık kaynaklı coğrafi bilgi sistemi programı (QGIS) vasıtası ile elde edilen su toplama havzası sınırları içerisinde kalacak şekilde veriler işlenmiştir. Toplamda 40 yılı (1984-2023) kapsayan bir dönemde, mevsimlik ve yıllık toplam yağış ve toplam yüzeysel akış yüksekliklerinin ortalamalarının irdelenerek, uzun dönemli istatistiksel olarak farklı güven düzeylerinde belirgin eğilimleri analiz edilmiştir. Sakarya Havzası'nın tamamını temsil edecek şekilde, iklim ortalama değerleri ve eğilimleri hesaplanarak alansal haritalar halinde sunulmuştur.

2. Gereç ve Yöntemler

2.1. Çalışma Bölgesi

Türkiye'nin 26 büyük nehir havzasından biri olan Sakarya Nehri Havzası çalışma alanı olarak seçilmiştir. 107 bin km²'yi aşan toplam yüzey alanı ile Türkiye yüz ölçümünün yaklaşık %8'i kadar olan havza, 63 bin km²'yi geçen drenaj alanına sahiptir (SYGM 2025). Sakarya Nehri Havzası'nın, kuzeyinde denize ulaştığı Karadeniz kıyısı, kuzey doğusunda Batı Karadeniz Havzası, doğusunda Kızılırmak Havzası, güneyde Akarçay ve Konya Kapalı Havzaları, batısında Susurluk Havzası ile sınırları bulunmaktadır. Sakarya Havzası'nın Türkiye'deki konumu ve komşu havzaları gösteren harita (SYGM 2018) Şekil 1a'da sunulmaktadır. Havzanın akım ağının birleştiği ana kol olan Sakarya Nehri; Eskişehir'in güneyinde yaklaşık 800 m kotlarındaki Çifteler İlçesi yakınlarında doğarak (Anıl Kızılaslan vd. 2014), Porsuk Çayı, Ankara Çayı, Göksu Çayı, Çarşuyu Çayı, Mudurnu Çayı ve Karasu Çayı gibi diğer kaynaklarla birleşerek Karasu İlçesi yakınlarında Karadeniz kıyısına ulaşmaktadır. Havza içerisinde kalan yerleşimlerde yaşayanların, 2020 nüfus kayıt verilerine göre Türkiye toplam nüfusunun %10'undan fazlasına denk geldiği ve havza sınırları içerisinde önemli derecede tarım, hayvancılık, madencilik, sanayi, turizm gibi ekonomik getiri sağlayan faaliyetlerin yapıldığı rapor edilmektedir (Hidro Dizayn 2023).

Sakarya Havzası'nın alt havzalarının yıllık yağış ve yüzeysel akış ve yüzeysel akış ortalamaları ve bütün havza ortalaması ile ilgili özet bilgi (Akarsu Mühendislik 2021) Çizelge 1'de sunulmaktadır. Havza geneline yıllık ortalama 530.69 mm yağış düştüğü görülmektedir. Bu yağışın yıllık ortalama 157.72 mm kadarının yüzeysel akışa geçtiği gözlenmektedir. Alt havzalarda değişmekle birlikte, havza genelinde ortalama olarak yağışın %25.4'ünün akışa geçtiği hesaplanmaktadır. Havza ile ilgili coğrafik, jeolojik, meteorolojik ve

hidrolojik özelliklerine ait detaylı bilgiler Yayıran (2016) çalışmasında bulunmaktadır.

2.2. Yağış ve Yüzeysel Akış Verisi

Bu çalışmada, Sakarya Nehri su toplama havzasında suyun dolaşımını incelemek amacıyla, yağış ve birinci dereceden yağışlara bağlı olan yüzeysel akış parametreleri değerlendirilmeye tabi tutulmuştur. Tarihsel 40 yıllık 1984-2023 dönemi kapsayan saatlik yağış ve yüzeysel akış verileri Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi (ECMWF) iklim veri tabanından temin edilmiştir. Veri tabanında günlük toplam yağış 'Total precipitation' ve yüzeysel akış 'Surface runoff' parametreleri tanımlıdır. ECMWF ERA5 yeniden analiz verisi (Hersbach vd. 2020) 1950 yılından günümüze farklı zamansal ve mekânsal çözünürlükte veri sunan, küresel olarak güvenilen ve tercih edilen tarihsel veri seti olarak kullanılmaktadır. ERA5, küresel ölçekte meteorolojik ölçüm verileri, uydu gözlemleri gibi gerçek verilere dayanan ve bu verileri asimilasyon teknikleriyle ileri düzey hesaplamalı modelleri ile birleştiren (ECMWF 2016) güçlü veri setleri üretmektedir. Ölçüm ve gözlem verilerinin asimilasyonu ve iklim modeli ile yeniden analiz edilen ERA5 verisi, doğrudan meteorolojik ölçüm istasyonundan temin edilen ölçüm verilerinde gözlenen eksikliklerden de arı olmaktadır. Saatlik olarak sunulan veriler ilgili dönemde zamansal veya mekânsal olarak herhangi bir boşluk içermemektedirler. ERA5 verisinin bu özelliği, iklim değerlendirmesi çalışmalarında kullanılması için bir adım öne çıkarmaktadır. Bu çalışmada kullanılan yağış ve yüzeysel akış verileri, mekânsal çözünürlüğü kara bölgeleri için enlem ve boylamda 0.1° olacak şekilde temin edilmiştir ve çalışma bölgesi için yaklaşık 9 km çözünürlüğe denk gelmektedir. ERA5 verilerinin doğruluğunun değerlendirilmesi için Sakarya Havzası sınırları içerisinde kalan üç farklı MGM yağış gözlem istasyonu verisi kullanılmıştır. Havzanın farklı bölgelerinden seçilen

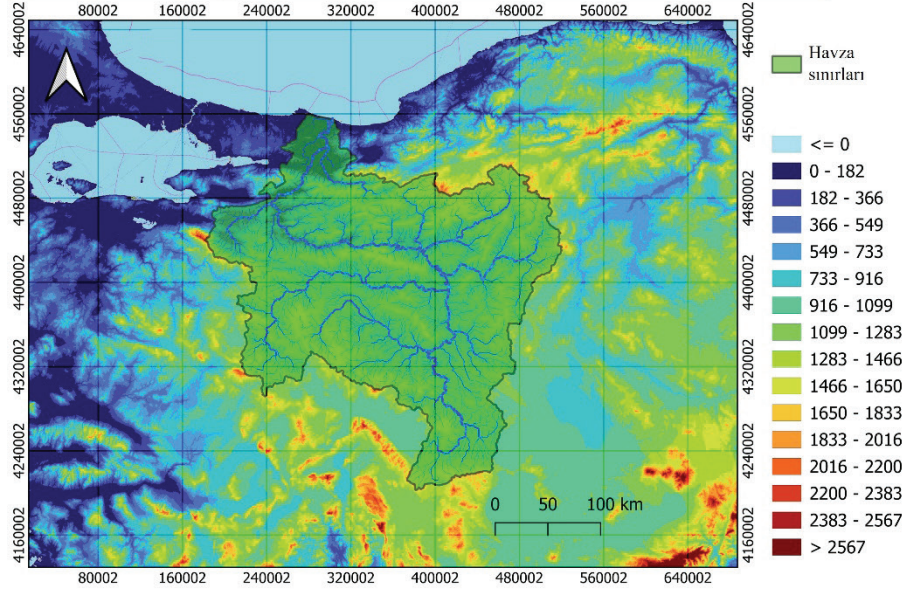
Çizelge 1. Sakarya ana havza ve alt havzaların genel iklim bilgileri.

Alt Havza	Alan (ha)	Yıllık Ort. Yağış (mm)	Yıllık Ort. Akış (mm)	Akış/Yağış (%)
Yukarı Sakarya	2 134 200	390.00	45.80	11.74
Porsuk	1 082 500	466.44	45.07	9.66
Kirmir Çayı	460 000	475.50	130.81	27.51
Ankara Çayı	717 800	416.02	49.82	11.98
Orta Sakarya	1 209 300	461.00	93.00	20.00
Göksu	243 500	689.90	266.77	38.67
Aşağı Sakarya	483 000	816.00	472.80	57.94
Havza Ortalaması	-	530.69	157.72	25.36

(A)



(B)



Şekil 1. Havzanın Türkiye'deki konumu ve komşu havzalar (SYGM 2018) (A), CBS ile üretilen su toplama havzası ve akım ağı ile birlikte kullanılan DEM verisi (B).

Çizelge 2. Doğrulama için kullanılan MGM yağış gözlem istasyonlarının bilgileri.

İstasyon adı	İstasyon no	Koordinatları	Ölçüm periyodu
Sakarya	17069	40.768 K - 30.393 D	2000-2009
Ankara	17130	39.973 K - 32.864 D	2000-2009
Afyonkarahisar	17190	38.738 K - 30.560 D	2000-2009

istasyonlarda, on yıllık bir dönemi kapsayan günlük toplam yağış yüksekliği ölçümlerinin temin edildiği istasyonlara ait bilgiler Çizelge 2’de verilmiştir. Havzada yüzeysel akış ölçüm verisi bulunmadığından doğrulama yalnızca yağış ölçümleri kullanılarak mümkün olabilmektedir.

2.3. Su Toplama Havzası Oluşturma ve Veri Ön İşleme

Sakarya nehri su toplama havzası (Şekil 1b), tahmini olarak havza sınırlarından daha geniş bir alan için temin edilen sayısal yükseklik modeli (DEM) kullanılarak QGIS coğrafi bilgi sistemi yazılımı yardımıyla çıkarılmıştır. QGIS programında bütün verilerin coğrafi referans sistemi çalışma bölgesi için en uygun olan WGS 84 ve projeksiyonu UTM Zone 36N olarak seçilmiştir. Havza su toplama sınırının belirlenmesi için, QGIS SAGA modülünde topoğrafik eğim ve akış yönleri bulunarak, nehir ana kolu ve yan kollarının su toplama alanları çıkarılmıştır. Sonuçta Şekil 1b’de DEM haritası üzerinde gösterildiği gibi nehrin ana kolu ve yan kolları ile birlikte su toplama havzasının sınırları elde edilmiştir.

Analizler için öncelikle, ECMWF veri tabanından havza alanını da kapsayacak şekilde temin edilen saatlik ERA5 yağış ve yüzeysel akış verileri, her bir saat içerisinde yükseklik (mm) cinsinden biriken miktar olarak temin edilmiştir. Saatlik yağış ve yüzeysel akış birikimlerinden, 1984-2023 dönemi boyunca her yıl için mevsimlik toplam ve yıllık toplam yükseklikleri hesaplanmıştır. Bunun için 40 yıllık dönem için tarih ve saat zaman damgalı olarak NetCDF formatında temin edilen veri İklim Veri Operatörü (CDO) yardımıyla yıllık olarak ve her yılın her mevsimi için ayrı olarak toplam yağış ve yüzeysel akış yükseklikleri bulunmuştur. QGIS ile belirlenen nehir su toplama havzasında iklim analizi gerçekleştirilebilmek için, havza sınırları QGIS programından şekil dosyası (shape file) formatında alınmıştır. Python programı vasıtasıyla ERA5 verileri, şekil dosyasında bulunan sınırlar içerisinde kalacak şekilde ayıklanmıştır. Havza sınırları içerisindeki değişimleri daha ayrıntılı görebilmek amacıyla havza her bir km²’lik alanlara bölünerek analiz edilmiştir.

2.4. İklim Rejimi Ortalamaları ve Eğilim Analizi

Ön işleme ile iklim analizine hazır hale getirilen yıllık, mevsimlik toplam yağış ve yüzeysel akış verileri ile yıllık ve

mevsimlik ortalamalar değerlendirilmiştir. 1984-2023 döneminde her yıl için elde edilen yıllık toplam iklim değerleri 40 yıllık dönem için ortalama iklimi yükseklik cinsinden gösterecek şekilde hesaplanmıştır. Daha sonra her yılın ilgili mevsiminin toplam iklim değerleri her yıldaki aynı mevsim toplamaları kullanılarak, ilgili mevsimin 40 yıllık ortalamaları hesaplanmıştır. İklim parametrelerinin yıllık değişim eğimleri Theil ve Sen Metodu (Sen 1968, Theil 1950) ile hesaplanmıştır. Literatürde Theil ve Sen Eğimi olarak da bilinen bu yöntem, bütün eğimlerin medyan değerini bularak regresyon eğrisini uyduran ve parametrik olmayan bir metot olarak sıklıkla kullanılmaktadır (Ergün vd. 2024). 1984-2023 döneminde ilgili iklim parametresinin yıllık toplam değerleri hesaplanarak, her parametre için 40 yıllık değer eğilimi incelenmiştir. Theil-Sen yöntemi uygulanırken, ardışık iki yıllık toplam değer eğimi Denklem 1 ile bulunur.

$$Q_i = \frac{(x_j - x_k)}{j - k} \quad i = 1, \dots, N \quad (1)$$

Burada ve x_j , j ve k zamanlarındaki ($j > k$) ardışık değerleri temsil etmektedir. N adet eğimin (Q_i) medyan değeri ilgili iklim parametresi için Theil-Sen eğimi olarak hesaplanmıştır. Eğimler, bir yılda meydana gelen toplam yağış ve yüzeysel akış yüksekliğindeki değişimi gösterecek şekilde alansal haritalarla verilmiştir.

Uzun dönemde hesaplanan eğimlerin istatistiksel olarak belirginliği, yine parametrik olmayan Mann-Kendall testi (Kendall 1975, Mann 1945) ile hesaplanmıştır. Sıralanmış n adet x_i ($i=1, \dots, n-1$) ve ($j=i+1, \dots, n$) veri setleri Denklem 2’de gösterildiği gibi kıyaslanır.

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1; x_j > x_i \\ 0; x_j = x_i \\ -1; x_j < x_i \end{cases} \quad (2)$$

Mann-Kendal test istatistiği olarak tanımlanan S değeri

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (x_j - x_i) \quad (3)$$

ifadesi ile hesaplanır. Standartlaştırılmış Mann-Kendal istatistiği (Z), eğilimin olmadığı sıfır hipotezi (H_0 : eğilim yok) altında ortalaması sıfır ve varyansı bir olan standart normal dağılımı takip eder.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}; S > 0 \\ 0; S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}; S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Pozitif bir Z değeri artış yönlü bir eğilimi gösterirken, negatif bir değer azalış yönlü bir eğilimi gösterir (Yue ve Wang 2002). Eğilimlerin belirginlikleri üç farklı güven düzeyi için hesaplanarak, harita üzerinde havzanın hangi bölgelerinde eğilimlerin hangi düzeyde belirgin olduğu gösterilmiştir. Haritalarda sunulan güven düzeyleri %80, %90 ve %95 olarak belirlenmiştir. Özellikle %90 ve üzeri güven düzeyindeki eğimler daha olası eğilimlerin gösterdiği değerlendirilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Sakarya nehri su toplama havzasında alansal olarak 1984-2023 döneminde yıllık toplam yağış ve yüzeysel akış rejimi ve eğilimlerinin değerlendirmesi sonucu elde edilen bulgular bu bölümde sunulmaktadır. 40 yıllık ortalamaların ve eğilimlerin bütün Sakarya Havzasını kapsayacak şekilde değerlendirilmesi için kullanılacak ERA5 verilerinin doğrulaması yapılarak, uzun dönemli sonuçları alansal haritalar ile gösterilmiştir. Havza sınırları içerisinde kalan ve havzanın farklı bölgelerinden seçilen MGM yağış gözlem istasyonlarının verileri ile ERA5 yağış verilerinin doğrulanmıştır. ERA5 yağış ve yüzeysel akış verileri ile uzun dönemli iklim ortalamaları ve eğilimleri değerlendirildiği için ölçüm periyodu boyunca verilerin dağılımları histogramlar yardımıyla Şekil 2'de kıyaslanmıştır. Histogramlarda mavi sütunlarla ilgili MGM istasyonu günlük toplam yağış yükseklikleri ve kırmızı çizgiler ile ERA5 günlük toplam yağış yükseklikleri gösterilmiştir. ERA5 günlük toplam yağış yüksekliği verilerinin Sakarya istasyonu (Şekil 2a) ölçümlerinin yüksek değerlerinde hafif bir düşük tahminle birlikte, dağılım olarak iyi bir şekilde eşleşmektedir. Afyonkarahisar (Şekil 2b) ve Ankara (Şekil 2c) istasyonlarında ise Sakarya istasyonundakinin aksine yüksek değerlerde hafif bir aşırı tahmin söz konusudur. Buna rağmen, her iki istasyonda da ERA5 ve ölçüm verilerinin dağılımının iyi bir şekilde eşleştiği görülmektedir. Türkiye üzerinde çeşitli yeniden analiz, uydu, yerinde yağış ölçümü ürünlerinin detaylı bir karşılaştırmasının yapıldığı Akbas ve Ozdemir (2024) çalışması da ERA5 yeniden analiz verilerinin yüksek doğruluğa sahip olduğuna işaret etmektedir.

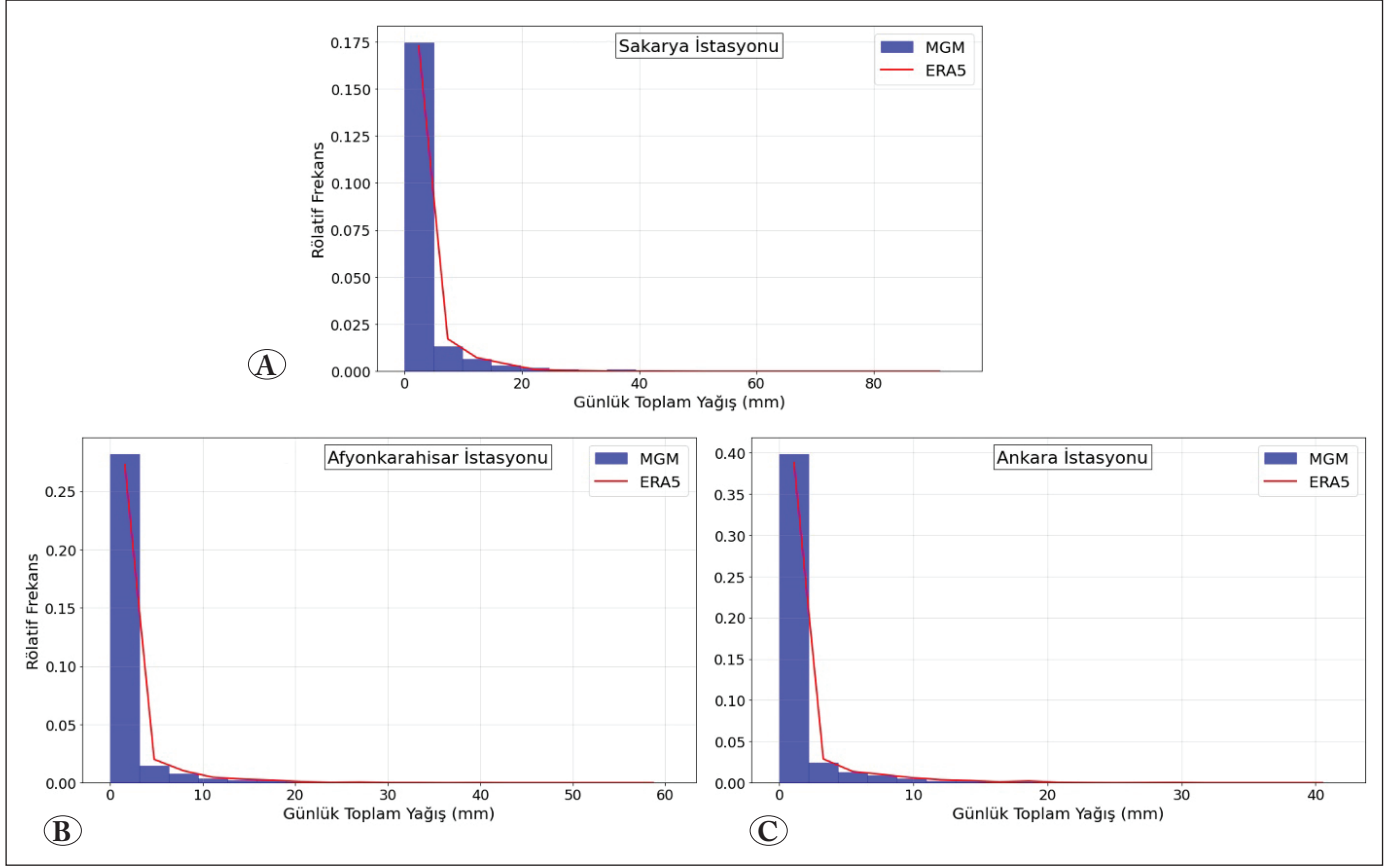
Havzada geçmiş 40 yıllık süreçte gözlenen yıllık toplam yağış yüksekliği ortalamasını gösteren alansal harita Şekil 3a'da görülmektedir. Bu dönemde en düşük yağış yüksekliği

ortalamaları, havzanın güney ve doğu kesimlerinde 300-500 mm civarında olduğu gözükmektedir. Nehir havzasının Karadeniz kıyısına yakın bölgeleri ve Gemlik Körfezine yakın bölgelerinde 1 metreyi bulan yıllık toplam yağış yükseklikleri ile en yüksek ortalamalar gözlenmektedir. Havzanın orta kesimlerinde 400-700 mm arasında yıllık toplam yağış yüksekliği ortalamaları gözlenmektedir.

Yıllık yağış toplam yüksekliklerinin ortalaması verilen Sakarya Nehri su toplama havzasında yıllık toplam yağış yüksekliklerinin eğilimleri Şekil 3b'de ve bu eğilimlerin farklı güven düzeylerine göre istatistiksel olarak belirgin olduğu bölgeler Şekil 3c'de sunulmaktadır. Yıllık toplam yağış yüksekliği havzanın çoğunluğunda artış eğilimi göstermektedir. Özellikle batı ve güney bölgelerinde %80 ve üzeri güven düzeyinde istatistiksel olarak belirgin artış eğilimleri gözlenmektedir. Batı tarafında yıllık toplam yağış ortalamalarının 700-900 mm arasında değer aldığı Bursa, Bilecik, Eskişehir, Kütahya sınır bölgesinde 2-3 mm/yıl arasında eğimlerle (Şekil 3b), %90 ve üzeri güven düzeyinde (Şekil 3c) belirgin artış eğilimleri görülmektedir. Havza içerisinde sadece bu bölgede gözlenen %95 güven düzeyi üzerindeki belirgin artış eğilimleri daha dar bir alan kapsamaktadır.

Sakarya nehir havzasının güneyinde Konya Kapalı Havzası sınırında, yıllık toplam yağış yüksekliği 400-500 mm ortalamaları, 1-2 mm/yıl arasında %90 ve üzeri belirgin artış eğilimi gözükmektedir. Bu bölgede %95 güven düzeyinde belirgin bir eğilim görülmemektedir. Nehir su toplama havzasının diğer kesimlerinde %80 ve üzeri güven düzeyinde belirgin bir eğilim bulunmamaktadır. Yıllık toplam yağış yüksekliği ortalamalarının 1 metreye yaklaştığı Karadeniz kıyısına yakın bölgelerde belirgin eğilim görülmemesi önemli bir bulgu olarak değerlendirilebilir. Buna benzer şekilde, Sakarya Havzası'nın Bursa ili sınırlarında kalan ve 1 metreyi bulan yıllık toplam yağış yüksekliği ortalamasına sahip olan bölgede de belirgin eğilim gözlenmemiştir.

Mevcut çalışmada yıllık yağış yükseklikleri ile ilgili elde edilen bulgular, Çeribaşı ve Doğan (2015a) çalışmasında Sakarya Havzası içerisinde kalan yağış ölçüm istasyonları için sunulan bulgularla büyük ölçüde benzerlik göstermektedir. Kıyas yapılan çalışmada, sadece %95 güven düzeyinde eğilimler incelenmiştir. Bu güven düzeyinde herhangi bir eğilim göstermeyen istasyonlar, mevcut çalışmada %95 güven düzeyinde eğilim gözlenmeyen bölgelerle uyumludur. Atıf yapılan çalışmada azalan eğilim gösteren Sakarya ve Geyve istasyonları için mevcut çalışmada belirgin bir eğilim bulunmamıştır. Eskişehir ve Kütahya istasyonları için Çeribaşı ve Doğan (2015a) çalışmasında yine azalan eğilim bulunması-



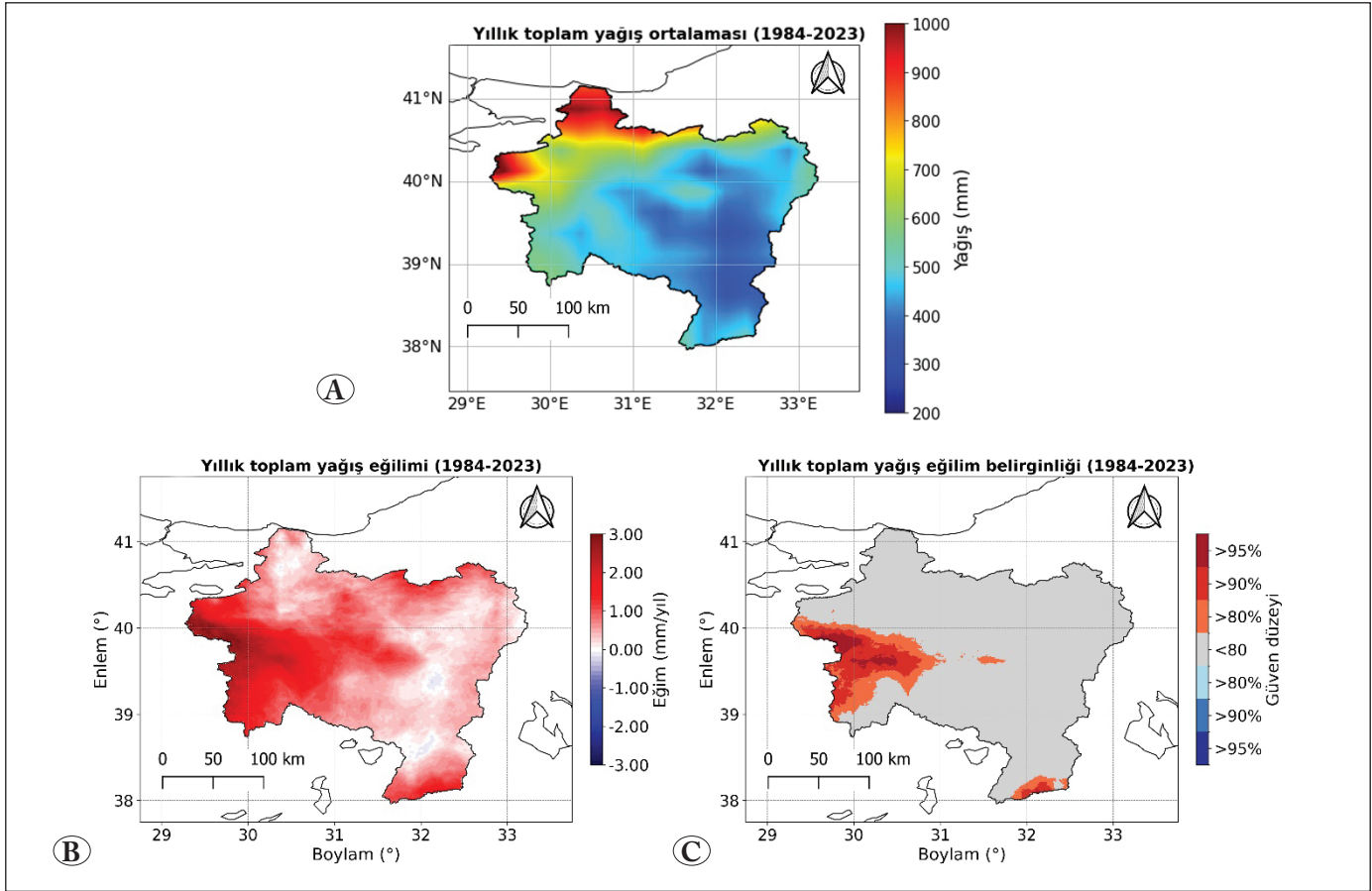
Şekil 2. ERA5 günlük toplam yağış verilerinin dağılımının 2000-2009 döneminde Sakarya (A), Afyonkarahisar (B), Ankara (C) istasyonlarının ölçümlerinin dağılımı ile kıyası.

na rağmen, mevcut çalışmada %95 güven düzeyinde eğilim gözlenmemiştir. İki çalışma arasında bazı bölgelerde gözlenen farklılıklar, eğilim analizinin yapıldığı periyotların farklı olmasından kaynaklanabilir. Mevcut çalışmada 1984-2023 yılları arasında eğilimler incelenirken, kıyaslama yapılan çalışmada 1979-2012 ve 1991-2012 dönemleri için eğilimler incelenmiştir. Ayrıca mevcut çalışmada yıllık toplam yağış yüksekliklerinin eğilimi incelenmiştir, buna karşı atf verilen çalışmada yıllık ortalama yağış yüksekliklerinin eğilimi değerlendirilmiştir.

Toplam yağış yüksekliğinin mevsimlik ortalamaları ve 1984-2023 dönemindeki eğilimleri Şekil 4'te sunulmaktadır. Şekilde birinci satırdaki grafikler mevsimlik toplam yağış yüksekliklerinin 40 yıllık ortalamalarını, ikinci satırdaki grafikler farklı mevsimlerin eğilim eğimlerini (mm/yıl), üçüncü satırdaki grafikler ise farklı güven düzeylerine göre eğilimlerin istatistiksel belirgin olduğu alanları göstermektedir. Şekilde mevsimler, birinci sütunda Kış, ikinci sütunda İlkbahar, üçüncü sütunda Yaz ve dördüncü sütun-

da Sonbahar olacak şekilde sıralanarak sunulmaktadır. Kış mevsimi toplam yağış yüksekliğinin 40 yıllık ortalamasının alansal dağılımı yıllık toplam yağış yüksekliğinin alansal dağılımına benzemektedir. En yüksek yağış yükseklikleri nehir havzasının Karadeniz kıyısına yakın kesimlerinde ve Gemlik Körfezine yakın bölgede 330 mm mertebesinde olduğu görülmektedir. Havzanın orta ve güney kesimlerinde 120 mm seviyesine kadar düşmektedir. Kış mevsimi ortalamalarının eğilim eğimleri incelendiğinde, havzanın tamamında artış eğilimi göze çarpmaktadır. Buna rağmen, %95 güven düzeyinde belirgin değişimin yalnızca nehrin denize döküldüğü 270-280 mm yağış yüksekliği ortalamasına sahip dar bir kıyı bölgesinde 2-2.5 mm/yıl artış eğimi gözlenmektedir. Kış mevsiminde yağış yüksekliği ortalamalarının diğer kesimlere göre yüksek olduğu bölgelerde %80 ve üzeri güven düzeylerinde 1 mm/yıl mertebesinde belirgin artış eğilimi bulunmaktadır.

İlkbahar mevsimi toplam yağış yüksekliği ortalamalarının en büyük değerleri Gemlik Körfezi yakınlarında Sonbahar mevsimi ortalamalarına benzer şekilde 330 mm civarında-



Şekil 3. 1984-2023 döneminde yıllık toplam yağış ortalaması (A), eğilimi (B) ve güven seviyelerine bağlı olarak belirgin eğilim gösteren alanlar (C).

dır. Kıyıya yakın bölgelerde 250 mm civarına düşen yağış ortalamaları, bu bölgenin biraz doğusunda 300 mm'ye yaklaşmaktadır. İlkbaharda geçmiş 40 yıllık dönemde, havzanın batı ve kuzey kesimlerinde artış eğilimi, doğu ve güney kesimlerinde azalış eğilimi bulunmaktadır. Bu mevsimde, %80 ve üzeri güven düzeyinde belirgin artış eğilimleri sadece Gemlik Körfezine yakın ve kıyı bölgesinde 1-1.5 mm/yıl eğimle görülmektedir. İlkbahar için mevsimlik toplam yağış yüksekliğinde %95 güven düzeyinde belirgin bir eğilim görülmemektedir.

Mevsimlik toplam yağış yükseklikleri, yaz mevsiminde havzada en düşük ortalamaları göstermektedir (30 mm-190 mm). 1984-2023 döneminde en yüksek ortalamalar Gemlik Körfezi yakınlarında ve Karadeniz kıyısına yakın bölgelerde görülmektedir. Yaz mevsiminde, kıyıya yakın bölgelerde sıfıra yakın azalış eğimleri olsa da havzanın genelinde 1.6 mm/yıl ve daha az eğimle artış eğilimi hâkimdir. Yalnız bu mevsimde, mevsimlik toplam yağış ortalamalarının yüksek olduğu bölgelerde görülen belirgin değişim eğilimleri gözlenmemektedir. İstatistiksel olarak belirgin eğilimler yazın

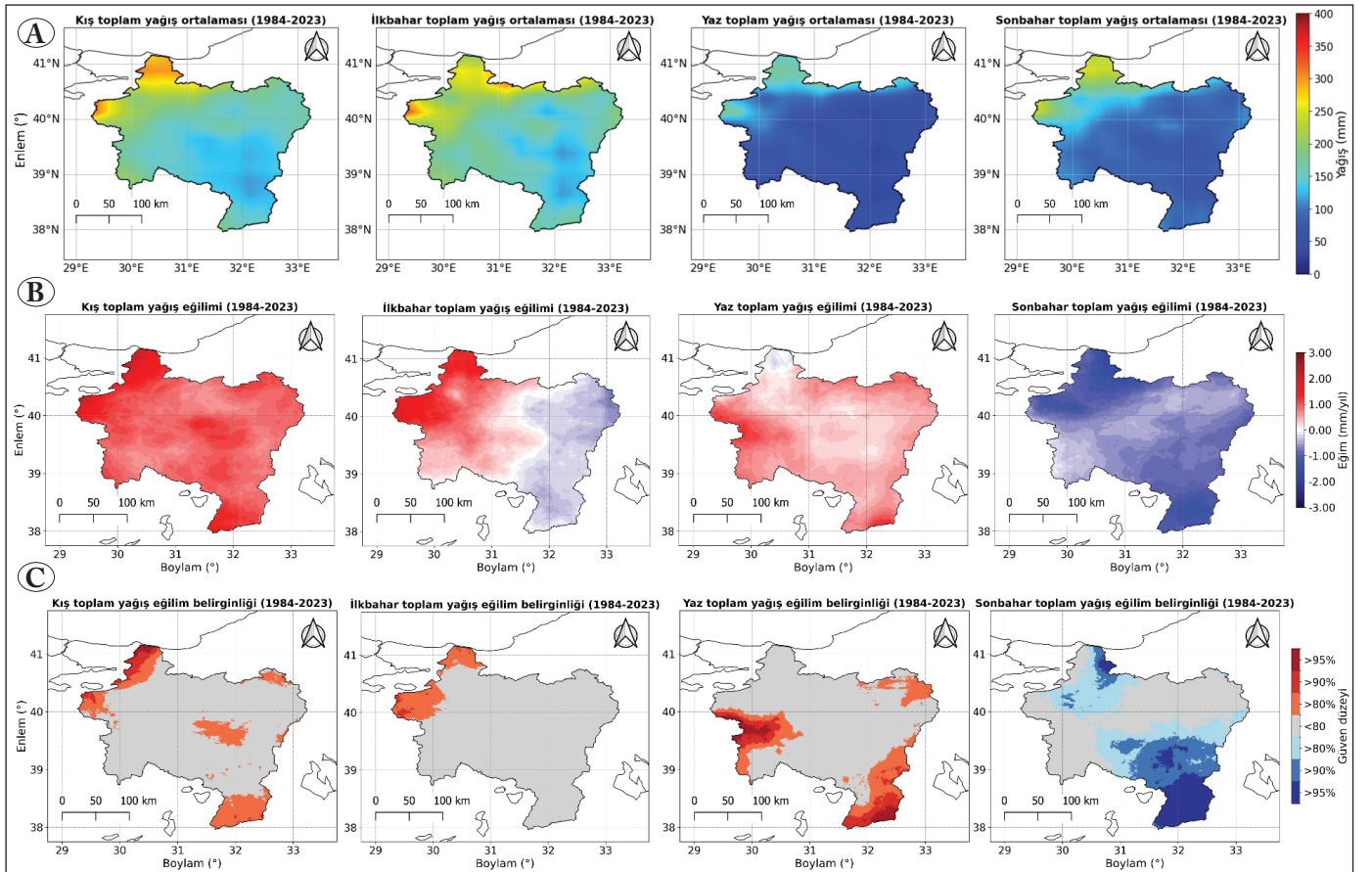
diğer bölgelere nispeten daha düşük yağış ortalamalarına sahip bölgelerde gözlenmektedir. Etkili belirgin eğilimler (%90 ve üzeri güven düzeylerinde) Kütahya, Eskişehir, Bilecik sınır bölgesinde 1.6 mm/yıl ve havzanın güneyinde Konya sınırlarına giren bölgede 1.4 mm/yıl artış eğimi ile bulunmaktadır.

Sonbahar için mevsimlik toplam yağış yükseklikleri ortalaması, alansal dağılım olarak yaz mevsimine benzemekle beraber, biraz daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Havzanın kuzey ve kuzeybatı kesimlerinde 250 mm'yi aşan değerler görülmektedir. Güney ve doğu kesimlerinde yağış ortalamalarının azaldığı gözlenmektedir. Diğer mevsimlik yağış ortalamalarından farklı olarak yaz mevsiminde havza genelinde 40 yıllık dönemde azalış eğilimleri baskındır. Belirgin azalış eğilimleri havzanın kuzey bölgesinde ve güney bölgesinde %80 güven düzeyi ve üzerinde belirgin olduğu görülmektedir. %95 güven düzeyi üzerinde değişimlerin, havzanın güneyinde en yüksek -1.9 mm/yıl, kuzeyinde en yüksek -2 mm/yıl eğimle gerçekleştiği gözlenmektedir.

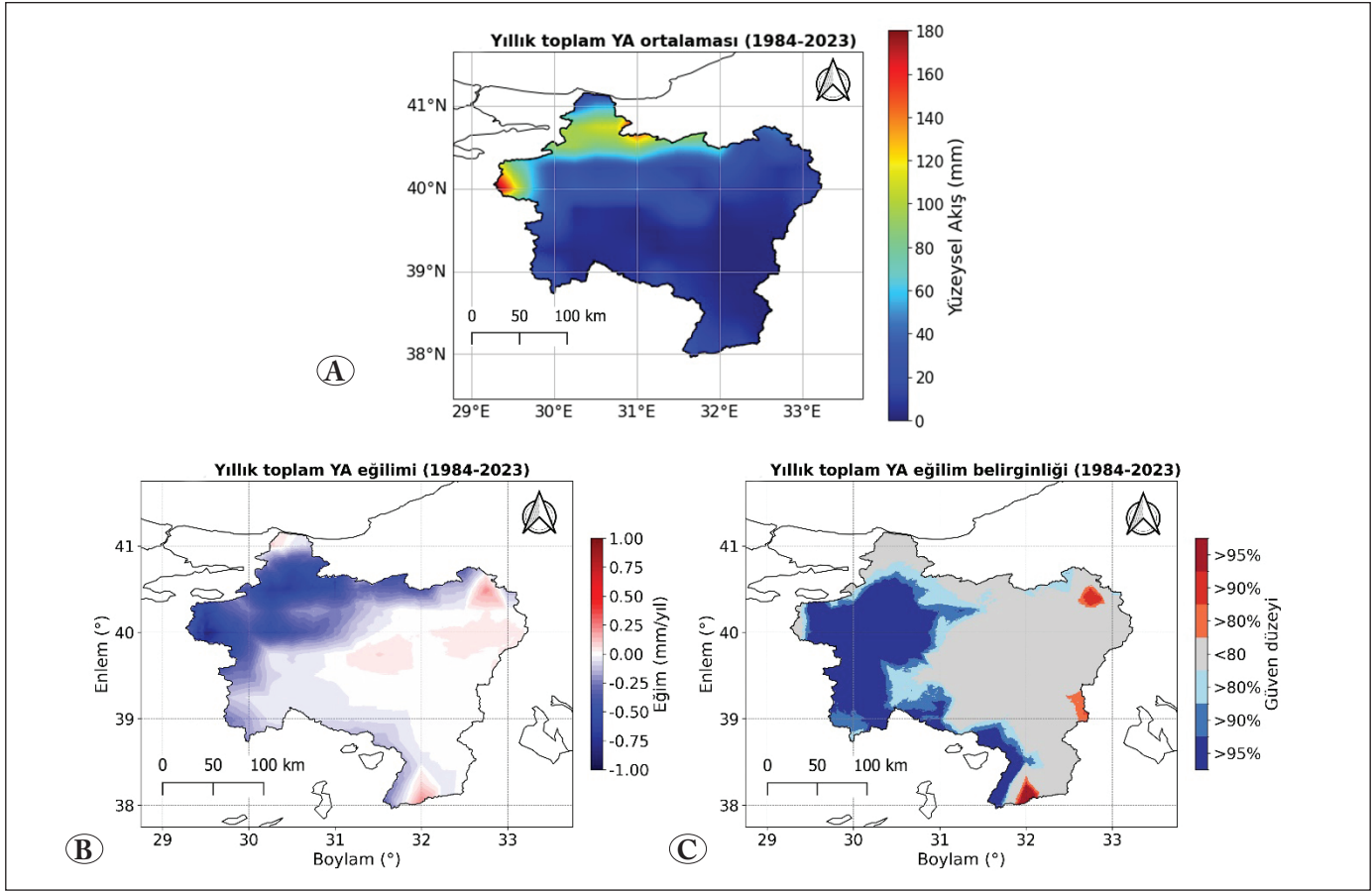
Yıllık toplam ve mevsimlik toplam yağış yüksekliklerinin değerlendirmesinin ardından, havzada yüzeysel akışa geçen yağış miktarının değerlendirilmesi için yıllık toplam ve mevsimlik toplam yüzeysel akış yükseklikleri irdelenmiştir. Şekil 5'te yıllık toplam yüzeysel akış yüksekliklerinin 1984-2023 dönemi ortalamaları (Şekil 5a), eğilim eğimleri (Şekil 5b) ve istatistiksel olarak belirgin eğilim gösteren alanlar (Şekil 5c) haritaları halinde sunulmaktadır. Yıllık toplam yüzeysel akış ortalamaları havzanın Gemlik Körfezine yakın bölgelerinde 70-175 mm aralığında diğer bölgelere nispeten yüksek değerler almaktadır. Ayrıca, Bilecik-Sakarya ve Bolu-Ankara sınır hattının kuzeyi ile Sakarya nehrinin kıyıya yakın, nehir yatağı eğiminin azaldığı bölge arasında 70-150 mm ortalamalar, havzanın diğer kesimlerine göre yüksek yüzeysel akışın olduğunu göstermektedir. Yıllık toplam yüzeysel akış eğilimlerinde havzada azalış gösteren eğimler ağırlıklı görülmektedir. Özellikle yüzeysel akış ortalamalarının 50 mm üstünde olduğu bölgelerde azalış eğilimi bulunmaktadır. Gemlik Körfezi yakınlarında 80-150 mm arasında yüzeysel akış ortalamasına sahip bölgelerde istatistiksel olarak belir-

gin -0.91 mm/yıl eğimine varan azalış eğilimleri gözlenirken; 150 mm üzerinde ortalamaya sahip alanda belirgin bir eğilim gözükmemektedir. Sakarya-Bilecik sınırı civarında 60-100 mm yüzeysel akış ortalaması olan bölgede, %90 ve üzeri güven düzeyinde -0.82 mm/yıl eğimine varan belirgin azalış eğilimi görülmektedir. 30° - 31° boylamları ve 40° enlemi yakınlarında 50 mm civarı yüzeysel akış ortalamasına sahip alanda -0.3 ile -0.5 mm/yıl arasında eğimle belirgin azalış eğilimi bulunmaktadır. Havzanın doğu ve güney kesimlerinde yerel olarak artış eğilimi görülse de, bu bölgeler hem ortalamaların düşük olduğu hem de eğilim eğimlerinin sıfıra yakın olduğu görülmektedir.

Yüzeysel akış eğilimlerinin havzanın büyük bir kısmında belirgin olmadığı veya eğimlerin sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Özellikle Yukarı Sakarya Havzası olarak nitelenen güney bölgelerinde belirgin eğimlerin ± 0.25 mm/yıl aralığında olduğu bulunmuştur. Benzer sonuçlar Varol vd. (2023) çalışmasında, Yukarı Sakarya Havzası'nda yüzeysel akış indeksinin 12 ay ölçekli değişiminde de görülmektedir.



Şekil 4. 1984-2023 döneminde mevsimlik toplam yağış ortalaması (A), eğilimi (B) ve güven seviyelerine bağlı olarak belirgin eğilim gösteren alanlar (C).



Şekil 5. 1984-2023 döneminde yıllık toplam yüzeysel akış ortalaması (A), eğilimi (B) ve güven seviyelerine bağlı olarak belirgin eğilim gösteren alanlar (C).

2003-2021 periyodunda yüzeysel akış indeksinin değişim eğiliminin sıfıra yakın olduğu ve son yıllarda az da olsa negatif bir değişim gösterdiği bulunmuştur.

Mevsimlik toplam yüzeysel akış yüksekliklerinin ortalamaları ve yıllık eğilimleri Şekil 6'da sunulmaktadır. Yüzeysel akış yükseklikleri için sunulan grafikler, Şekil 4'te mevsimlik toplam yağış yükseklikleri için sunulan grafiklerle aynı düzendedir. İlk sütundaki kış mevsimi toplam yüzeysel akış ortalamaları yıllık ortalamalara benzer şekilde Gemlik Körfezi yakınlarında en yüksek 54 mm ve havzanın kuzey bölgesinde daralan bir boğaz şeklinde olan bölgede 25-40 mm arasında gözlenmektedir. Havzanın orta kesimlerinde kış mevsimi ortalamaları 15-20 mm arasında değişirken, doğu ve güney kesimlerinde 15 mm altında seyretmektedir. 40 yıllık dönemde kış mevsimi için yüzeysel akış eğilimi, havzanın orta kesiminden Bursa-Kütahya bölgesine doğru azalış eğiliminde olup; kıyı bölgesinde ve doğu bölgesine doğru ve güneyinde dar bir alanda azalış eğimleri gözlenmektedir. Eğilim belirginliği dikkate alındığında, batı bölgesindeki

-0.35 mm/yıl mertebesine varan azalış eğimleri, doğuda 0.1 mm/yıl ve güneyde 0.05 mm/yıl artış eğimleri belirgin eğilimleri göstermektedir.

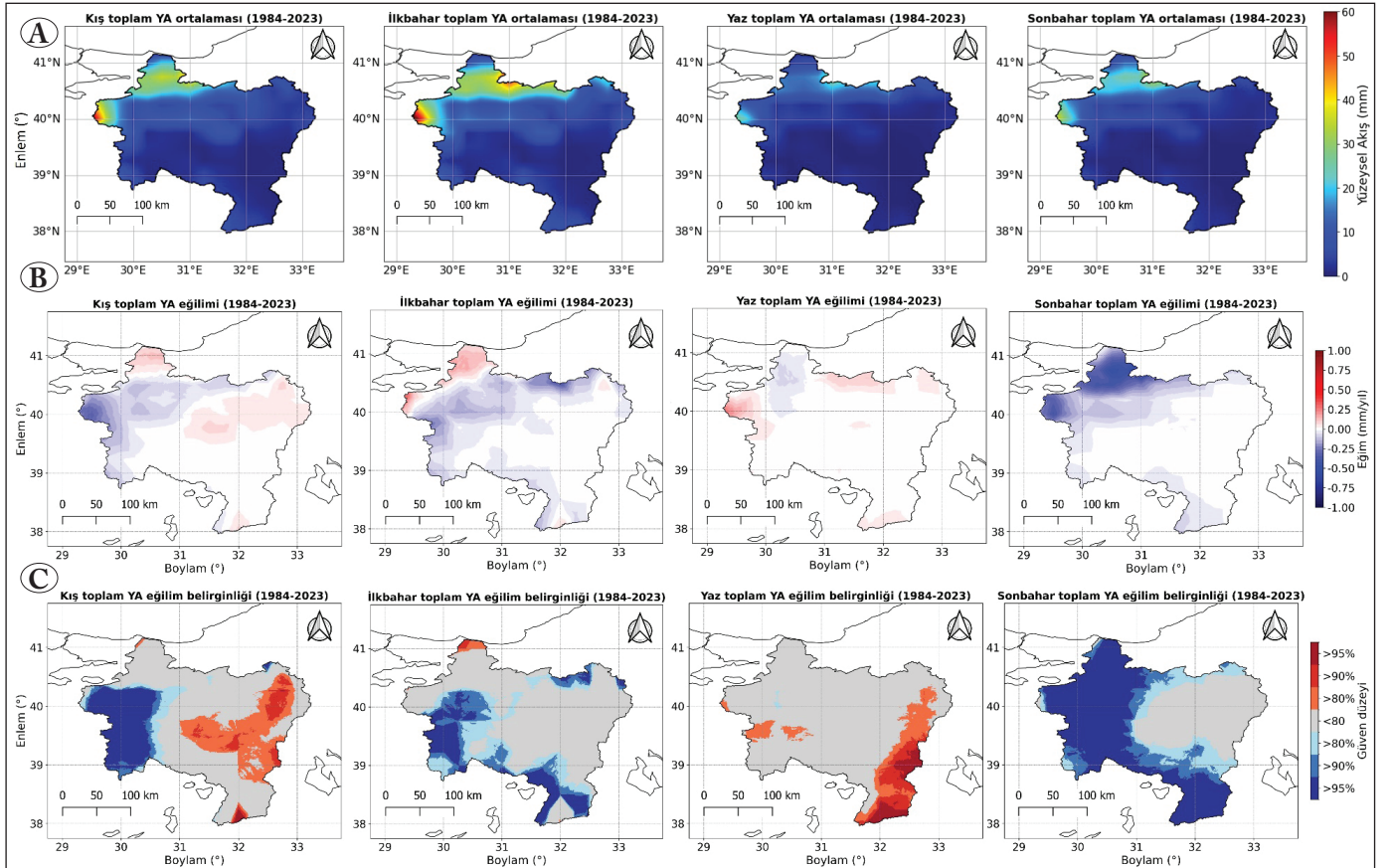
İlkbaharda, toplam yüzeysel akış ortalamaları yıllık toplam ve kış mevsimi toplam yüzeysel akış ortalamalarına benzer şekilde alansal dağılım göstermektedir. Bununla birlikte, sonbahar ortalamalarından bir miktar daha yüksek değerler almaktadır. Gemlik Körfezi yakınlarında 60 mm, havzanın kuzey bölgesinde 44 mm civarında yüzeysel akış ortalamaları gözlenmektedir. Havzanın diğer kesimlerinde, nispeten daha yüksek olmakla beraber kış ortalamalarına yakın yüzeysel akış görülmektedir. İlkbahar mevsiminde değişim eğilimlerinde, kuzey - kuzey batı bölgesinde artış; kuzeydoğu, orta batı ve güney bölgelerinde azalış eğimleri gözlenmektedir. Eğilimlerin %90 ve üzeri güven düzeyinde belirginlik gösteren eğimler, havzanın orta batı bölgesinde -0.2 mm/yıl, güneyinde -0.15 mm/yıl ve kuzeydoğu kesiminde -0.3 mm/yıl mertebesine varan azalış, kuzeyde kıyıya yakın dar bir alanda 0.08 mm/yıl ile artış şeklinde olduğu görülmektedir.

Yaz mevsimi düşük yağış ortalamaları nedeniyle en düşük yüzeysel akış ortalamalarının gözleendiği mevsimdir. Gemlik Körfezi yakınlarında ve havzanın Batı Karadeniz Havzası sınırında en fazla 30 mm seviyesini bulan mevsimlik toplam yüzeysel akış ortalamaları gözlenmektedir. Havzanın diğer bölgelerinde mevsimlik toplam yüzeysel akış ortalamaları genellikle 10 mm ve altında kalmaktadır. Yaz mevsiminde ortalamaların diğer alanlara nispeten biraz daha yüksek olduğu Gemlik Körfezine yakın bölgede ve Batı Karadeniz Havzasına yakın bölgede artış eğimleri, nehrin denize yakın olan boğaza benzer geçiş bölgesinde azalış eğimleri görülmektedir. Belirginlik ile eğilimler incelendiğinde, Gemlik Körfezi yakınlarında çok küçük bir alanda 0.2 mm/yıl artış eğiminin %80 güven düzeyinde olduğu anlaşılmaktadır. Havzanın güney-güneydoğu bölgesinde %90 ve üzeri belirginlik gösteren eğilimlerin sıfıra çok yakın bir eğime sahip olduğu görülmektedir.

Sonbahar mevsimi için havzada toplam yüzeysel akış ortalamalarının alansal dağılımı kış ve ilkbahar mevsimleri ile ben-

zerlik gösterse de, daha düşük akış değerlerine sahip olduğu görülmektedir. En yüksek yüzeysel akış ortalamaları 18-39 mm ile Gemlik Körfezine yakın kesimde ve 16-34 mm ile Sakarya-Bolu sınırının güney kesimlerinde gözlenmektedir. Havzanın orta bölgesinde 15 mm civarında yüzeysel akış ortalamaları bulunurken, havzanın doğusuna ve güneyine gidildikçe ortalamaların azaldığı görülmektedir. 1984-2023 döneminde kış mevsimi toplam yüzeysel akış yüksekliği eğilimlerinin havza genelinde azalış eğiminde olduğu gözlenmektedir. Sakarya-Bolu sınır bölgesinde 0.75 mm/yıl eğime sahip bir belirgin azalış eğilimi bulunmaktadır. Gemlik Körfezi yakınlarında en 39 mm civarında ortalamaya sahip alanda belirgin eğilim görülmezken; daha düşük ortalamaya sahip kısımda en fazla 0.70 mm/yıl mertebesine ulaşan belirgin azalış eğimleri gözlenmektedir. Havzanın diğer bölgelerinde sıfır veya sıfıra yakın eğimler bulunmaktadır.

Yağış ve yüzeysel akış analizleri birlikte değerlendirildiğinde bazı benzerlikler ve farklılıklar dikkat çekmektedir. 40 yıllık dönemde toplam yağış ve yüzeysel akış yüksekliği ortala-



Şekil 6. 1984-2023 döneminde mevsimlik toplam yüzeysel akış ortalaması (A), eğilimi (B) ve güven seviyelerine bağlı olarak belirgin eğilim gösteren alanlar (C).

malarının havzada çoğunlukla benzer alansal dağılıma sahip olduğu görülmektedir. Yalnız en yüksek yağış yüksekliği ortalamalarının görüldüğü Gemlik Körfezi yakınlarında ve nehrin kıyıya yaklaştığı bölgelerde, yüzeysel akış ortalamalarının yüksek değerlerinin konumlarının kaydı tespit edilmiştir. Bu duruma sebep olarak, yağış yüksekliklerinin daha büyük olduğu bölgelerde daha düşük eğimli bir topoğrafya olması gösterilebilir. İki bölgede de nispeten yağışın az olduğu yalnız topoğrafik eğimin daha büyük olduğu alanlarda daha yüksek yüzeysel akış ortalamaları gözlenmektedir. Topoğrafik eğimin düşük olduğu bölgelerde yağış ile yeryüzüne ulaşan suyun daha büyük bir kısmı zemine sızma imkânı bulabileceği için yüzeyde akışa geçen su miktarı azalabilmektedir.

Bir başka fark yine yağış ve yüzeysel akış ortalamalarında tespit edilmiştir. Mevsimlik toplam yağış ortalamaları kış mevsiminde ilkbahara kıyasla daha yüksek görülürken, mevsimlik toplam yüzeysel akış ortalamalarında ilkbahar ortalamalarının kış ortalamalarına kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu farklılığa sebep olarak, kış mevsimi sonunda zeminin suya doygunluğunun yüksek seviyelere ulaştığı için, ilkbaharda kış mevsimine nazaran bir miktar daha az yağış görülmesine rağmen, zemin doygunluğu nedeniyle yüzeysel akışa geçen yağış miktarının daha fazla beklenmesi gösterilebilir.

1984-2023 döneminde elde edilen yağış ve yüzeysel akış eğilimlerindeki bulgular, yağışların artış eğiliminde, yüzeysel akışın çoğunlukla azalış eğiliminde olduğunu göstermektedir. Yağış ve yüzeysel akış eğilimlerinin farklılığına birçok sebep gösterilebilir. En önemli faktör zeminin suya doygunluğunun azalması olabilir. Buharlaşma oranlarındaki artış, sadece su birikintileriyle sınırlı kalmamakta, yüzeye yakın zemin tabakasından da buharlaşmanın yüksek gerçekleşmesine neden olabilmektedir. Doygunluğu azalan zemin üzerine gelen yağışın daha büyük bir kısmı zemine sızarak, yüzeysel akışa geçen su miktarının azalmasına sebep olabilmektedir. Özellikle topoğrafik eğimin az olduğu bölgelerde, düşük zemin doygunluğu ile birlikte yağış ile yeryüzüne ulaşan suyun yatay hareketinin kısıtlı olması, zemine sızan su miktarını artırabilmektedir. Yeraltı suyu seviyelerindeki düşüşler de zemin doygunluğunu azaltarak, zemine sızan su miktarını artırabilecek değişimlerdir. Arazinin kullanımı ve işlenmesindeki değişimler de, zemine sızabilecek su miktarını etkileyen faktörler arasında gösterilebilir.

4. Sonuç ve Öneriler

Sakarya Nehir Havzası'nda, ERA5 saatlik toplam yağış ve

yüzeysel akış yeniden analiz verileri kullanılarak, 1984-2023 döneminde mevsimlik ve yıllık toplam yağış ve yüzeysel akış ortalamaları ve eğilimleri değerlendirilmiştir. Mevsimlik ve yıllık toplam yağış yükseklikleri havzada ağırlıklı olarak artış eğilimi gösterirken; yüzeysel akış yüksekliklerinde belirgin eğilimler çoğunlukla azalış yönündedir. Yıllık toplam yağış yüksekliklerinin belirgin eğilimlerinin tamamı artış yönündedir. Havzada en yüksek yağış ortalamalarının görüldüğü kış mevsiminde ve en düşük ortalamaların gözlemlendiği yaz mevsiminde sadece belirgin artış eğilimleri bulunmuştur. Kış mevsimine yakın yağış ortalamaları görülen bahar mevsiminde, havzanın batısında artış, doğusunda azalış eğilimleri olmakla birlikte, belirgin eğilimler artış yönündedir. Yağış yüksekliklerinin belirgin azalış eğilimi gösterdiği mevsim sadece sonbahardır.

Yıllık toplam yüzeysel akış yüksekliklerinin ortalamalarının, yağış ortalamalarının yüksek olduğu bölgelerde yüksek değerler aldığı görülmüştür. Yıllık ve mevsimlik yüzeysel akış eğilimlerinde, yağış eğilimlerine kıyasla daha düşük eğilimler gözlenmiştir. Yıllık ortalamaların yüksek olduğu bölgelerde 40 yıllık dönemde azalış eğilimleri gözlenmiştir. Özellikle Gemlik Körfezi yakınlarında -1 mm/yıl mertebesine varan belirgin azalış eğilimleri göze çarpmıştır. Yıllık yüzeysel akışlarda yerel olarak belirgin artış eğilimleri görülmesine rağmen, eğilimleri sıfıra çok yakındır. Kış mevsiminde belirgin yüzeysel akış eğilimleri batı bölgesinde azalış, doğu bölgesinde artış yönündedir. İlkbaharda, kıyı bölgesinde düşük eğimli artış eğilimlerine karşı, diğer belirgin eğilimler azalış yönündedir. Yaz mevsiminde sadece artış eğilimleri belirgin olarak görülse de, sıfıra yakın eğime sahiptir. Yalnızca azalış eğilimlerinin gözlemlendiği sonbahar mevsiminde, belirgin azalış eğilimleri havzanın kuzeyinde kıyıya yakın kesimlerde en fazla 0.75 mm/yıl eğime sahiptir.

Havzaya düşen yağışın artış eğiliminde olmasına karşı yüzeysel akışın azalış eğiliminde olduğu görülmüştür. Bu bulguya göre, yüksek yağış alan bölgelerde mevcut taşkın riskinin artmayabileceği öngörüsünü kuvvetlendirmektedir. Yağışlarda azalış eğilimi görülmemesi, havzada suya dayalı mevcut faaliyetlerin yakın gelecekte de benzer potansiyelde gerçekleştirebileceğini göstermektedir. Azalış eğilimindeki yüzeysel akışın, akarsu vasıtasıyla taşınan katı madde miktarı üzerinde de etkili olabileceği düşünülmektedir. Karadeniz'in Karasu kıyı bölgesine akarsu ile taşınan katı madde miktarının azalması ve dalga, akıntı gibi kuvvetlerin etkisi ile kıyı erozyonu görülme riski dikkate alınmalıdır. Bu çalışmada elde edilen bulgular su yönetimi, taşkın kontrolü, kıyı yönetimi ve tarımsal planlama gibi alanlarda kullanarak

daha sürdürülebilir ve dirençli bir havza yönetimi stratejisi geliştirilmesine yardımcı olabilir. Sonuçlar ayrıca, yakın gelecek için iklim değişikliğine uyum politikalarına dayanak sağlayabilir. Daha uzak gelecek dönemler için iklim değişikliği senaryolarına dayalı yağış ve yüzeysel akış projeksiyonlarının oluşturulması ile daha geniş bir perspektifte öngörüler elde edilebilir.

Teşekkür: Çalışmada kullanılan ERA5 yeniden analiz verisini sunan Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezine teşekkür ederim. Veriyi çalışma bölgesi sınırları içerisinde analiz edebilmek için havza sınırlarının oluşturulduğu QGIS yazılımı ve SAGA modülü geliştiricilerine, havza şekil dosyası ve ERA5 NetCDF dosyasının işlenirken kullanılan PYTHON yazılımı ve CDO modülü geliştiricilerine ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Yazar katkısı: Recep Emre ÇAKMAK: Çalışmanın tamamını yapmıştır.

Etik kurul onayı: Onay gerektiren bir çalışma değildir.

5. Kaynaklar

- Akarsu Mühendislik. 2021.** Sakarya Havzası Nehir Havza Yönetim Planı. <https://scd.csb.gov.tr/sakarya-havzasi-nehir-havza-yonetim-planı-scd-taslak-kapsam-belirleme-raporu-goruse-acilmistir-duyuru-421744>
- Akbas, A., Özdemir, H. 2024.** Comparing Satellite, Reanalysis, Fused and Gridded (In Situ) Precipitation Products Over Türkiye. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/JOC.8671>
- Anache, JAA., Flanagan, DC., Srivastava, A., Wendland, EC. 2018.** Land use and climate change impacts on runoff and soil erosion at the hillslope scale in the Brazilian Cerrado. *Science of The Total Environment*, 622–623, 140–151. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.11.257>
- Anıl Kızılaslan, M., Sağın, F., Doğan, E., Sönmez, O. 2014.** Aşağı Sakarya Nehri akımlarının yapay sınır ağları ile tahmin edilmesi. *Sakarya University Journal of Science*, 18(2), 99–103. <https://doi.org/10.16984/SAUFBED.00839>
- Büyükyıldız, M., Berktaş, A. 2004.** Parametrik Olmayan Testler Kullanılarak Sakarya Havzası Yağışlarının Trend Analizi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 19(2), 23–38.
- Çeribaşı, G., Doğan, E. 2015a.** Karadeniz Ve Sakarya Havzalarında Yıllık Ortalama Yağışların Trend Analizi. *SDU International Journal of Technological Sciences*, 7(1), 1–7.
- Çeribaşı, G., Doğan, E. 2015b.** Trend Analizi Yöntemi Kullanılarak Batı Ve Doğu Karadeniz İle Sakarya Havzası Akım Miktarlarının Değerlendirilmesi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 7(2), 1–12. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/utbd/issue/25975/273624>
- Church, M., Ferguson, RI. 2015.** Morphodynamics: Rivers beyond steady state. *Water Resources Research*, 51(4), 1883–1897. <https://doi.org/10.1002/2014WR016862>
- Cook, BI., Mankin, JS., Anchukaitis, KJ. 2018.** Climate Change and Drought: From Past to Future. *Current Climate Change Reports* 2018 4:2, 4(2), 164–179. <https://doi.org/10.1007/S40641-018-0093-2>
- Curebal, I., Efe, R., Ozdemir, H., Soykan, A., Sönmez, S. 2016.** GIS-based approach for flood analysis: case study of Keçiçidere flash flood event (Turkey). *Geocarto International*, 31(4), 355–366. <https://doi.org/10.1080/10106049.2015.1047411>
- Dai, A., Zhao, T., Chen, J. 2018.** Climate Change and Drought: a Precipitation and Evaporation Perspective. *Current Climate Change Reports*, 4(3), 301–312. <https://doi.org/10.1007/S40641-018-0101-6/FIGURES/2>
- Duvan, A., Aktürk, G., Yıldız, O. 2021.** Meteorolojik Kuraklığın Zamansal ve Alansal Özelliklerine İklim Değişikliğinin Etkisi, Sakarya Havzası Örneği. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 3(2), 207–217. <https://doi.org/10.46387/bjesr.961816>
- ECMWF. 2016.** IFS Documentation CY41R2. ECMWF.
- Ergün, M., Fırat, B., Tuncer, G., Sönmez, O. 2024.** Küçük Menderes Havzasında Mann-Kendall ve Şen'in Eğimi Yöntemleri Kullanılarak Meteorolojik Değişkenlerin Trend Analizi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 14(2), 1–12. <https://doi.org/10.7212/KARAEELMASFEN.1459907>
- Giorgi, F., Raffaele, F., Coppola, E. 2019.** The response of precipitation characteristics to global warming from climate projections. *Earth System Dynamics*, 10(1), 73–89. <https://doi.org/10.5194/ESD-10-73-2019>
- Haltas, I., Yildirim, E., Oztas, F., Demir, I. 2021.** A comprehensive flood event specification and inventory: 1930–2020 Turkey case study. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 56, 102086. <https://doi.org/10.1016/J.IJDRR.2021.102086>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... Thépaut, JN. 2020.** The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/QJ.3803>
- Hidro Dizayn. 2023.** Sakarya ve Susurluk Havzaları Kuraklık Yönetim Planının Hazırlanması Projesi. https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/SÇD_kuraklık/SAKARYA_NİHAİ_SÇD_16062023.pdf

- Kendall, MG. 1975.** Rank correlation methods (4. edition). Grifin. <https://psycnet.apa.org/record/1948-15040-000>
- Mann, HB. 1945.** Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, 13(3), 245. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Özdemir, Z., Özkaynak Yolcu, M. 2024.** İklim Değişikliğinin ve Kentleşmenin Etkilerini Akarsu Kıyısı Yerleşim Alanlarında Sel Felaketi Üzerinden Tartışmak. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 10(2), 314–333. <https://doi.org/10.21324/DACD.1383055>
- Özel, N., Kalaycı, S., Sevimli, MF., Büyükyıldız, M. 2004.** Sakarya Nehri Havzası Aylık Akım Verilerinin Parametrik Olmayan Yöntemlerle Trend Analizi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 19(2), 11–22. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/sujest/issue/23284/248501>
- Sen, PK. 1968.** Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- SYGM. 2018.** Sakarya Havzası Taşkın Yönetim Planı. [https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/Taşkın Yönetim Planları/SAKARYA HAVZASI TAŞKIN YONETIM PLANI YÖNETİCİ ÖZETİ.pdf](https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/Taşkın_Yönetim_Planları/SAKARYA_HAVZASI_TAŞKIN_YONETIM_PLANI_YÖNETİCİ_ÖZETİ.pdf)
- SYGM. 2025.** Sakarya Havzası. Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü. <https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Sayfalar/Detay.aspx?SayfaId=139>
- Theil, H. 1950.** A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, 3; confidence regions for the parameters of polynomial regression equations. *Indagationes Mathematicae*, 1(2), 467–482.
- Trenberth, KE. 2011.** Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1–2), 123–138. <https://doi.org/10.3354/CR00953>
- Tu, LX., Thanh, VQ., Reyns, J., Van, SP., Anh, DT., Dang, TD., Roelvink, D. 2019.** Sediment transport and morphodynamical modeling on the estuaries and coastal zone of the Vietnamese Mekong Delta. *Continental Shelf Research*, 186, 64–76. <https://doi.org/10.1016/J.CSR.2019.07.015>
- Varol, T., Atesoglu, A., Ozel, H. B., Cetin, M. 2023.** Copula-based multivariate standardized drought index (MSDI) and length, severity, and frequency of hydrological drought in the Upper Sakarya Basin, Turkey. *Natural Hazards*, 116(3), 3669–3683. <https://doi.org/10.1007/S11069-023-05830-4/FIGURES/5>
- Yaykiran, S. 2016.** Sakarya Havzası'nın Yüksek Çözünürlüklü Hidrolojik Modelinin Yapılandırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 176 s. <https://polen.itu.edu.tr/items/eca8edd5-a11f-4d4a-8b7c-c78a56410e2d>
- Yılmaz, A. 2015.** Küresel Isınmanın Dünya Su Rezervleri Üzerindeki Etkileri. *Kent Akademisi*, 8(22), 63–72. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/kent/issue/34398/379897>
- Yue, S., Wang, CY. 2002.** Regional streamflow trend detection with consideration of both temporal and spatial correlation. *International Journal of Climatology*, 22(8), 933–946. <https://doi.org/10.1002/JOC.781>



VDCC Tabanlı Elektronik Olarak Kontrol Edilebilir İkinci Dereceden Filtre

VDCC Based Electronical Controllable Second Order Filter

Hasan Sözen* 

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Manisa, Türkiye

Öz

Analog devrelerde elektronik olarak ayarlanabilirlik özelliği, genellikle kullanılan aktif devre bloğunun terminallerinden birinin akım veya geriliminin harici bir kaynak kullanılarak ayarlanabilmesi ile sağlanır. Gerilim farkı alan akım taşıyıcı (Voltage Differencing Current Conveyor), geçiş iletkenliği kazancı sayesinde kullanıldığı devreye elektronik olarak ayarlanabilirlik özelliği kazandırır. Bu çalışmada, çok girişli çok çıkışlı (Multi Input Multi Output) gerilim farkı alan akım taşıyıcı tabanlı ikinci dereceden filtre devresi önerilmiştir. Önerilen devre mümkün olan en az sayıda eleman kullanılarak tasarlanmıştır. Önerilen devrede bir direnç, iki kondansatör ve bir gerilim farkı alan akım taşıyıcı elemanı kullanılmıştır. Bu devre alçak geçiren (Low Pass), yüksek geçiren (High Pass) ve bant geçiren (Band Pass) filtre fonksiyonlarını gerçekleştirmektedir. PSPICE benzetim programında gerilim farkı alan akım taşıyıcı bloğu için TSMC 0.18 μm CMOS işlem parametreleri kullanılarak önerilen filtre devresinin çalışması incelenmiştir. Teorik analizler ve PSPICE benzetim sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Önerilen devrenin uygulanabilirliğini değerlendirmek için Toplam Harmonik Bozulma (Total Harmonic Distortion) analizi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Gerilim modlu filtre, gerilim farkı alan akım taşıyıcı (VDCC), ikinci dereceden filtre.

Abstract

In analog circuits generally electronical controllability is provided by adjusting current or voltage of the terminal of used active building block through an external source. Voltage differencing current conveyor provides electronical controllability through its transconductance gain. In this study, multi-input multi-output voltage differencing current conveyor based biquadratic filter is proposed. The proposed circuit is designed by using minimum components. It uses only one capacitor and two resistors and one voltage differencing current conveyor. It realizes low-pass, high-pass and band-pass filter functions. TSMC 0.18 μm CMOS process parameters are used to realize voltage differencing current conveyor and investigate the proposed circuit in PSPICE program. It is observed that theoretical analyses and simulation results are closely to each other. Total harmonic distortion analyses are performed to assess the feasibility of the presented circuit.

Keywords: Voltage-mode filter, voltage differencing current conveyor (VDCC), second-order filter.

1. Giriş

Bilindiği gibi analog filtreler birçok alanda; osilatörler, haberleşme sistemleri vs. kullanılabilen temel devrelerden bir tanesidir. Analog filtreler, pasif ve aktif olmak üzere iki farklı yapıdadır. Aktif devre blokları kullanılarak tasarlanmış filtre devreleri aktif filtreler olarak tanımlanır. Ayrıca analog filtreler, giriş ve çıkış terminallerindeki sinyallere göre

gerilim modlu ve akım modlu olarak da sınıflandırılabilir. Literatürde farklı aktif devre elemanları kullanan birçok gerilim modlu (Abuelma'atti ve Al-Shahrani 1996, Alpaslan ve Yüce 2020, Doğan ve Yüce 2024, Hassan ve Mahmoud 2010, Horng 2012, Horng vd. 2006a-b, Lee 2010, Liu ve Lee 1997, Minaei ve İbrahim 2009, Minaei ve Yüce 2010, M. Soliman 2008, Nikoloudis ve Psychalinos 2010, Shah ve Iqbal 2005, Singh vd. 2006, Yüce 2010, Yüce vd. 2016) ve akım modlu (Jaikla vd. 2012, Kaçar vd. 2012, Li 2014, Prasad vd. 2009, Rehman Nasir ve Ahmad 2012, Sağbaş ve Fidanboyulu 2004, Satansup ve Tangsrirat 2014, Shah vd. 2007, Siripruchyanun ve Jaikla 2010, Tangsrirat ve Prasertsom 2007) analog filtre devresi önerilmiştir.

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: hasan.sozen@cbu.edu.tr

Hasan Sözen  orcid.org/0000-0002-0783-5276



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

Gerilim farkı alan akım taşıyıcı (Voltage Differencing Current Conveyor, VDCC) elemanı, Biolek ve çalışma arkadaşları tarafından 2008 yılında önerilmiştir (Biolek vd. 2008). Bu eleman bir işlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisi (Operational Transconductance Amplifier, OTA) ve bir ikinci nesil akım taşıyıcı (Second Generation Current Conveyor, CCII) elemanının birlikte kullanılması sonucu elde edilmiştir. VDCC elemanının OTA elemanı barındırması nedeni ile elektronik olarak kontrol edilebilen geçiş iletkenliği kazancı (g_m), bu elemanın geniş kullanım alanı bulmasını neden olmuştur.

Literatürde önerilen VDCC tabanlı analog filtreler bazı olumsuz nitelikler barındırmaktadır;

Bazı çalışmalarda önerilen filtre fonksiyonlarını gerçekleştirebilmek için kullanılan devre elemanlarından bazıları arasında eşleştirme zorunluluğu gerekir (Arora vd. 2019, Gupta ve Arora 2018, Roy vd. 2021, Uttaphut 2018). Tasarlanan devrelerin parametreleri elektronik olarak kontrol edilme özelliğinden yoksundur (Kaçar vd. 2015, Lamun vd. 2015, Uttaphut 2018). Önerilen devreler birden fazla aktif devre bloğu ile gerçekleştirildiğinden alan işgali ve enerji tüketimi fazladır (Arora vd. 2019, Gupta vd. 2019, Gupta ve Arora 2018, Jain ve Kumar 2016, Kumar vd. 2018, Rana vd. 2016, Sotner vd. 2015).

Önerilen devre literatürdeki diğer bazı devrelere göre şu avantajlara sahiptir:

- 1) Tek bir aktif eleman kullandığından dolayı, birden çok aktif eleman kullanan filtre devrelerine kıyasla (Abuelma'atti ve Al-Shahrani 1996, Alpaslan ve Yüce 2020, Doğan ve Yüce 2024, Hassan ve Mahmoud 2010, Horng vd. 2006a, Horng vd. 2006b, Lee 2010, Liu ve Lee 1997, Nikoloudis ve Psychalinos 2010, Minaei ve Ibrahim 2009, Minaei ve Yüce 2010, Shah ve Iqbal 2005, Singh vd. 2006, Yüce vd. 2016, Yüce 2010) entegre devre olarak gerçekleştirildiğinde daha küçük alan kaplar.
- 2) Önerilen filtre fonksiyonlarının gerçekleştirilmesinde, literatürdeki bazı filtre devrelerinin aksine (Abuelma'atti ve Al-Shahrani 1996, Doğan ve Yüce 2024, Horng 2012, Liu ve Lee 1997, Nikoloudis ve Psychalinos 2010, Shah ve Iqbal 2005, Singh vd. 2006, Yüce 2016) devrede kullanılan pasif devre elemanları arasında herhangi bir eşleme olmasına gerek yoktur. Bu sayede önerilen devre hem tasarım kolaylığı, hem uygulama güvenilirliği açısından üstündür. Eleman eşleme ihtiyacının olmaması devrenin kararlı çalışabileceğinin de göstergesidir.

Bu çalışmada gerilim modlu çok girişli çok çıkışlı (Multi Input Multi Output, MIMO) VDCC tabanlı ikinci dereceden aktif filtre devresi önerilmiştir. Bu devreye ait teorik analizler kullanılan VDCC elemanının hem ideal hem de ideal olmayan kazanç etkileri dikkate alınarak elde edilmiştir. PSPICE benzetim programı ile teorik analizlerin doğruluğu ispatlanmıştır. Bu çalışmanın organizasyonu şu şekildedir: Bölüm 2 de kullanılan VDCC elemanı tanıtılmıştır. Önerilen devre yapısı Bölüm 3'te anlatılmıştır. Bölüm 4 önerilen devreye ait ideal olmayan terimlerin devre üzerindeki etkisi incelenmiştir. PSPICE benzetim sonuçları Bölüm 5'te verilmiştir. Bölüm 6'da ise çalışmaya ait sonuçlar özetlenmiştir.

2. Gereç ve Yöntemler

2.1. VDCC Elemanı

Biolek ve arkadaşları tarafından önerilen (Biolek vd. 2008) VDCC elemanına ait devre sembolü Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu aktif devre bloğu ikisi (P ve N) giriş, diğerleri (Z, X, W_p , W_n) ise çıkış olmak üzere altı adet terminale sahiptir. X terminali hariç, diğer tüm terminaller yüksek empedansa sahiptir. Aşağıdaki matris denkleminde VDCC elemanına ait ideal olmayan gerilim ve akım kazançlarını da içeren terminal ilişkileri verilmiştir (Kaçar vd. 2014).

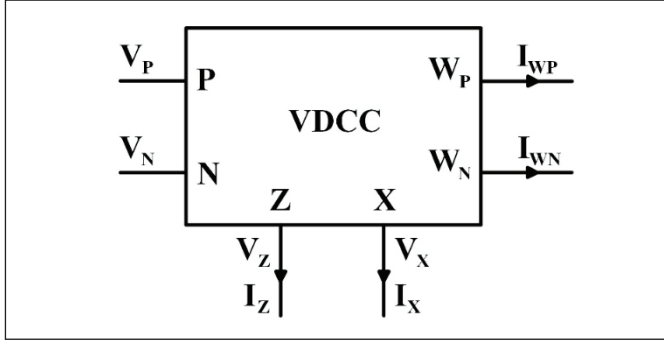
$$\begin{bmatrix} I_N \\ I_P \\ I_Z \\ V_Z \\ I_{W_p} \\ I_{W_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha g_m & -\alpha g_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_{W_p} \\ 0 & 0 & 0 & -\gamma_{W_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_n \\ V_x \\ I_x \end{bmatrix} \quad (1)$$

burada α , β ve γ ideal olmayan gerilim ve akım kazançlarını temsil eder. İdeal durumda bu kazançlar 1'e eşittir. Yukarıdaki matris denklemindeki g_m ise VDCC elemanına ait geçiş iletkenliği kazancını temsil eder. Bu parametreye ilişkin denklem aşağıda verilmiştir.

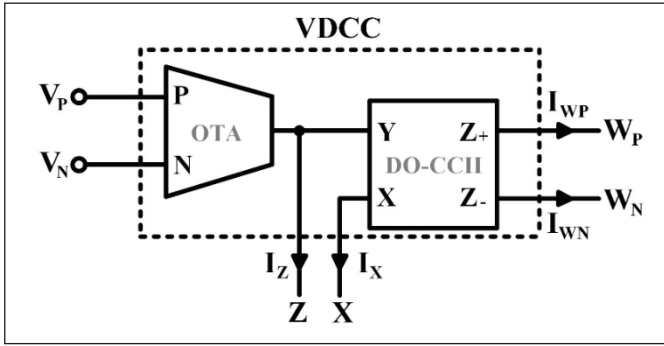
$$g_m = \sqrt{I_{Bl} \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right)} \quad (2)$$

burada μ_n NMOS transistörler için taşıyıcı hareketliliğini, C_{ox} birim alan başına kapı oksit kapasitansı, W kanal genişliğini, L kanal uzunluğunu ve I_{Bl} kutuplama akımını temsil eder.

Şekil 2'de açıkça görüldüğü gibi VDCC elemanı bir OTA ve bir CCII elemanından oluşmaktadır. OTA elemanının kutuplama akımına bağlı olarak değişen g_m parametresi, VDCC kullanılarak tasarlanan devrelerin parametrelerinin



Şekil 1. VDCC elemanına ait devre sembolü.



Şekil 2. VDCC elemanına ait blok diyagramı.

elektronik olarak kontrol edilebilmesine imkan sağlar. Ayrıca VDCC elemanı hem gerilim hem de akım modlu devrelerde kullanılabilmektedir.

2.2. Önerilen İkinci Dereceden Filtre Devresi

Şekil 3'te önerilen VDCC tabanlı ikinci dereceden filtre devresi gösterilmiştir. Bu devrede pasif devre elemanı olarak bir kondansatör ve iki direnç kullanılmıştır. Açıkça görüleceği üzere önerilen devre ikinci dereceden filtre fonksiyonunu mümkün olan en az pasif devre elemanı kullanarak gerçekleştirmektedir. Ayrıca kullanılan elemanların iki tanesi topraklanmış durumdadır. Bu durum devrenin tümleşik olarak gerçekleşmesini kolaylaştırmaktadır. Önerilen devre iki giriş-iki çıkışa sahiptir. Dolayısıyla bu devre MIMO devre olarak tanımlanabilir. Bu devre, alçak geçiren (Low Pass, LP), yüksek geçiren (High Pass, HP) ve alçak geçiren (Band Pass, BP) filtre fonksiyonlarını gerçekleştirmektedir. Devredeki her bir çıkış gerilim ifadesi giriş gerilimleri cinsinden aşağıdaki gibi elde edilmiştir. İfadeler elde edilirken $G = \frac{1}{R}$ olarak alınmıştır.

$$V_{c1} = \frac{V_2 s^2 C_1 C_2 + V_1 g_m G}{s^2 C_1 C_2 + s C_2 g_m + g_m G} \quad (3)$$

$$V_{c2} = \frac{G[V_1(g_m + sC_1) - V_2 sC_1]}{s^2 C_1 C_2 + s C_2 g_m + g_m G} \quad (4)$$

Yukarıda elde edilen ifadelerin payda kısmından devrenin açılmal kesim frekansı (ω_0) ve kalite faktörü (Q) aşağıdaki gibi elde edilmiştir. Bu devre parametrelerinin VDCC elemanına ait g_m parametresi aracılığıyla elektronik olarak kontrol edilebildiği açıktır. Bu sayede devre parametrelerinin, devrede kullanılan pasif eleman(lar)ın değerini değiştirmeden ayarlanabilmesini mümkün kılar.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g_m G}{C_1 C_2}} \quad (5)$$

$$Q = \sqrt{\frac{G C_1}{g_m C_2}} \quad (6)$$

Çizelge 1'de devrenin gerçekleştireceği filtre fonksiyonuna göre giriş gerilimlerinin durumu ve çıkış terminalinin seçimi ve filtrelerin genlik kazancı gösterilmiştir. Ayrıca, ω_0 ve Q parametreleriyle ilgili pasif ve aktif bağıl duyarlılıklar da elde edilmiştir.

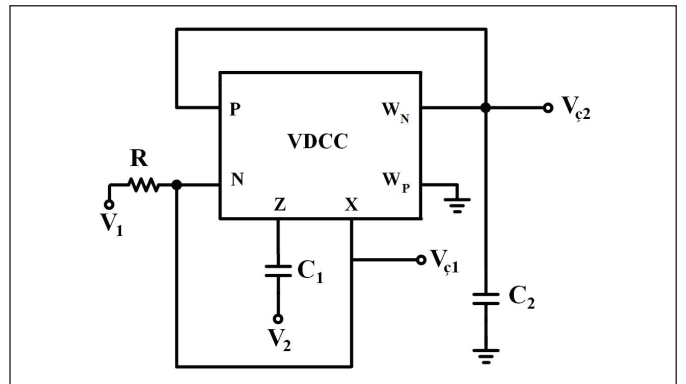
$$S_G^{\omega_0} = -S_{C_1}^{\omega_0} = -S_{C_2}^{\omega_0} = S_{g_m}^{\omega_0} = \frac{1}{2} \quad (7)$$

$$S_G^Q = S_{C_1}^Q = -S_{C_2}^Q = -S_{g_m}^Q = \frac{1}{2} \quad (8)$$

Yukarıda ifadelerden açıkça görüldüğü üzere elde edilen pasif ve aktif bağıl duyarlılıkların mutlak genliği 1'den küçüktür. Pasif ve aktif bağıl duyarlılıkların 1'den düşük çıkması, önerilen filtrenin devredeki bileşen toleranslarının, sıcaklık değişiminin ve devrede kullanılan elemanların üretim farklılığının devrenin çalışmasını en az seviyede etkileyeceğini göstermektedir.

2.3. VDCC Elemanındaki İdeal Olmayan Kazançların Önerilen Devre Üzerindeki Etkisi

VDCC elemanına ait terminal ilişkilerinde ideal olmayan gerilim ve akım kazançları (α , β , γ) Denklem (1)'de gösterilmiştir. İdeal olmayan bu etkilerin devre davranışına etkisi incelenmiştir. Önerilen devrenin ω_0 ve Q parametreleri ide-



Şekil 3. VDCC tabanlı ikinci dereceden filtre devresi.

Çizelge 1. Gerçekleştirilecek filtre fonksiyonuna göre giriş gerilimi ve çıkış terminalinin durumu.

V_1	V_2	Çıkış Terminali	Filtre Fonksiyonu	Kazanç
0	$V_{giriş}$	$V_{ç1}$	HP	1
0	$V_{giriş}$	$V_{ç2}$	BP	$\left(-\frac{GC_1}{g_m C_2}\right)$
$V_{giriş}$	$V_{giriş}$	$V_{ç2}$	LP	1

al olmayan gerilim ve akım kazançları dikkate alınarak ω'_0 ve Q' olarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\omega'_0 = \sqrt{\frac{g_m \alpha G \gamma W_N}{C_1 C_2 \beta}} \quad (9)$$

$$Q' = \sqrt{\frac{\beta \gamma W_N C_1 G}{\alpha g_m C_2}} \quad (10)$$

VDCC elemanının ideal olmayan gerilim ve akım kazançları dikkate alındığında elde edilen ve parametrelerine ait aktif ve pasif duyarlılıklar aşağıdaki gibi elde edilmiştir. Elde edilen ifadelerden açıkça görüldüğü üzere pasif ve aktif bağlı duyarlılıkların mutlak genliği 1'den küçüktür.

$$S_G^{\omega_0} = -S_{C_1}^{\omega_0} = -S_{C_2}^{\omega_0} = S_{g_m}^{\omega_0} = S_{\gamma W_N}^{\omega_0} = S_{\alpha}^{\omega_0} = -S_{\beta}^{\omega_0} = \frac{1}{2} \quad (11)$$

$$S_G^{Q'} = S_{C_1}^{Q'} = -S_{C_2}^{Q'} = -S_{g_m}^{Q'} = -S_{\gamma W_N}^{Q'} = -S_{\alpha}^{Q'} = S_{\beta}^{Q'} = \frac{1}{2} \quad (12)$$

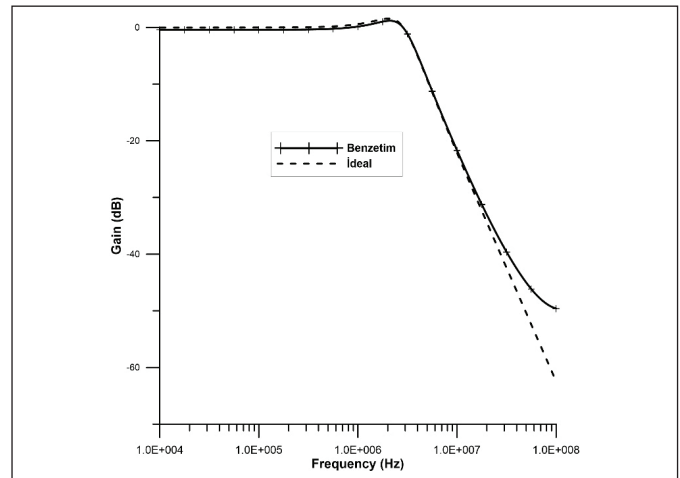
3. Bulgular ve Tartışma

Önerilen devrenin benzetim sonuçları PSPICE programı kullanılarak elde edilmiştir. VDCC elemanının CMOS gerçeklemesi kullanılmıştır (Kaçar vd. 2014). CMOS gerçeklemesindeki W/L boyutları aynı çalışmadan alınmıştır. Devrede kullanılan besleme gerilimleri $V_{DD} = -V_{SS} = 0.9$ V ve kutuplama akımları $I_{B1} = 50$ μ A, $I_{B2} = 100$ μ A olarak seçilmiştir. Seçilen kutuplama akımının değeri g_m parametresini 280 μ A/V olarak ölçmemize neden olmuştur. Devrenin girişine uygulanan gerilimlerin genliği 100 mV olarak seçilmiştir. Devrede kullanılan direnç ve kondansatör değerleri ise sırasıyla $R = 5$ K Ω , $C_1 = 17$ pF, $C_2 = 11$ pF olarak seçilmiştir. Kullanılan pasif devre elemanlarının değerleri ile yukarıda bahsedilen akım ve gerilimlerin değerleri farklı değerlerde de seçilebilir. Bu değerlerin seçimi g_m parametresini ve f_o ve Q değerlerinin teorik hesabını değiştirecektir. Yukarıdaki pasif devre elemanları ile akım değerlerinin neticesinde f_o ve Q değerleri teorik olarak 2.75 MHz ve 1.11 şeklinde hesaplanmıştır. PSPICE benzetimleri sonucunda f_o ve Q değerleri 2.81 MHz ve 1,05 şeklinde ölçülmüştür. Teorik ve benzetim sonuçları arasında f_o ve Q için sırasıyla % 2.5 ve %5 fark

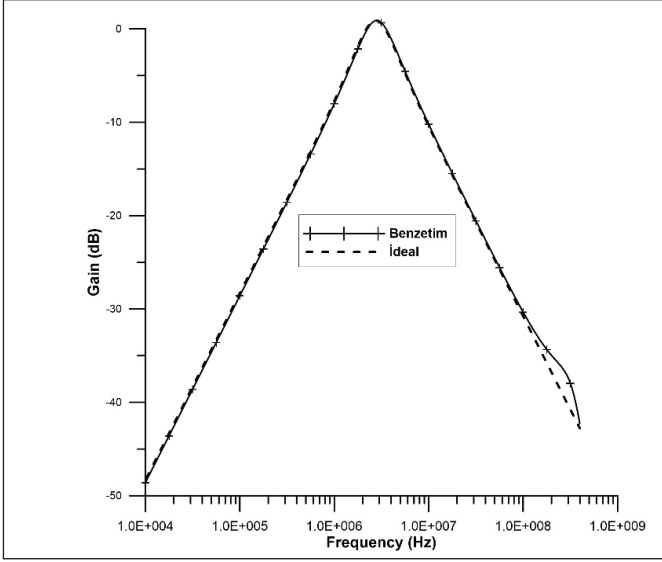
olduğu hesaplanmıştır. Bu farkın kabul edilebilir derecede olduğu görülmüştür.

Önerilen devre için LP, BP ve HP filtre fonksiyonları için frekans cevabı hem teorik hem de benzetim programı kullanılarak sırasıyla Şekil 4-6'da gösterilmiştir. Bu şekillerdeki sonuçlardan açıkça görüldüğü gibi teorik sonuçlar ve benzetim programı sonuçları oldukça yakın çıkmıştır. Bu durum önerilen devre performansının oldukça iyi olduğunu göstermektedir. Çalışmanın başında da ifade edildiği gibi aktif eleman olarak kullanılan VDCC elemanının g_m parametresi elektronik olarak değiştirilebildiği için önerilen devre parametreleri de elektronik olarak kontrol edilebilmektedir. Devre parametrelerinin elektronik olarak kontrol edilebildiğini göstermek için g_m parametresi değiştirilerek BP filtresinin frekans cevabının davranışı gözlemlenmiştir. Denklem (5) ve (6)'dan açıkça görüldüğü üzere devrenin ve parametreleri g_m ile sırasıyla doğru ve ters orantılı olarak değişmektedir. Farklı g_m parametresi için BP filtresinin benzetim sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7'de görüldüğü üzere g_m parametresi küçüldükçe artmakta, ise azalmaktadır. Ayrıca, Çizelge 1'de de görüldüğü gibi BP filtrenin kazancı g_m ile ters orantılıdır. Bu nedenle Şekil 7'de g_m küçüldükçe filtrenin kazancı artmaktadır.

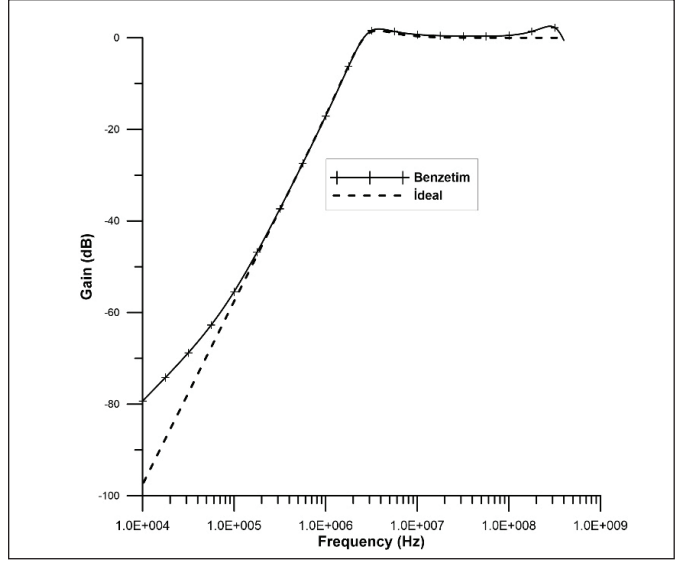
THD analizi devrelerin doğrusallığının incelenmesi için önemlidir. Önerilen bant geçiren filtre için THD analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 8'den de anlaşılabacağı üzere THD değerinin giriş gerilim genliğinin artmasıyla birlikte arttığı görülmüştür. THD değeri 570 mV_{tepe-tepe} giriş gerilimi değerine kadar %3'ün altında kalmaktadır. Bu değer, önerilen filtre devresinde sinyal bütünlüğünün korunduğunu, bozulmanın oldukça düşük seviyelerde olduğunu ve devrenin pra-



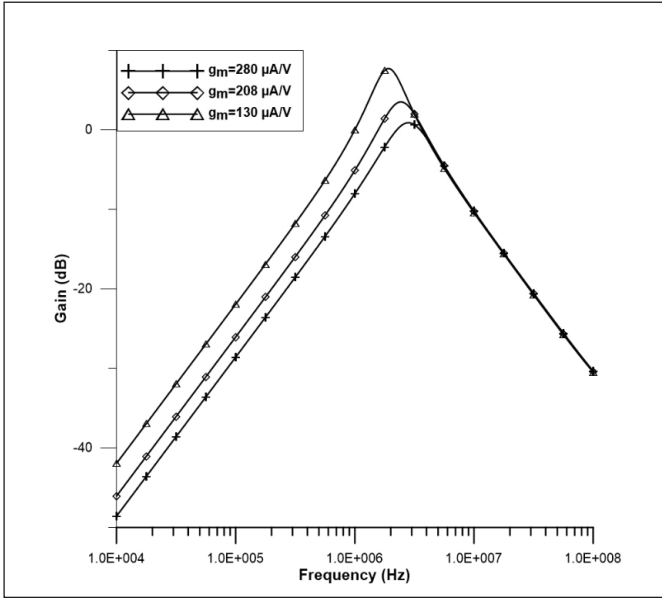
Şekil 4. Önerilen LP filtre devresinin frekans cevabına ilişkin teorik ve benzetim sonuçları.



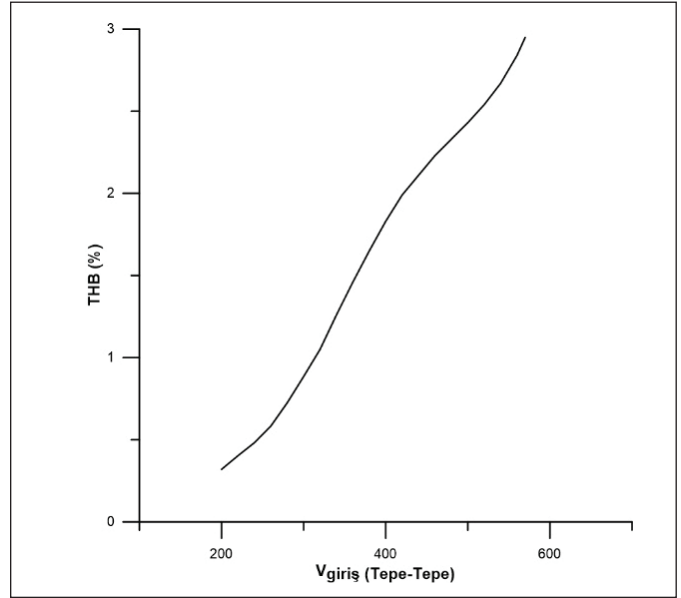
Şekil 5. Önerilen BP filtre devresinin frekans cevabına ilişkin teorik ve benzetim sonuçları.



Şekil 6. Önerilen HP filtre devresinin frekans cevabına ilişkin teorik ve benzetim sonuçları.



Şekil 7. Önerilen devrenin farklı g_m değerleri için frekans cevabına ilişkin benzetim sonuçları.



Şekil 8. Önerilen BP filtresi için giriş geriliminin artışına göre THD değişimi.

tik uygulamalar için kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Bu değerin elde edilmesi, devredeki aktif eleman bloğu ve pasif devre eleman değerlerinin uygun seçildiğinin göstergesidir.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada gerilim modlu MIMO yapıya sahip ikinci dereceden filtre devresi önerilmiştir. Bu devre; BP, LP ve HP filtre fonksiyonlarını herhangi bir eleman eşleme gereksini-

mi olmadan gerçekleştirmektedir. Ancak devrede kullanılan tüm pasif elemanlar topraklanmış değildir. Önerilen devrede besleme gerilimi olarak ± 0.9 V kullanılmıştır. Önerilen dereye ait güç tüketimi 1.75 mW olup oldukça düşüktür. Bu nedenle önerilen devrenin düşük güç tüketimi gerektiren devrelerde kullanımı uygundur. Önerilen devrenin kesim frekansı devrede kullanılan pasif devre elemanlarının değerleri sonucunda 2.75 MHz olarak belirlenmiştir. Bu devreye ait f_o ve Q parametreleri VDCC elemanının g_m parametresi

sayesinde elektronik olarak ayarlanabilmektedir. Önerilen devre için teorik analizler VDCC elemanının hem ideal hem de ideal olmayan kazanç etkileri dikkate alınarak elde edilmiştir. Her iki durumda da devredeki bağlı duyarlılıkların 1'den küçük olduğu gösterilmiştir. Devreye ait teorik analizler PSPICE benzetim programı sonuçları ile doğrulanmıştır. Ayrıca devrenin kabul edilebilir bir THD değer aralığına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

5. Kaynaklar

- Abuelma'atti, MT., Al-Shahrani, SM. 1996.** New universal filter using two current-feedback amplifiers. *International Journal of Electronics*, 80(6): 753–756. Doi:10.1080/002072196137039
- Alpaslan, H., Yuce, E. 2020.** DVCC+ based multifunction and universal filters with the high input impedance features. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 103(2): 325–335. Doi:10.1007/s10470-020-01643-8
- Arora, TS., Rohil, B., Gupta, S. 2019.** Fully Integrable/Cascadable CM Universal Filter and CM Quadrature Oscillator Using VDCC and Only Grounded Passive Elements. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 28(11): 1950181. Doi:10.1142/S0218126619501810
- Biolek, D., Senani, R., Biolkova, V., Kolka, Z. 2008.** Active elements for analog signal processing: Classification, review, and new proposals. *Radioengineering*, 17(4): 15–32. Scopus.
- Doğan, M., Yuce, E. 2024.** A voltage-mode fully cascadable biquad with three CFOAs and grounded capacitors. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 185, 155430. Doi:10.1016/j.aeue.2024.155430
- Gupta, M., Arora, TS. 2018.** Realization of Current Mode Universal Filter and a Dual-Mode Single Resistance Controlled Quadrature Oscillator Employing VDCC and Only Grounded Passive Elements. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 15 (5), 833–845. Doi:10.15598/aece.v15i5.2397
- Gupta, M., Dogra, P., Arora, TS. 2019.** Novel current mode universal filter and dual-mode quadrature oscillator using VDCC and all grounded passive elements. *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 16(4): 220–236. Doi:10.1080/1448837X.2019.1648134
- Hassan, TM., Mahmoud, SA. 2010.** New CMOS DVCC realization and applications to instrumentation amplifier and active-RC filters. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 64(1):47–55. Doi:10.1016/j.aeue.2008.11.002
- Horng, JW. 2012.** Voltage-mode multifunction biquadratic filter employing single DVCC. *International Journal of Electronics*, 99(2):153–162. Doi:10.1080/00207217.2011.623268
- Horng, JW., Hou, CL., Chang, CM., Chung, WY. 2006a.** Voltage-Mode Universal Biquadratic Filters with One Input and Five Outputs. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 47(1):73–83. Doi:10.1007/s10470-006-2224-2
- Horng, JW., Kaewpoonsuk, CL., Chang, CM., Chou, HP., Lin, CT. 2006b.** High Input Impedance Voltage-Mode Universal Biquadratic Filter with One Input and Five Outputs Using Current Conveyors. *Circuits, Systems and Signal Processing*, 25(6):767–777. Doi:10.1007/s00034-005-1227-z
- Jaikla, W., Siripongdee, S., Suwanjan, P. 2012.** MISO Current-mode Biquad Filter with Independent Control of Pole Frequency and Quality Factor. *Radioengineering*, 21(3): 886–891. Scopus.
- Jain, R., Kumar, P. 2016.** VDCC based voltage mode Tow-Thomas biquad filter. 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), 1–4. Doi:10.1109/ICPEICES.2016.7853464
- Kaçar, F., Yeşil, A., Kuntman, H. 2012.** Current-Mode Biquad Filters Employing Single FDCCII. *Radioengineering*, 21(4): 1269–1278. Scopus.
- Kaçar, F., Yeşil, A., Minaei, S., Kuntman, H. 2014.** Positive/negative lossy/lossless grounded inductance simulators employing single VDCC and only two passive elements. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 68(1):73–78. Doi:10.1016/j.aeue.2013.08.020
- Kaçar, F., Yeşil, A., Gürkan, K. 2015.** Design and experiment of VDCC-based voltage mode universal filter. *Indian Journal of Pure and Applied Physics*, 53(5):341–349. Scopus.
- Kumar, S., Dhingra, G., Kumar, P. 2018.** Variable Transconductance Voltage Differencing Current Conveyor and its Application in Filter Design. 2018 New Generation of CAS (NGCAS), 5–8. Doi:10.1109/NGCAS.2018.8572167
- Lamun, P., Phatsornsiri, P., Torteanchai, U. 2015.** Single VDCC-based current-mode universal biquadratic filter. 2015 7th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), 122–125. Doi:10.1109/ICITEE.2015.7408926
- Lee, CN. 2010.** Multiple-Mode OTA-C Universal Biquad Filters. *Circuits, Systems and Signal Processing*, 29(2):263–274. Doi:10.1007/s00034-009-9145-0
- Liu, SI., Lee, JL. 1997.** Voltage-mode universal filters using two current conveyors. *International Journal of Electronics*, 82(2): 145–150. Doi:10.1080/002072197136147
- Li, YA. 2014.** Electronically tunable current-mode biquadratic filter and four-phase quadrature oscillator. *Microelectronics Journal*, 45(3):330–335. Doi:10.1016/j.mejo.2013.12.005

- Minaei, S., Ibrahim, MA. 2009.** A mixed-mode KHN-biquad using DVCC and grounded passive elements suitable for direct cascading. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 37(7):793-810. Doi:10.1002/cta.493
- Minaei, S., Yuce, E. 2010.** All-Grounded Passive Elements Voltage-Mode DVCC-Based Universal Filters. *Circuits, Systems and Signal Processing*, 29(2):295-309. Doi:10.1007/s00034-009-9136-1
- Nikoloudis, S., Psychalinos, C. 2010.** Multiple Input Single Output Universal Biquad Filter with Current Feedback Operational Amplifiers. *Circuits, Systems and Signal Processing*, 29(6):1167-1180. Doi:10.1007/s00034-010-9194-4
- Prasad, D., Bhaskar, DR., Singh, AK. 2009.** Universal current-mode biquad filter using dual output current differencing transconductance amplifier. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 63(6):497-501. Doi:10.1016/j.aeue.2008.02.012
- Rana, S., Kumawat, AK., Kumar, P. 2016.** A universal current mode KHN biquad filter using voltage differencing current conveyor. 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), 1-5. Doi:10.1109/ICPEICES.2016.7853506
- Rehman Nasir, A., Ahmad, SN. 2012.** CDTAs based Current-Mode Multifunction Filter Employing Grounded Capacitors. *International Journal of Computer Applications*, 43(10):17-19. Doi:10.5120/6139-8383
- Roy, S., Paul, TK., Maiti, S., Pal, RR. 2021.** Voltage Differencing Current Conveyor Based Voltage-Mode and Current-Mode Universal Biquad Filters with Electronic Tuning Facility. *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, 11(2): 146-160. Doi:10.46604/ijeti.2021.6821
- Sagbaş, M., Fidanboyulu, K. 2004.** Electronically tunable current-mode second-order universal filter using minimum elements. *Electronics Letters*, 40(1):2-4. Doi:10.1049/el:20040013
- Satansup, J., Tangsrirat, W. 2014.** Compact VDTA-based current-mode electronically tunable universal filters using grounded capacitors. *Microelectronics Journal*, 45(6):613-618. Doi:10.1016/j.mejo.2014.04.008
- Shah, NA., Iqbal, SZ. 2005.** Rather, M.F.: Versatile voltage-mode CFA-based universal filter. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 59(3): 192-194. Doi:10.1016/j.aeue.2004.11.037
- Shah, NA., Quadri, M., Iqbal, SZ. 2007.** Current-mode multifunction filter using current differencing transconductance amplifier. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 45(9): 767-769.
- Singh, VK., Singh, AK., Bhaskar, DR., Senani, R. 2006.** New Universal Biquads Employing CFOAs. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 53(11): 1299-1303. Doi:10.1109/TCSII.2006.882345
- Siripruchyanun, M., Jaikla, W. 2010.** Current-mode biquadratic filter using DO-CCDDBAs. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 38(3):321-330. Doi:10.1002/cta.556
- Soliman, AM. 2008.** The inverting second generation current conveyors as universal building blocks. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 62(2):114-121. Doi:10.1016/j.aeue.2007.03.006
- Sotner, R., Herencsar, N., Jerabek, J., Vrba, K., Dostal, T., Jaikla, W., Metin, B. 2015.** Novel first-order all-pass filter applications of z-copy voltage differencing current conveyor. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 53(8): 537-545.
- Tangsrirat, W., Prasertsom, D. 2007.** Electronically tunable low-component-count current-mode biquadratic filter using dual-output current followers. *Electrical Engineering*, 90(1):33-37. Doi:10.1007/s00202-006-0051-1
- Uttaphut, P. 2018.** Simple Three-Input Single-Output Current-Mode Universal Filter Using Single VDCC. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 8(6):4932. Doi:10.11591/ijece.v8i6.pp4932-4940
- Yüce, E. 2010.** A novel floating simulation topology composed of only grounded passive components. *International Journal of Electronics*, 97(3):249-262. Doi:10.1080/00207210903061907
- Yüce, E., Tokat, S., Yucel, F. 2016.** A new wideband electronically tunable grounded resistor employing only three MOS transistors. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 24:2442-2453. Doi:10.3906/elk-1403-12



Elektrokaplama Yöntemiyle TiO_2 Fotoanotların Boya Duyarlı Güneş Pili Uygulamaları

Dye-Sensitized Solar Cell Applications of TiO_2 Photoanodes by Electrocoating Method

Soner Çakar^{1,2*}

¹Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, Zonguldak, Türkiye

²Sakarya Üniversitesi, Biyomalzemeler, Enerji, Fotokataliz, Enzim Teknolojisi, Nano ve İleri Malzemeler, Eklemeli Üretim, Çevresel Uygulamalar ve Sürdürülebilirlik Araştırma ve Geliştirme Grubu (BİOENAMS), Sakarya, Türkiye

Öz

Boya duyarlı güneş pilleri düşük maliyetleri, çevre dostu malzemelerin kullanıldığı son yıllarda yoğun bir şekilde çalışmaların gerçekleştirildiği alandır. Son zamanlarda boya duyarlı güneş pillerinde yenilikçi malzemelerin kullanımına yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Bu çalışmada çevre dostu, düşük maliyetli ve aminoasitlerin kullanıldığı boya duyarlı güneş pilinin üretimi amaçlanmaktadır. Bu çalışmada, boya duyarlı güneş pili uygulamaları için TiO_2 'nin elektrokaplanması ve geliştirilen bu fotoanot yapılarının N719 rutenyum esaslı duyarlaştırıcı ile özelliklerinin incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Farklı potansiyel şartları, farklı elektrolitler ($NaCl$, KCl ve $LiClO_4$) ve farklı konsantrasyondaki Titanyum başlangıç maddeleri ortamında optimum fotoanot şartları belirlenerek boya duyarlı güneş pili uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan fotoanotların karakterizasyonunda XRD, FE-SEM, FTIR ve DRS teknikleri kullanılmıştır. Ayrıca, hazırlanan güneş pillerinin karakterizasyonunda J-V eğrilerinin yanı sıra Nyquist tipi empedans eğrilerinden de yararlanılmıştır. En yüksek güneş pili verim özellikleri 10 mM titanyum başlangıç maddesi, -1.0V potansiyelde ve $LiClO_4$ elektrolit ortamında %6.20 olarak belirlenmiştir. Bu çalışma ile boya duyarlı güneş pillerinde TiO_2 fotoanotlar için optimum şartlar belirlenmiş ve hazırlanan fotoanotların gelecekteki uygulamaları için umut verici sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrobiriktilme, güneş enerjisi, üçüncü nesil güneş pilleri.

Abstract

In recent years, there has been significant progress in the field of dye-sensitized solar cells, with a particular focus on the use of cost-effective and eco-friendly materials. This study aims to explore the potential of innovative materials in this field, with a particular emphasis on the production of environmentally sustainable and cost-efficient solar cells through the use of amino acids. The study investigates the electrocoating of TiO_2 for dye-sensitized solar cell applications and the properties of these photoanode structures developed with N719 ruthenium-based sensitizer. Dye-sensitized solar cell applications were carried out by determining the optimum photoanode conditions in different potential conditions, different electrolytes ($NaCl$, KCl and $LiClO_4$) and Titanium starting materials of different concentrations. The prepared photoanodes were characterised using XRD, FE-SEM, FTIR and DRS techniques, while Nyquist type impedance curves and J-V curves were used to characterise the prepared solar cells. The highest solar cell efficiency properties were determined as 6.20% at 10 mM titanium starting material, -1.0V potential and $LiClO_4$ electrolyte medium. This study has determined the optimum conditions for TiO_2 photoanodes in dye-sensitized solar cells, and promising results have been obtained for the future applications of the prepared photoanodes.

Keywords: Electrodeposition, solar energy, third generation solar cells.

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

Soner Çakar orcid.org/0000-0002-3745-954X



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

1. Giriş

Güneş pilleri (GP); gürültü, hareketli parça veya çevre kirliliği olmadan güneş enerjisini direk elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Ticari olarak temin edilebilen ve en çok kullanılan GP türü silikon tabanlı olanlardır. Amorf-silikon, bakır indiyum galyum diselenit (CIGS) ve galyum arsenür (GaAs) ince film GP'leri olarak sınıflandırılırlar ve verimleri sırasıyla %10, %17-20 ve %28-30'dur. Diğer GP'lerinin verimleri ise boya duyarlı güneş pilleri (BDGP) %7-11 ve organik GP'leri %4-10 arasında değişmektedir. BDGP'leri, düşük üretim maliyetleri, üretim kolaylığı ve düşük ışık koşullarında yüksek güç dönüşüm verimliliği potansiyeli nedeniyle geleneksel silikon tabanlı fotovoltaik teknolojilere umut verici alternatifler olarak ortaya çıkmıştır (Devadiga vd. 2021). Gratzel ve O'Regan geleneksel GP'lerine göre daha az dönüşüm verimi sağlayan ancak daha düşük maliyetli ve pratik uygulamalarda kullanılabilecek özelliklerdeki BDGP'lerini ilk kez 1991 yılında keşfetmişlerdir (O'Regan ve Grätzel 1991). BDGP'leri, GP'leri alanda son yıllardaki en önemli teknolojik gelişmelerden biri olarak addedilmektedir. BDGP'lerinin birleşenleri; yarıiletken kaplı elektrot, ışık soğurucu boya, elektrolit ve platin kaplı karşıt elektrotur (Hagfeldt vd. 2010). Fotoanotlarda en çok kullanılan yarıiletkenler geniş bant aralıklarına sahip TiO₂ ve ZnO'dur. Karşıt elektrotta yaygın olarak Pt veya grafen ile kaplanmış FTO/cam (flor katkılı kalay oksit cam) veya ITO/cam (indiyum katkılı kalay oksit cam) kullanılır. Elektrolit olarak ise I⁻/I₃⁻ redoks çifti yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Işığı daha fazla soğurmak için en çok kullanılan duyarlaştırıcılar rutenyum bipiridin kompleksleridir.

BDGP'leri ile ilgili araştırmalar genellikle duyarlaştırıcı olarak kullanılan yeni boyaların sentezi, fotoanot için farklı özellik ve karakteristik yapıları sahip yarıiletkenlerin geliştirilmesi ve çeşitli kombinasyonlarda karşıt elektrotlar hazırlanmasını kapsamaktadır (Narayan 2012, Grätzel 2001). BDGP'lerinde duyarlaştırıcı olarak kullanılan boyalar güneş ışığını absorblayarak elektrik enerjisine dönüştürmede en önemli görevi gören bileşendir. BDGP'lerinin temel bir bileşeni de ışık emiliminde, elektron taşınmasında ve yük toplanmasında önemli bir rol oynayan fotoanottur. Çeşitli yarı iletken malzemeler arasında TiO₂ mükemmel kimyasal kararlılığı, geniş bant aralığı enerjisi (anataz fazı için ~3,2 eV), yüksek elektron hareketliliği ve yaygın olarak kullanılan boyalarla uygun enerji hizalaması nedeniyle en çok kullanılan yarıiletkenlerdir (Haider vd. 2019). TiO₂'in bu kadar çok tercih edilmesinin nedenlerinden biride boya moleküllerini yüzeyinde yüksek tutma kapasitesine sahip olmasıdır.

TiO₂ yarıiletkeninin anataz, rutil ve brookit olmak üzere üç farklı fazı bulunmaktadır (Das vd. 2016). TiO₂'in farklı fazlarının oluşumunda sentez sırasında uygulanan sıcaklığın önemi büyüktür, ancak tetragonal kristal yapıya sahip rutil fazı her sıcaklıkta az ya da çok bulunmaktadır. Anataz fazı da rutil fazı gibi tetragonal kristal yapıya sahiptir ve farklı sentez koşullarında sentezlenebilmektedir. Anataz fazı kimyasal olarak daha kararlı, boya adsorpsiyon kapasitesi ve elektron iletimi yüksek olduğu için BDGP'i uygulamalarında TiO₂'in en çok tercih edilen fazıdır. TiO₂ BDGP'leri dışında fotokatalizörler, gaz sensörleri, lityum bataryalar, vb. geniş kullanım alanına sahiptirler (Roose vd. 2015). Bir BDGP'nin verimliliği, TiO₂ filminin morfolojisi, kristallinitesi ve yüzey alanından güçlü bir şekilde etkilenir ve bu da sentez yöntemini cihaz performansında kritik bir faktör haline getirir. TiO₂ filmlerinin biriktirilmesi için sol-jel sentezi, hidrotermal büyüme ve serigrafi baskı gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemler genellikle yüksek işleme sıcaklıkları gerektirir, karmaşık üretim adımları içerir veya film düzgünlüğü ve kalınlığı üzerinde sınırlı kontrole neden olur. Buna karşılık, elektrokaplama, iyi tanımlanmış nanoyapılara ve özel özelliklere sahip TiO₂ filmleri üretmek için uygun maliyetli, ölçeklenebilir ve düşük sıcaklıklı bir alternatif olarak önemli ilgi görmüştür (Ikreedeeagh vd. 2024). TiO₂'nin elektrokaplanması, bir elektrolit çözeltisindeki öncül türlerin elektrokimyasal indirgenmesini veya oksidasyonunu içerir ve bu da doğrudan iletken alt tabakalar üzerinde TiO₂ filmlerinin oluşumuna yol açar (Byrannvand vd. 2013). Elektrokaplama yönteminin bazı avantajları bulunmaktadır. Uygulanan potansiyel, öncül konsantrasyonu ve biriktirme süresi gibi biriktirme parametrelerini ayarlayarak, TiO₂ filmlerinin yapısal özellikleri BDGP performansının optimizasyonu için geliştirilebilir. Yüksek sinterleme sıcaklıkları gerektiren diğer sentez tekniklerinin aksine, elektrokaplama nispeten düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilebilir ve bu da onu esnek alt tabakalarla uyumlu ve uygun maliyetli bir üretim haline getirir. Güçlü yapışma ve doğrudan büyüme: İletken alt tabakalar (örneğin, FTO veya ITO kaplı cam) üzerinde TiO₂ filmlerinin doğrudan oluşumu, gelişmiş mekanik stabilite ve gelişmiş elektron taşıma özellikleri sağlar. Elektrokaplama, elektron hareketliliğini, ışık saçılımını ve boya yükleme kapasitesini daha da artırabilen katkı maddeleri veya nanoyapılı modifikasyonların dahil edilmesine olanak tanır (Lee vd. 2021). Bu avantajlara rağmen, BDGP uygulamaları için TiO₂'nin elektrokaplanması, istenen kristal fazı (anataz) elde etmek için biriktirme koşulları üzerinde hassas kontrol ihtiyacı, ara titanyum hidroksit türlerinin varlığı ve iletkenliği ve yüzey özelliklerini artırmak için biriktirme

sonrası işlemler dahil olmak üzere çeşitli zorluklar sunar. Son araştırma çabaları, elektrokaplanmış TiO₂ filmlerinin yapısal ve elektronik özelliklerini iyileştirmek için elektrolit bileşimini, pH kontrolünü ve tavlama stratejilerini optimize etmeye odaklanmıştır.

Nguyen vd. (2007)'e göre BDGP'leri için TiO₂/SiO₂ nanokompozit filmler üretmek üzere yeni bir katodik elektrokaplama yöntemi geliştirmişlerdir. Optimum SiO₂/TiO₂ mol oranı 0,53 olan bir kaplama, elektrot performansını önemli ölçüde artırarak saf TiO₂ elektrotlarına kıyasla fotoakım yoğunluğunda yaklaşık %20'lik bir artış ve fotovoltaj verimliliğinde yaklaşık %30'luk bir iyileştirme sağlamıştır. SiO₂, TiO₂/elektrolit arayüzünde yük rekombinasyonunu azaltan bir enerji bariyeri görevi görmüştür. Bu etki, elektrokaplama filmlere özgü gerçekleşmiş ve fiziksel olarak karıştırılmış TiO₂/SiO₂ filmlerinde gözlenmemiştir. Bu yöntem, elektrot elektrokimyasal özelliklerinin ince ayarlanması için umut verici bir yaklaşım sağlamıştır. An vd. (2005)'e göre çatlaksız, saydam olmayan anataz TiO₂ filmlerini, TiCl₄ ve TiCl₃ öncüllerini kullanarak indirgeyici döngüsel voltametri yöntemi ile SnO₂:F cam üzerine başarıyla elektrokaplamışlar ve katyonik yüzey aktif madde CTAB film kalınlığını arttırmıştır. CTAB, özellikle TiCl₄ ile film kalınlığını artırarak elektrostatik itmeyi azaltmış ve üstün BDGP performansına yol açmıştır. Noniyonik Triton X-100 ve anyonik SDS yüzey aktif maddeleri böyle bir etki göstermemiştir. Daha kalın TiO₂ filmleri fotoakım yoğunluğunu ve enerji dönüşüm verimliliğini iyileştirmiştir. Yang vd. (2019)'e göre altın nanopartiküllerini (Au NP'ler), elektrokaplama yoluyla demet-siz ve demet içeren TiO₂ nanotüp dizilerine başarıyla dahil edilmişler ve Ru boyası (N719) ile 530 nm'de etkileşimlerini optimize etmişlerdir. Au NP'li BDGP'ler, plazmonik ve şarj etkileri nedeniyle gelişmiş performans göstermiştir. 30 saniyelik optimum biriktirme süresi, kısa devre akım yoğunluğunu (J_{sc}) en üst düzeye çıkarmış ve Au NP'siz %5,66'ya kıyasla %6,80'lik en yüksek PCE'ye ulaşılmıştır. Ancak, aşırı biriktirme (40 saniye) rekombinasyona ve verimlilik kaybına yol açmıştır. Bu yöntem, çeşitli güneş hücreleri, su ayırma, sensörler, piller ve katalizörler için umut verici uygulamalar göstermektedir.

Bu çalışma, BDGP uygulamaları için TiO₂'nin elektrokaplanmasını uygulanabilir bir yaklaşım olarak keşfetmeyi, film morfolojisi, kristalinite ve fotovoltaj performans üzerindeki biriktirme parametrelerinin etkisini analiz etmeyi amaçlamaktadır. Bulgular, yeni nesil BDGP'leri için düşük maliyetli, daha verimli ve ölçeklenebilir üretim tekniklerinin devam eden gelişimine katkıda bulunacaktır.

2. Gereç ve Yöntemler

2.1. Güneş Pilleri İçin Yarıiletken TiO₂'in Elektrokaplama ile FTO Cam Üzerine Kaplanması

Çizelge 1'de elektrokaplama yöntemiyle hazırlanan fotoanotlara ait deney şartları verilmiştir. Çizelge 1'de verilen şartlarda hazırlanan TiO₂ NP'ler FTO cam alt tabaka üzerine elektrokaplama tekniği ile kaplanarak BDGP'lerinde kullanılacak fotoanotlar hazırlanmıştır. Bunun için ekte farklı konsantrasyonlarda hazırlanmış olan Ti çözeltileri ile Pt tel karşıt elektrot ve Ag/AgCl referans elektrot ile 2,5x2,5 cm'lik FTO cam alt tabakalara elektrokaplama ile TiO₂'ler kaplanmıştır. FTO cam alt tabakalar sırasıyla ultra saf su, metanol ve aseton'da 15 dk ultrasonik banyoda temizlenme işlemini tabi tutuldu. Elektrokaplama işlemlerinde potansiyel uygulanması amacıyla GW marka GPS-3030 güç kaynağı kullanılmıştır. Hazırlanan bu elektrokaplama-larda uygulanan potansiyel, kullanılan elektrolit ve titanyum konsantrasyonu değiştirilerek optimum elektrokaplama şartları belirlenmiştir. Elektrokaplama ile hazırlanan örnekler 450°C'de 2 saat sinterlenmiştir. Sinterlenen fotoanotlar Panalytical marka Empyrean model XRD ve FEI Quanta FEG 450 model FE-SEM teknikleri ile karakterize edilmişlerdir.

Çizelge 1. Elektrokaplama yöntemiyle hazırlanan fotoanotların deney şartları.

Örnek Kodu	Titanyum konsantrasyonu	Elektrolit	Uygulanan Potansiyel
Ti-1	5 mM	KCl	-1.0 V
Ti-2	5 mM	NaCl	-1.0 V
Ti-3	5 mM	LiClO ₄	-1.0 V
Ti-4	5 mM	KCl	-1.2 V
Ti-5	5 mM	NaCl	-1.2 V
Ti-6	5 mM	LiClO ₄	-1.2 V
Ti-7	10 mM	KCl	-1.0 V
Ti-8	10 mM	NaCl	-1.0 V
Ti-9	10 mM	LiClO ₄	-1.0 V
Ti-10	10 mM	KCl	-1.2 V
Ti-11	10 mM	NaCl	-1.2 V
Ti-12	10 mM	LiClO ₄	-1.2 V

2.2. Güneş Pillerinin Oluşturulması

Boyaların adsorpsiyonu için elektrokaplama ile hazırlanan fotoanotlar uygun çözücülerde çözülerek hazırlanan 10 mM

N719 boya çözeltilerine daldırılarak 24 saat süreyle karanlık ortamda bekletilmiştir. Elektrolit çözeltisi 0,5 M 4-tersiyer butil piridin 0,1 M LiI ve 0,05 M I₂'in asetonitrilde çözünmesi ile hazırlanmıştır. Katot (karşıt) elektrodu hazırlamak için hekza kloro platinat (IV) hekza hidrat (H₂PtCl₆.6H₂O) 2-prapanol içerisinde çözülerek 5 mM çözeltisi hazırlanarak FTO-cam alt tabakalar üzerine damlatılarak kaplanmıştır. Hazırlanan katot elektrotları 450°C'de sıcaklıkta 1 saat sinterlenmiştir. Fotoanot ve katotların kaplanmış yüzeyleri birbirine getirilerek sandviç şeklinde yerleştirilmiştir. Elektrotlar klipsler yardımıyla sabitlenerek elektrolit çözeltisi aralarına enjekte edilmiştir. Ayrıca katot ve anot elektrotları arasındaki elektrolitin sızdırmazlıklarının önlenmesi amacıyla, Solaronix marka Meltonix model (60µm) sızdırmazlık contaları eklenmiştir. Hazırlanan örnek BDGP'yi Şekil 1'de gösterilmiştir.

2.3. Güneş Pillerinin Karakterizasyonu

Hazırlanan BDGP'leri için Sciencetech marka SF300B model AM 1.5 Xe solar simülatör altında Keithley marka 2450 model source-metre ile akım yoğunluğu-voltaj (J-V) eğrileri oluşturulmuş ve bu eğrilerden verim değerleri hesaplanmıştır. BDGP'lerinin açık devre voltajı (V_{oc}), kısa-devre akım yoğunluğu (J_{sc}), maksimum akım (I_m) ve maksimum voltaj (V_m) değerleri belirlenmiş bu değerler kullanılarak eşitlik (1-3) ile maksimum güç (P_m), doluluk faktörü (FF) ve dönüşüm verimleri (%η) hesaplanmıştır (Çakar ve Özacar 2016).

$$P_m = I_m \times V_m \quad (1)$$

$$FF = \frac{J_m \times V_m}{J_{sc} \times V_{oc}} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{J_{sc} \times V_{oc} \times FF}{P_{in}} \quad (3)$$

Ayrıca hazırlanan BDGP'lerinin solar simülatör altında elektrokimyasal empedans analizleri yapılarak direnç değerleri ölçülerek bu direnç değerlerinden iletkenlikleri belirlenmiş ve BDGP'lerin verimleri üzerine etkileri incelenmiştir. Elde edilen empedans eğrileri yardımıyla elektron ömrü (τ_e) (4) değerleri Zview programı vasıtasıyla hesaplanarak hücrelerin verim özellikleri ile birlikte tartışılmıştır.

$$\tau_e = \frac{1}{2\pi f_{max}} \quad (4)$$

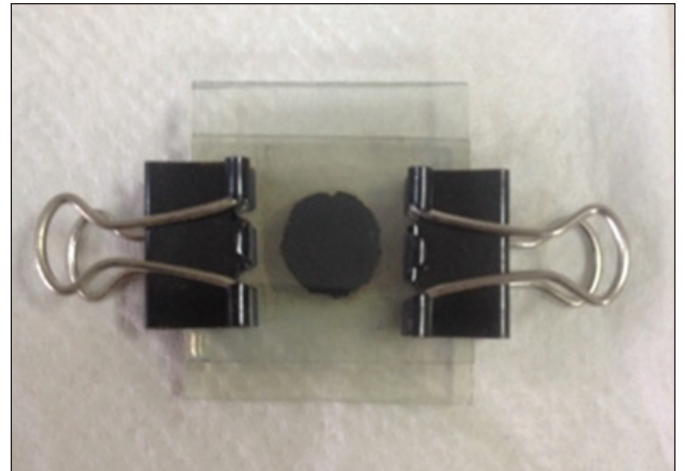
3. Bulgular ve Tartışma

3.1. TiO₂ Fotoanotların Karakterizasyonu

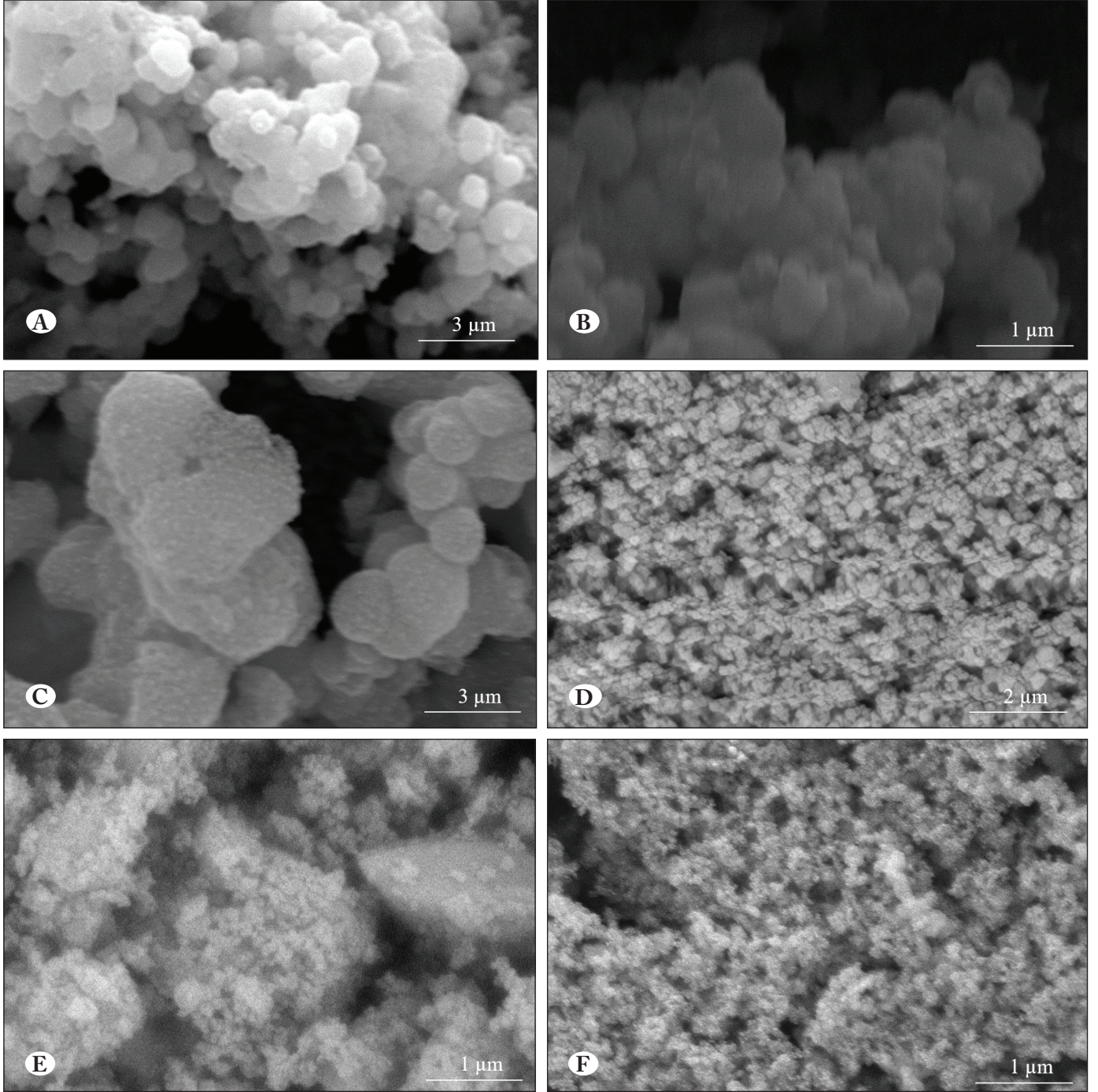
Elektrokaplama işlemiyle FTO cam üzerine kaplanan TiO₂'lerin yüzey özelliklerinin incelenmesi, ortalama ta-

necik boyutlarının belirlenmesi amacıyla FE-SEM karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Farklı deneysel şartlarda elektrokaplama yöntemiyle geliştirilen fotoanotların yüzey özellikleri boyanın tutunma kapasiteleri ve güneş pillerinin verimleri ile doğrudan ilişkilidir. Elektrokaplama işleminde farklı elektrolitler ve farklı potansiyellerde uygulamalar gerçekleştirilerek elde edilen fotoanot örneklerinin FE-SEM karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Elektrokaplama işleminde uygulanan farklı çalışma şartları Çizelge 1'de verilmiştir. Elektrokaplama ile üretilen TiO₂ NP'lerin FE-SEM görüntüleri Şekil 2 ve 3'te gösterilmiştir. Özellikle uygulanan potansiyel arttıkça TiO₂ NP'lerin morfolojisinde bozulmalar görülmektedir. Ayrıca incelenen elektrolitler içerisinde LiClO₄ elektroliti kullanıldığında daha homojen partiküller içeren yapıların sentezlendikleri görülmektedir. Sentezlenen örneklerin ortalama tanecik büyüklükleri 200-50 nm aralığındadır.

Elektrokaplama yöntemiyle sentezlenen TiO₂ nanopartiküllerin XRD desenleri Şekil 4'de gösterilmiştir. Şekil 4'deki XRD desenlerinden sentezlenen TiO₂ nanopartiküllerinin anataz fazı gösterdikleri ve ICDS: 98 015-4601 pattern numarası (Said vd. 2018) ile uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir. FTO alt tabakalar üzerine kaplanarak sentezlenen TiO₂ yapılarının XRD patternlerinde FTO örneklerine ait pikler de görülmektedir. XRD patternlerindeki piklerin yayvanlaşmasıyla piklerin maksimumunun yarısında tam genişlik (MYTG) değerlerinde artış meydana gelmektedir. MYTG değeri arttıkça malzemenin kristal büyüklüğü azalmaktadır (Mustapha vd. 2021). Genel olarak kristal büyüklükleri ile kristal gerilmesi değerleri ters orantılı değişmektedir (Bindu ve Thomas 2014). Sentezlenen TiO₂ örneklerinin XRD yöntemiyle elde edilen birim hücreye ait



Şekil 1. Hazırlanan örnek BDGP.

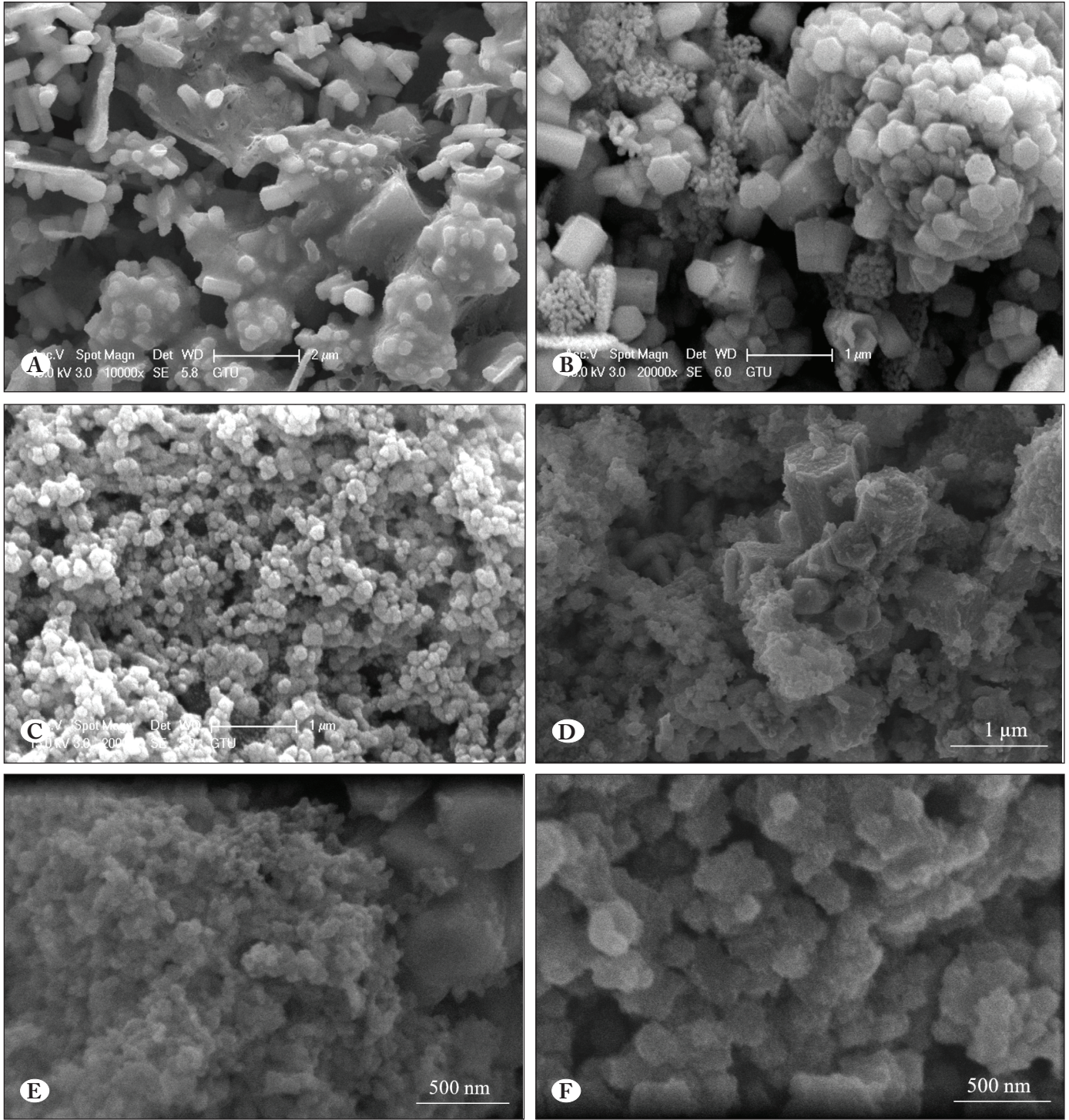


Şekil 2. 5 mM konsantrasyonunda titanyum kullanılarak elektrokaplama yöntemiyle hazırlanmış örnekler için FE-SEM görüntüleri. A) Ti-1, B) Ti-2, C) Ti-3, D) Ti-4, E) Ti-5 ve F) Ti-6.

parametreler, kristal boyutları ve kristal gerilmesi değerleri Çizelge 2’de verilmiştir. Kristal boyutları (5) ve kristal gerilmesi (6) değerlerinin belirlenmesinde Debye Scherrer eşitlikleri kullanılmıştır (Torun ve Çakar 2018).

$$D = \frac{0,89\lambda}{\beta \cos \theta} \quad \beta = \beta_{göz} - \beta_{std} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{\beta}{4 \tan \theta} \quad \beta = \sqrt{(\beta_{göz}^2 - \beta_{std}^2)} \quad (6)$$



Şekil 3. 10 mM konsantrasyonunda titanyum kullanılarak elektrokaplama yöntemiyle hazırlanmış örneklere ait FE-SEM görüntüleri. A) Ti-7, B) Ti-8, C) Ti-9, D) Ti-10, E) Ti-11 ve F) Ti-12

Tanecik boyutu verileri ile XRD patternlerinden değişik metotlarla hesaplanan kristal boyutu değerleri birbirleri ile uyumlu bulunmuştur. Sentezlenen TiO₂ nanopartiküllerinin SEM görüntülerinden sıkı paket şeklinde nanogözenekli yapıda oldukları görülmektedir. XRD sonuçlarından sentezlenen TiO₂ nanopartiküllerinin safsızlık içermedikleri gözlenmiştir. XRD patternlerinden ve FE-SEM görüntülerinden elde edilen bilgiler ışığında 10 mM lık ve -1.0 V potansiyel altında elektrokaplanan TiO₂ NP'lerinin (Ti-7, Ti-8 ve Ti-9) BDGP'lerinde kullanılması kararlaştırılmıştır.

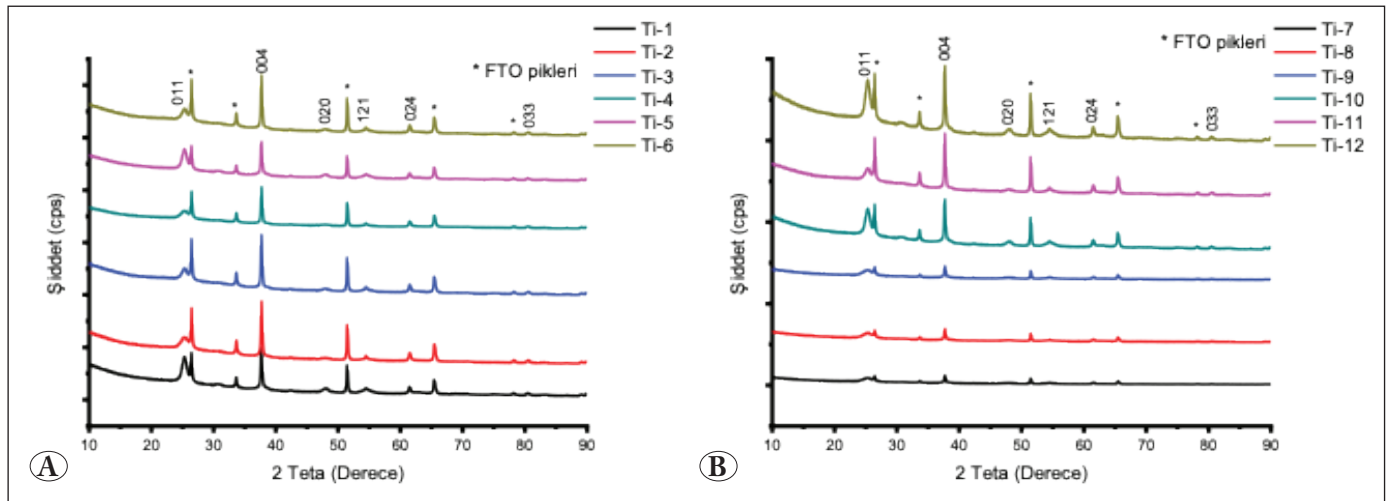
Hazırlanan Ti-7, Ti-8 ve Ti-9 kodlu fotoanot örneklerinin FTIR spektrumları Şekil 5'de verilmiştir. FTIR spektrumlarından görüleceği üzere TiO₂ fotoanotların 1100 cm⁻¹ ve 550 cm⁻¹'de gözlenen pikler Ti-O geriliminden kaynak-

lanmaktadır (Budiman vd. 2019, Tripathi vd. 2013). FTIR spektrumlarından elde edilen bilgiler ile sentezlenen elektrokaplanmış TiO₂ fotoanot yapılarında elektrokaplama yönteminde kullanılan Cl, Li, K, Na gibi elementlerin kalıntılarının bulunmadığı gözlenmektedir. Sentezlenen fotoanot yapılarında sadece Ti-O ve Ti-O-Ti etkileşimlerinden kaynaklanan pikler görülmektedir. Bu sinterleme işlemi ile Ti-O bağının oluşumu ve diğer yapıların ortamdaki uzaklaşmasını açıklamaktadır. Hazırlanan fotoanotlarda sentez esnasında kullanılan organik yapılara ait herhangi bir safsızlığın bulunmadığı FTIR spektrumlarından görülmektedir.

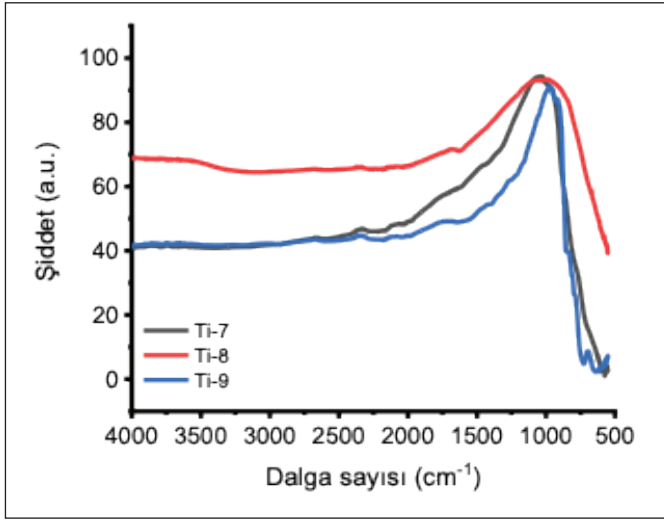
Hazırlanan Ti-7, Ti-8 ve Ti-9 kodlu fotoanotların difüze reflektans spektrumları (DRS) ve Kubelka Munk eğrileri Şekil 6A ve B'de görülmektedir. Difüze reflektans spekt-

Çizelge 2. Elektrokaplama yöntemiyle hazırlanan fotoanotlardaki TiO₂ kristal hücrelerinin özellikleri.

Örnek Kodu	a (Å)	c (Å)	V (Å ³)	Kristal boyutu (nm)	Kristal gerilmesi (%)
Ti-1	3.806	9.405	136.0	72.41	3.45
Ti-2	3.805	9.402	136.0	70.32	3.39
Ti-3	3.804	9.398	135.9	68.39	3.24
Ti-4	3.800	9.395	135.7	85.46	3.08
Ti-5	3.792	9.392	135.5	80.73	2.96
Ti-6	3.803	9.397	135.7	78.27	3.91
Ti-7	3.801	9.393	135.6	68.19	3.71
Ti-8	3.798	9.388	135.4	65.20	3.81
Ti-9	3.797	9.382	135.2	61.14	3.49
Ti-10	3.793	9.378	135.2	88.45	3.37
Ti-11	3.796	9.385	135.2	86.32	3.27
Ti-12	3.797	9.391	135.4	84.11	3.29



Şekil 4. Elektrokaplama yöntemiyle sentezlenen TiO₂ fotoanotların XRD desenleri.



Şekil 5. Seçilen elektrokaplama yöntemiyle sentezlenen TiO₂ fotoanotların FTIR spektumları.

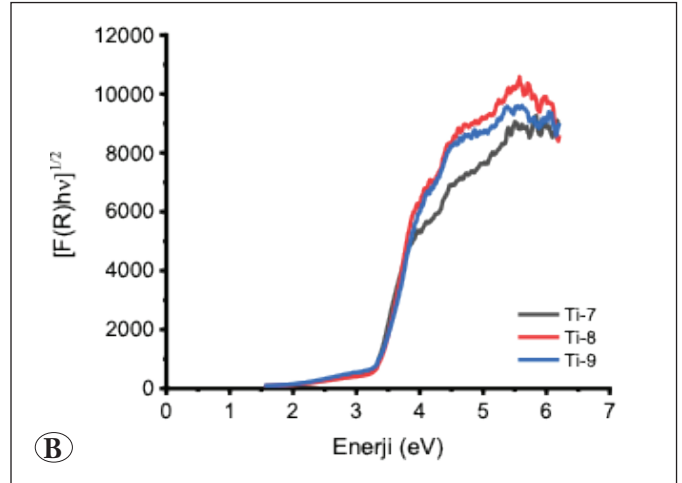
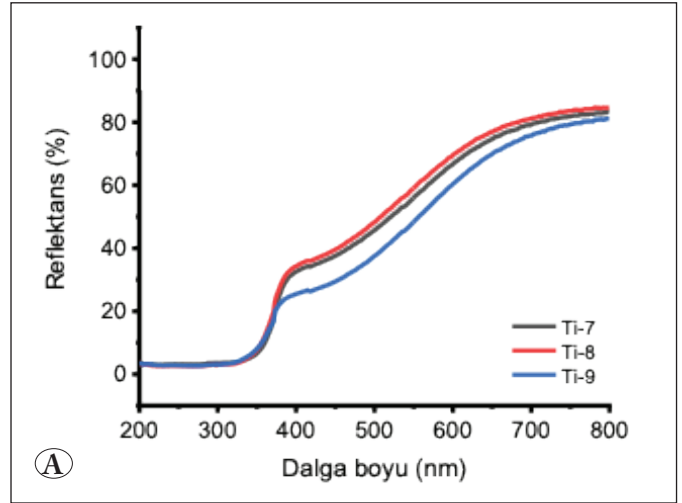
rumlarından elde edilen reflektans değerleri yardımıyla aşağıdaki eşitliklerden Kubelka-Munk fonksiyonu (7) kullanılarak hazırlanan fotoanotların bant aralık değerleri (8) belirlenmiştir (Das vd. 2016).

$$F(R) = \frac{(1-R)^2}{2R} = \frac{K}{s} \quad (7)$$

$$K = A(E - E_g)^n \quad (8)$$

eşitliklerde R, K, s sırasıyla reflektans değeri, absorpsiyon katsayısı ve saçılma katsayısını ifade etmektedir. Eşitlik 7 Kubelka Munk fonksiyonunu ifade etmektedir. Kubelka Munk fonksiyonu absorpsiyon katsayısı ile ilişkilidir. Absorpsiyon katsayısı ise bir yarıiletkenin bant aralığını belirlenmesinde Eşitlik 8 kullanılmaktadır. Yarıiletkenlerin reflektans değerlerinin belirlenmesi ile $F[Rh\nu]^{1/2}$ 'nin $h\nu$ 'ye karşı çizilen grafiğinde oluşan eğrilerin x eksenini kestiği nokta yarıiletkenin bant aralığını ifade eder. K değerlerinin hesaplanması ile Eşitlik 8'de ki denklem ile bant aralıkları belirlenmektedir. Hesaplanan bant aralıkları Ti-7, Ti-8 ve Ti-9 için sırasıyla 3.17, 3.18 ve 3.18 eV olarak belirlenmiştir. Literatürde anataz TiO₂ için belirlenen bant aralığı 3.2 eV'dur (Haider vd. 2019). Hesaplanan bant aralıkları ile literatürdeki bant aralığı arasındaki küçük farkın Ti-O titreşim ve gerilimlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Sentezlenen fotoanot TiO₂'lerin bant aralıkları literatürle uyum içerisinde.

BDGP'lerinin verim değerleri incelendiğinde en yüksek verimin LiClO₄ ortamında elektrokaplama işlemiyle üretilen fotoanotların kullanıldığı BDGP'leri ile elde edilmiştir. Benzer şekilde LiClO₄ ile hazırlanan fotoanotların beklen-



Şekil 6. Seçilen elektrokaplama yöntemiyle sentezlenen TiO₂ fotoanotların DRS (A) ve Kubelka-Munk (B) eğrileri.

diği üzere direnç değerlerinin de düşük çıktığı gözlenmiştir. Bunun temel nedeni olarak kullanılan Li⁺ iyonunun Na⁺ ve K⁺ iyonlarına göre daha düşük çapa sahip olması nedeniyle XRD verilerinden hesaplanan kristal boyutlarından görüldüğü üzere TiO₂ nanopartiküllerinin daha düşük boyutlarda olmasına sebep olduğu ve bu düşük boyutlu TiO₂ yüzeylerinde daha fazla boya tutunması nedeniyle de daha yüksek verim ve daha düşük direnç değerleri gözlemlendiği düşünülmektedir. Hazırlanan BDGP'lerinin J-V eğrileri ile Nyquist ve Bode grafikleri Şekil 7'te gösterilmiş ve bu grafiklerden hesaplanan dönüşüm verimleri ve direnç özellikleri Çizelge 3 ve Çizelge 4'de verilmiştir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

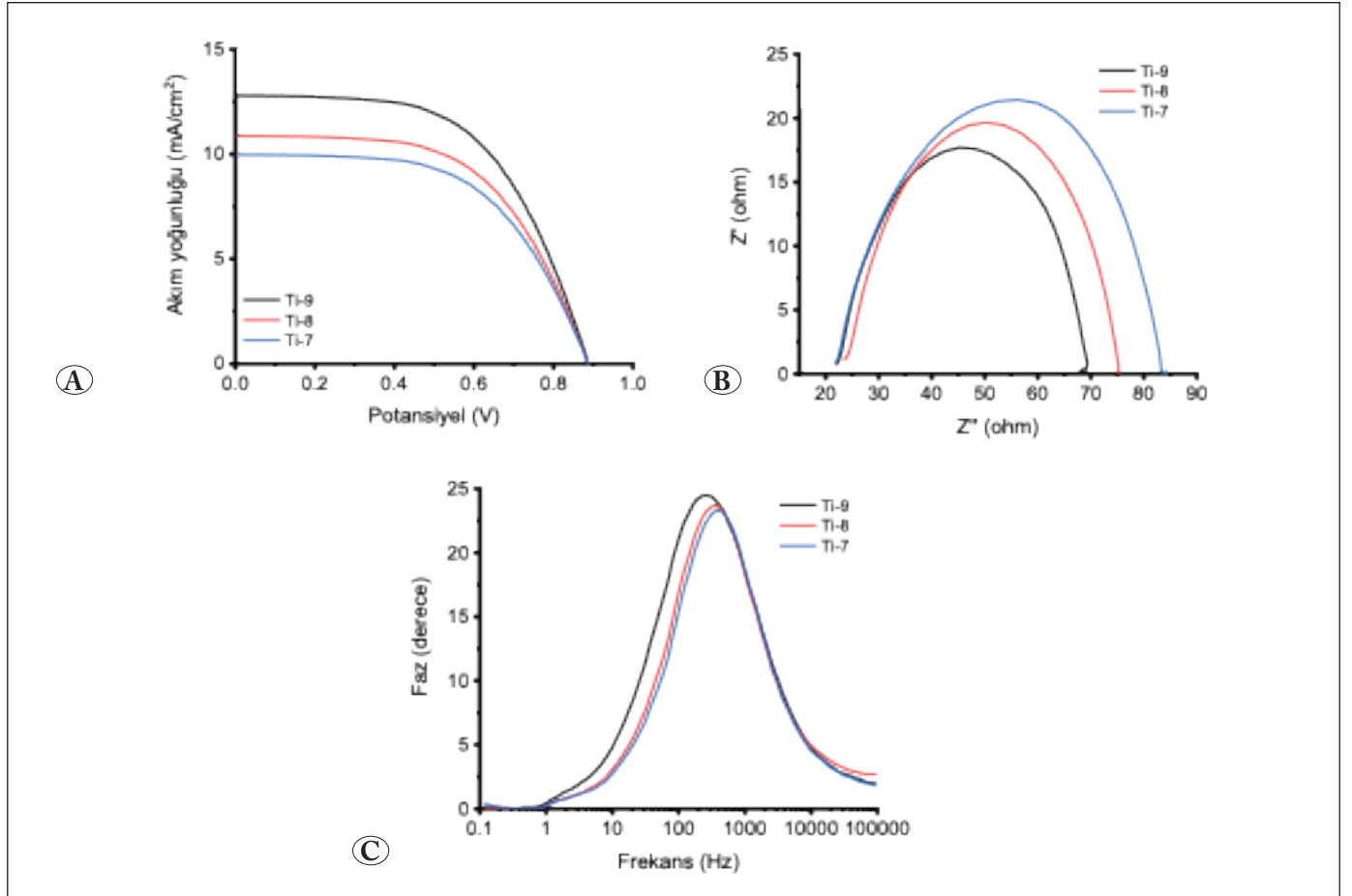
Gerçekleştirilen bu çalışmada farklı şartlarda elektrokaplama tekniği ile hazırlanan FTO/TiO₂ fotoanotların kullanıldığı BDGP'lerinin verim değerleri ve direnç özellikleri in-

Çizelge 3. Hazırlanan BDGP'lerinin güneş hücresi özellikleri.

Örnek Kodu	Boya Tutanma Kapasitesi ($\times 10^{-8}$ M)	Akım Yoğunluğu J_{SC} (mA/cm ²)	Açık Devre Potansiyeli (V_{OC})	Doluluk Faktörü (FF)	Verim η (%)
Ti-9	10.42	12.81	0.88	0.55	6.20
Ti-8	8.63	10.88	0.89	0.56	5.42
Ti-7	7.95	10.02	0.89	0.55	4.90

Çizelge 4. Hazırlanan BDGP'lerinin empedans özellikleri.

Örnek Kodu	R_s (ohm)	R_{CT1} (ohm)	R_{CT2} (ohm)	f_{max} (Hz)	τ_e (ms)
Ti-9	22.18	0.65	46.48	256.46	0.621
Ti-8	23.29	0.85	51.11	355.82	0.447
Ti-7	21.95	0.93	60.31	402.39	0.396



Şekil 7. Hazırlanan güneş pillerinin karakterizasyonları A) J-V eğrileri, B) Nyquist ve C) Bode grafikleri.

celenmiştir. Hazırlanan TiO₂ fotoanotlar XRD ve FE-SEM teknikleri ile karakterize edilmiştir. Özellikle elektrokaplama işleminde elektrolit olarak LiClO₄ kullanıldığında NaCl ve KCl elektrolitlerine göre FTO/cam yüzeyine kaplanan TiO₂ nanopartiküllerinin daha düşük tanecik boyutlarına sahip olduğu gözlenmiştir. Tanecik boyutları BDGP'lerinin verim değerlerini ve empedans özelliklerini de etkilemiştir. Elektrokaplama yöntemiyle gerçekleştirilen TiO₂ fotoanotların uygulanan potansiyel değişimine göre homojenliğin bozulduğu FE-SEM görüntülerinden görülmektedir. Ayrıca XRD sonuçlarında yüksek voltaj uygulaması ile (-1.2V) daha keskin piklerin (kristal boyutunun artması) olduğu gözlenmektedir. En yüksek verim değeri Ti-9 kodlu -1.0V altında LiClO₄ elektrolit ortamında 10mM Ti başlangıç malzemesi ile kaplanan fotoanotun kullanıldığı BDGP'li için elde edilmiş ve bu pilin verimi %6.20 olarak belirlenmiştir. Elektrokaplama ile farklı morfolojik özelliklere sahip TiO₂ nanopartikülleri sentezlenmiş ve karakterizasyonları gerçekleştirilerek farklı güneş pili özellikleri gözlenmiştir. Sonuçlar, BDGP'lerinin dönüşüm verimliliğinin, elektrokaplama ile uygun maliyetli bir şekilde hazırlanan fotoanotlar ile iyileştirilebileceğini göstermekte, sürdürülebilir ve verimli enerji çözümlerinin potansiyelini vurgulamaktadır. Yapılan bu çalışma ile elde edilen sonuçlar ışığında düşük maliyetli TiO₂ fotoanotların üretimi ve farklı morfolojik özelliklere sahip yapıların elde edilmesiyle hem güneş pillerinde hem de UV absorpsiyon gerektiren yapılarda kullanımına yönelik çalışmalar gerçekleştirilebilir. Elde edilen bu fotoanot yapıları UV koruma, TiO₂'in antimikrobiyal özelliği, UV katalizli boya giderimi gibi alanlarda kullanılabilir.

Teşekkür: Bu çalışma Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir (Proje No: 2021-72118496-04, 2023-72118496-01, 2022-72118496-03, 2022-72118496-02, 2024-72118496-07.)

Yazar katkısı: Soner ÇAKAR: çalışmayı planlamış, tasarlamış, çalışma hakkında verileri toplamış ve çalışmanın analizlerini yaparak makaleyi yazmıştır.

Etik kurul onayı: Etik Kurul onayına gerek yoktur.

5. Kaynaklar

- An, HJ., Jang SR., Vittal R., Lee, J., Kim, KJ., 2005. Cationic Surfactant Promoted Reductive Electrodeposition of Nanocrystalline Anatase TiO₂ for Application to Dye-Sensitized Solar Cells. *Electrochim. Acta* 50(13): 2713–18. Doi:10.1016/j.electacta.2004.11.017.
- Bindu, P., Thomas, S., 2014. Estimation of Lattice Strain in ZnO Nanoparticles: X-Ray Peak Profile Analysis. *J. Theor. Appl. Phys.* 8(4): 123–34. Doi:10.1007/s40094-014-0141-9.
- Budiman, H., Wibowo, R., Zuas, O., Gunlazuardi, J., 2019. Photo-Electrochemical Properties of TiO₂ Nanotube Arrays: Effect of Different Polishing Method of Ti Substrate Prior to Anodization in Fluoride-H₂O₂-Containing Electrolyte. *J. Phys. Conf. Ser.* 1153(1): 012073. Doi:10.1088/1742-6596/1153/1/012073.
- Byranvand, M., Kharat, MAN., Fatholahi, L., Beiranvand, ZM., 2013. A Review on Synthesis of Nano-TiO₂ via Different Methods. *J. Nanostruct.* 3(1): 1–9. Doi:10.7508/jns.2013.01.001.
- Çakar, S., Özacar, M., 2016. Fe-Tannic Acid Complex Dye as Photo Sensitizer for Different Morphological ZnO Based DSSCs. *Spectrochim. Acta A. Mol. Biomol. Spectrosc.* 163: 79–88. Doi:10.1016/j.saa.2016.03.031.
- Das, TK., Ilaiyaraja, P., Mocherla PSV., Bhalerao, GM., Sudakar, C., 2016. Influence of Surface Disorder, Oxygen Defects and Bandgap in TiO₂ Nanostructures on the Photovoltaic Properties of Dye Sensitized Solar Cells. *Sol. Energy Mater.* 144: 194–209. Doi:10.1016/j.solmat.2015.08.036.
- Devadiga, D., Selvakumar M., Shetty P., Santosh, MS., 2021. Recent Progress in Dye Sensitized Solar Cell Materials and Photo-Supercapacitors: A Review. *J. Power Sources* 493: 229698. Doi:10.1016/j.jpowsour.2021.229698.
- Grätzel, M., 2001. Photoelectrochemical Cells. *Nature* 414(6861): 338–344. Doi:10.1038/35104607.
- Hagfeldt, A., Boschloo, G., Sun, L., Kloo, L., Pettersson, H., 2010. Dye-Sensitized Solar Cells. *Chem. Rev.* 110: 6595–6663. Doi:10.1002/chem.201101923.
- Haider, AJ., Zainab NJ., Al-Hussaini, IHM., 2019. Review on: Titanium Dioxide Applications. *Energy Procedia* 157: 17–29. Doi:10.1016/j.egypro.2018.11.159.
- Ikreedeeagh, RR., Hossen MA., Tahir, M., Aziz, AA., 2024. A Comprehensive Review on Anodic TiO₂ Nanotube Arrays (TNTAs) and Their Composite Photocatalysts for Environmental and Energy Applications: Fundamentals, Recent Advances and Applications. *Coord. Chem. Rev.* 499: 215495. Doi:10.1016/j.ccr.2023.215495.
- Lee, SA., Yang, JW., Choi, S., Jang, HW., 2021. Nanoscale Electrodeposition: Dimension Control and 3D Conformality. *Exploration* 1(3): 20210012. Doi:10.1002/EXP.20210012.
- Mustapha, S., Tijani, JO., Ndamitso, MM., Abdulkareem, AS., Shuaib, DT., Amigun, AT., Abubakar. HL., 2021. Facile Synthesis and Characterization of TiO₂ Nanoparticles: X-Ray Peak Profile Analysis Using Williamson–Hall and Debye–Scherrer Methods. *Int. Nano Lett.* 11(3): 241–61. Doi:10.1007/s40089-021-00338-w.

- Narayan, MR., 2012.** Review : Dye Sensitized Solar Cells Based on Natural Photosensitizers. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16(1): 208–15. Doi:10.1016/j.rser.2011.07.148.
- Nguyen, TV., Lee, HC., Khan, MA., Yang, OB., 2007.** Electrodeposition of TiO₂/SiO₂ Nanocomposite for Dye-Sensitized Solar Cell. *Sol. Energy* 81(4): 529–34. Doi:10.1016/j.solener.2006.07.008.
- O'Regan, B., Grätzel, M., 1991.** A Low-Cost, High-Efficiency Solar Cell Based on Dye-Sensitized Colloidal TiO₂ Films. *Nature* 353(6346): 737–40.
- Roose, B., Pathak, S., Steiner, U., 2015.** Doping of TiO₂ for Sensitized Solar Cells. *Chem. Soc. Rev.* 44(22): 8326–8349. Doi:10.1039/C5CS00352K.
- Said, M., Damsyik, N., Sahdan, MZ., Nayan, N., Saim, H., Adriyanto, F., Bakri, AS., Morsin, M., 2018.** Difference in Structural and Chemical Properties of Sol-Gel Spin Coated Al Doped TiO₂, y Doped TiO₂ and Gd Doped TiO₂ Based on Trivalent Dopants. *RSC Advances* 8(52): 29686–97. Doi:10.1039/c8ra03950j.
- Torun, HO., Çakar, S., 2018.** Thermal Characterization of Er-Doped and Er–Gd Co-Doped Ceria-Based Electrolyte Materials for SOFC. *J. Therm. Anal. Calorim.* 133(3): 1233–39. Doi:10.1007/s10973-018-7189-8.
- Tripathi, AK., Singh MK., Mathpal, MC., Mishra, SK., Agarwal, A., 2013.** Study of Structural Transformation in TiO₂ Nanoparticles and Its Optical Properties. *J. Alloys Compd.* 549: 114–20. Doi:10.1016/j.jallcom.2012.09.012.
- Yang, HY., Lee, SH., Kim, HM., Pham, XH., Hahm, E., Kang, EJ., Kim, TH., Ha, Y., Jun, BH., Rho, VY., 2019.** Plasmonic and Charging Effects in Dye-Sensitized Solar Cells with Au Nanoparticles Incorporated into the Channels of Freestanding TiO₂ Nanotube Arrays by an Electrodeposition Method. *J. Ind. Eng. Chem.* 80: 311–17. Doi:10.1016/j.jiec.2019.08.009.



Time Series and Machine Learning Methods for Estimating Missing Meteorological Data: The Western Black Sea Basin Case

Eksik Meteorolojik Verilerin Zaman Serisi ve Makine Öğrenmesi Yöntemleri Kullanılarak Tahmin Edilmesi: Batı Karadeniz Havzası Örneği

Yusuf Kaya^{1*} , Berna Aksoy² , İsmail Hakkı Özölçer²

¹Istanbul Beykent University, Faculty of Engineering Architecture, Department of Civil Engineering, Istanbul, Türkiye

²Zonguldak Bülent Ecevit University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Zonguldak, Türkiye

Abstract

The development of artificial intelligence applications is rapidly advancing today. It enables making existing data meaningful through a wide range of applications. This increases the importance of data for all artificial intelligence subfields. The accuracy, continuity and meaningfulness of data are very important for training and testing the models. Discontinuities or errors are likely to occur in data obtained from long-term physical measurements. It is inevitable for meteorological data, which are highly influenced by external factors to have gaps. Mentioned situation causes negative effects on the analysis reliability of meteorological data, which plays a significant role in climate change and hydrological modelling. Within the scope of this study, monthly precipitation measurements of meteorological observation stations in the city centers of seven different provinces in the Western Black Sea basin were examined. The gaps in the monthly rainfall data measured between 2000 and 2023 were estimated using time series, statistical and machine learning approaches. In the modelling process, ARIMA, SARIMA, ARIMAX, XGBOOST, and mean imputation methods were employed. The analyses revealed that SARIMA models, which consider seasonal effects, provided more consistent results, as demonstrated by performance metrics. The completed data form the basis for advanced drought analysis. Thus, impact of deviations due to data loss in future drought analyses is minimized.

Keywords: Missing data, precipitation, sarima, time series.

Öz

Yapay zekâ uygulamalarının gelişimi günümüzde hızla devam etmektedir. Geniş bir uygulama yelpazesıyla elde var olan verinin anlamlı hale getirilmesini sağlamaktadır. Bu durum tüm yapay zekâ alt grupları için verinin önemini arttırmaktadır. Verinin doğruluğu, sürekliliği ve anlamlılığı modellerin eğitilmesi ve test edilmesi için oldukça önemlidir. Uzun süreli fiziksel ölçümlere dayalı elde edilen verilerde süreksizlikler veya hatalar olması olasıdır. Dışsal faktörlerin oldukça etkili olduğu meteorolojik verilerde eksikler olması kaçınılmazdır. Bu durum iklim değişikliği ve hidrolojik modellemelerde önemli bir yer tutan meteorolojik verilerin analiz güvenliğini negatif etkilemesine neden olmaktadır. Bu çalışma kapsamında Batı Karadeniz havzasında yer alan yedi farklı ilin şehir merkezlerindeki meteorolojik gözlem istasyon aylık yağış ölçümleri incelenmiştir. Ölçümleri yapılan 2000-2023 yıllarındaki aylık yağış verilerindeki eksiklikler zaman serisi, istatistiksel ve makine öğrenmesi yaklaşımları ile tahmin edilmeye çalışılmıştır. Modellemelerde ARIMA, SARIMA, ARIMAX, XGBOOST ve ortalama ile tamamlama yöntemleri kullanılmıştır. Yapılan analizlerde mevsimsel etkileri dikkate alan SARIMA modellerinin daha uyumlu sonuçlar verdiği performans metrikleri ile ortaya konulmuştur. Tamamlanan veriler ileri düzey kuraklık analizlerine altlık oluşturmaktadır. Böylece ileride yapılacak kuraklık analizlerinin veri kayıplarından kaynaklı sapmalardan etkilenmesi minimize edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eksik veri, sarima, yağış, zaman serisi

*Corresponding author: yusufkaya@beykent.edu.tr

Yusuf Kaya orcid.org/0000-0002-0923-2217

Berna Aksoy orcid.org/0000-0001-6925-1594

İsmail Hakkı Özölçer orcid.org/0000-0002-8404-0522



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

1. Introduction

Due to growing demands for the Artificial Intelligence (AI) applications and their wide use, data is becoming more and more significant in the modern era. Data is the primary component of AI applications since these systems need vast volumes of data for testing, training and ongoing self-improvement procedures in order to function properly and efficiently. AI models are unable to learn and perform as intended in the absence of comprehensive and continuous data. The continuity and significance of the data collection are just as crucial as the gathering of information that belongs to any entity. The data gathered by long-term physical measurements and observations very certainly contains flaws, inaccuracies and discontinuities. The elimination of these shortcomings is crucial.

1.1. Literature Review

There are various methods in the literature for completing the measured data. These methods have differentiated with the methodological approaches and have taken their current final form. The studies for completing missing data, which started with statistical methods based on the mean and median values of the data, were followed by correlation-based regression methods, time series models, machine learning-based methods, deep learning and hybrid methods. The

studies for completing the missing data are given in Table 1 according to the time structure.

About %30 of the 30-year rainfall data has missing values. Both statistical methods (averaging, multiple linear regression, normal ratio, and linear interpolation) and artificial intelligence (Support Vector Regression, Neural Network) are employed to estimate missing data (Wangwongchai et al, 2023). Statistical methods have yielded good results at some points because mentioned methods are simple and understandable. 19 years precipitation data used for making hybrid Artificial Neural Networks models (Waqas et al, 2024). According to performance metrics (MAE, RMSE and R^2) Long-Short Term Memory Recurrent Neural Network model have high accuracy.

Autoregressive integrated moving average (ARIMA) and seasonal autoregressive integrated moving average (SARIMA) models were used for estimating surface runoff over an extended period of time (Valipour, 2015). It was demonstrated that SARIMA models produced superior results with a relative error of less than 5%. Using time series, the observation data is identified required for precipitation estimation (Valipour, 2012). According to the findings of the error analysis (R^2), time series models performed better in semiarid climates. SARIMA models are used to estimate

Table 1. Studies in literature.

Authors	Year	Article	Method	Aim
Schafer and Graham	2002	Missing Data: Our View of the State of the Art	Mean and Median	For the completion of missing data
Dempster et al.	1977	Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm	Expectation-Maximization (EM)	Introduction to the EM Algorithm
García-Laencina et al.	2009	K nearest neighbours with mutual information for simultaneous classification and missing data imputation	K-Nearest Neighbors (KNN)	Effectiveness of the KNN Method in Missing Data Imputation
Stekloven and Bühlmann	2012	MissForest—Non-parametric Missing Value Imputation for Mixed-type Data	Random Forest	Introduces MissForest based on Random Forest
Vincent et al.	2008	Denoising Autoencoders: Learning Useful Representations in a Deep Network with a Local Denoising Criterion	Autoencoders	Missing data imputation with the relevant method
Wangwongchai et al.	2023	Imputation of missing daily rainfall data; A comparison between artificial intelligence and statistical techniques	Support Vector Regression and Statistical Techniques (Arithmetic Averaging)	Comparing Method Performances

monsoon time series over a 14-year span (Dabral and Murry, 2017). The ARIMA model reflected the climate change model, according to a study done in the Las Vegas area (Huntra and Keener, 2017).

There are seven city center meteorological stations spread throughout seven provinces in the Western Black Sea region that provide monthly average precipitation data from January 2020 to December 2023. These precipitation data have a number of shortcomings. These shortcomings could have been brought on by things like malfunctioning measurement equipment, shifting the station's position, etc.

To ensure continuity in monthly rainfall data, the four methods listed above are used to fill in the missing data within parameters of this study. Average completion, time series models (ARIMA, SARIMA, and ARIMAX), and machine learning techniques (XGBoost) were used to obtain missing data. The models that performed the best with the test data were then chosen.

Examining the research in the literature reveals that they use a single group as the primary focus. Some data groups were subjected to machine learning, while others were sub-

jected to time series, and yet others were subjected statistical evaluation techniques. There are limitations to the study where all method groups were assessed collectively. Furthermore, models were created based on a single model in the research that were reviewed. Monthly models were created for this investigation, and seasonality was assessed within each model.

2. Material and Methods

2.1. Dataset

Data from five sub-basins of the Western Black Sea basin's seven provincial meteorological observation stations were used in this investigation. In figure 1, the locations of the weather stations are displayed.

The data set identification of these observation stations is as stated in Table 2.

The analyses used data from seven different precipitation stations from January 2000 to December 2023 as targets and attributes. These included monthly average total precipitation, monthly relative humidity, monthly average temperature, monthly minimum temperature, monthly max-

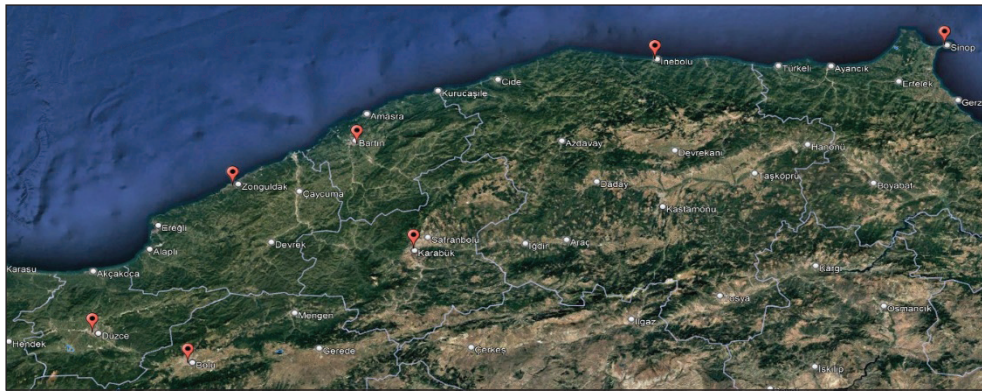


Figure 1. Locations of the meteorological stations (Google Earth).

Table 2. Western Black Sea basin.

Sub-basin	Station No	Station ID	Latitude	Longitude	Altitude
Eregli Sub-basin	17022	Zonguldak	41.4492	31.7779	123
Bartın Sub-basin	17020	Bartın	41.6248	32.3569	36
Filyos Sub-basin	17078	Karabuk	41.2044	32.6328	270
Devrakani-Sinop Sub-basin	17024	Inebolu	41.9789	33.7636	48
Filyos Alt Sub-basin	17070	Bolu	40.7328	31.6021	743
Melen Sub-basin	17072	Duzce	40.8436	31.1487	145
Devrakani-Sinop Sub-basin	17026	Sinop	42.0299	35.1544	28

imum temperature, monthly average wind speed, monthly maximum wind speed, and monthly maximum precipitation amount.

2.2. Method

To fill in the gaps, a variety of techniques based on distinct approaches in the literature have been created. The scenario shown in Table 3 arises when these techniques categorized under the five major areas.

Mean imputation, time series models (ARIMA, SARIMA, and ARIMAX), and machine learning-based techniques (XGBoost) were used in this study to fill in the missing data on the meteorological data set. The methods that produced the best outcomes based on model performance were identified. Figure 2 illustrates the models' flow diagram.

Table 3. Missing data imputation methods.

Methods	Sub-methods
Statistical Methods	Mean Imputation, Linear Regression
Correlation-Based Methods	Correlation-Based Regression
Advanced Statistical Methods	Time Series Models
Machine Learning-Based Methods	K-Nearest Neighbors (KNN), Support Vector Regression (SVR)
Deep Learning	Artificial Neural Networks (ANN), Autoencoders

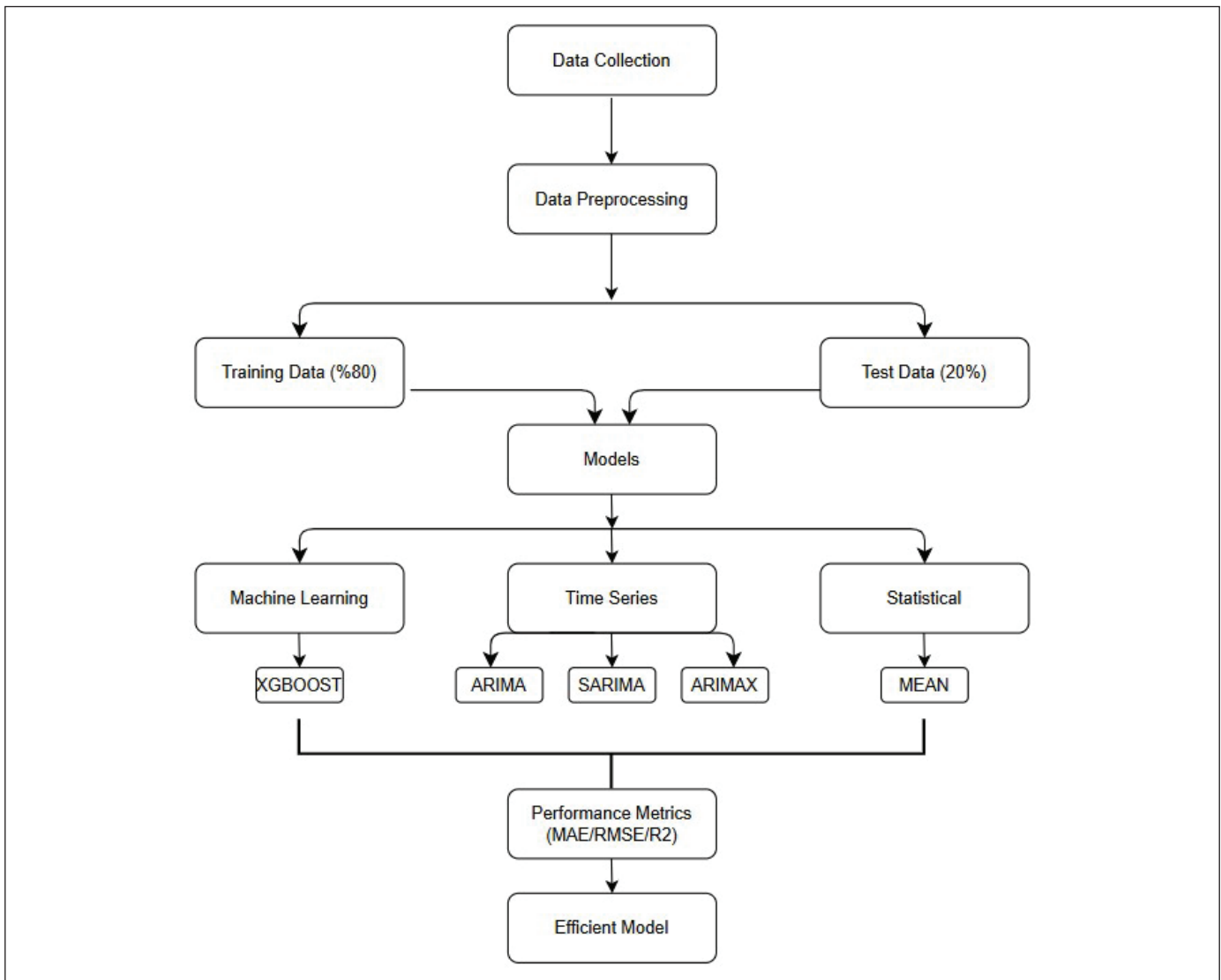


Figure 2. Model flow chart.

The purpose of employing the chosen techniques is to determine which approaches are better suited to the data's structure, how well simple and sophisticated models work, and how models alter when subjected to seasonal impacts.

2.2.1. ARIMA

This approach is a time series model that was put forth (Box and Jenkins, 1970). Without requiring outside influences on the data, it displays performance based on historical values. Stationarity of the data is required by the ARIMA model. Equation 1 provides the ARIMA model's mathematical expression (Zhang, 2003).

$$y_t = c + \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (1)$$

In equation 1, y_t is the value of the time series at time t , ε_t is the value of the error at time t (random error), ϕ is a coefficient (AR, AutoRegressive) that allows the series to be associated with past values, θ is the moving average coefficient (MA, Moving Average), and p and q are the degrees of the coefficients. The ARIMA model consist of AR (AutoRegressive), MA (Moving Average) and I (Integrated) components. AR is the relationship of the series with past values, MA is the effect of past values of error terms on the series, and I is the difference process to make the data stationary.

2.2.2. ARIMAX

Modeling the ARIMA model on only one variable has a negative effect on the results. With the ARIMAX model, multiple independent variables of the data be used (Fan et al., 2009). A generalization of the ARIMAX approach was made (Bierens, 1987). The mathematical expression of the ARIMAX model is given in equation 2.

$$(1 - \sum_s \alpha_s L^s) \Delta y_t = \mu + \sum_{s=1}^q \beta_s L^s x_t + (\sum_{s=1}^r \gamma_s L^s) e^t \quad (2)$$

Here, $\gamma_s L^s = y_{t-s}$ is expressed as $\Delta y_t = y_t - y_{t-1}$, e^t is the error, L is the lag operator; β , α , γ , μ are the model parameters. While the ARIMAX model uses the components of the ARIMA model (AR, MA, I), it also includes the exogenous variable (X) component (Sutthichaimethee and Ariyasaijakorn, 2017).

The ARIMAX model's representation of the time series is determined by the parameters that comprise its components (AR, MA, and I). Time series analysis and statistical analysis are frequently used for parameter selection. The Partial

Autocorrelation Function (PAFC) plot is analyzed when selecting the AR parameter. The ADF (Augmented Dickey-Fuller) test is used to verify stationarity while choosing the I parameter. Lastly, the Autocorrelation Function (ACF) graph is analyzed in order to determine the MA parameter. The "pmdarima" module in Python is utilized to optimize the parameters.

2.2.3. SARIMA

The SARIMA model is a product of seasonal and non-seasonal polynomials and is expressed as SARIMA (p, d, q) x (P, D, Q)_s. Here (p, d, q) and (P, D, Q) are the non-seasonal components, respectively, and s represents the seasonality period. The SARIMA model is defined by equation 3 in academic sources (Box et al., 2008; Cryer and Chan, 2008; Wang et al., 2008).

$$\phi(B^s)\phi(B)(1-B^s)^D(1-B)^d y_t = \theta(B^s)\theta(B)\varepsilon_t \quad (3)$$

In this equation, Φ and ϕ are seasonal and non-seasonal autoregression (AR) parameters, Θ and θ are seasonal and non-seasonal moving average (MA) parameters, B is the backshift operator, $B(y_t) = y_{t-1}$, $(1-B^s)^D$: S is the D -th difference of seasonality, $(1-B)^d$ is the non-seasonal d -th difference. SARIMA can be used in series that contain seasonality and are non-stationary.

2.2.4. XGBOOST

XGboost (Extreme Gradient Boosting) method was introduced by optimizing the gradient boosting method (Chen and Guestrin, 2016). The XGBoost method is widely used for complex problems and large data sets. XGboost uses the modified loss function (Equation 4 and Equation 5) (Bentéjac et al., 2021).

$$L_{xgb} = \sum_{i=1}^N L(y_i, F(x_i)) + \sum_{m=1}^M \Omega(h(x; a_m)) \quad (4)$$

$$\Omega(h(x; a_m)) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda \|w\|^2 = \gamma T + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^T w_j^2 \quad (5)$$

Here, γ denotes the minimum loss reduction required for a partition to be performed; T is the size of the tree (number of leaves); w is a vector of leaf scores; and λ controls the L_2 regularization strength. The hyperparameter γ is specific to XGBoost.

The usage differences for the time series models ARIMA, SARIMA and ARIMAX are given in Table 4.

3. Results and Discussion

ARIMA, SARIMA, ARIMAX, XGBOOST, and average usage methods were used in this study to estimate missing data for each of the seven distinct meteorological observation sites. The open source Python programming language was used for the modelling. Python programming language libraries for machine learning and embedded statistics were utilized. In the Python, Sklearn library used for machine learning model and Statmodels library used for time series models. Various measures were employed to assess the developed models' performance. Appropriate assessment measures were chosen for each model for the sake of a common evaluation, and the model with the best performance was then given further performance tests.

3.1. Basin Stations Model Comparisons

Every month, models for weather stations were developed to assess each time frame separately. There are 23 data values

per month on a monthly basis since the dataset as part of examination spans the years 2000-2023. Five test data were produced since the training data was 80% and the test data was 20%.

Table 5 shows the outcomes of five distinct method modeling conducted at Zonguldak station number 17022 for each approach. The Sarima approach produced the best estimation results for the Zonguldak station; Figure 3 shows the test estimation graph for this method.

Table 6 presents the outcomes of five distinct technique modeling conducted at Bartın station number 17020 for each approach. Figure 4 shows the model graph that produced the most consistent results.

Table 7 shows the outputs of the five distinct technique modeling conducted at Karabuk station number 17078 for each approach. Figure 5 shows the model graph that produces the most consistent results.

Table 4. Variations in usage of ARIMA, ARIMAX, and SARIMA.

Feature	ARIMA	ARIMAX	SARIMA
Model Structure	AR, I, MA	AR, I, MA, External	AR, I, MA, Seasonal
Stationarity	Necessary	Necessary	Necessary
Seasonal Data	Not Supported	Not Supported	Supported
External Variable	None	Exist	None
Advantages	Simple	Includes external Factors	Seasonality
Disadvantages	Non-seasonal	External factor identification	Complexity

Table 5. Model output of Zonguldak station.

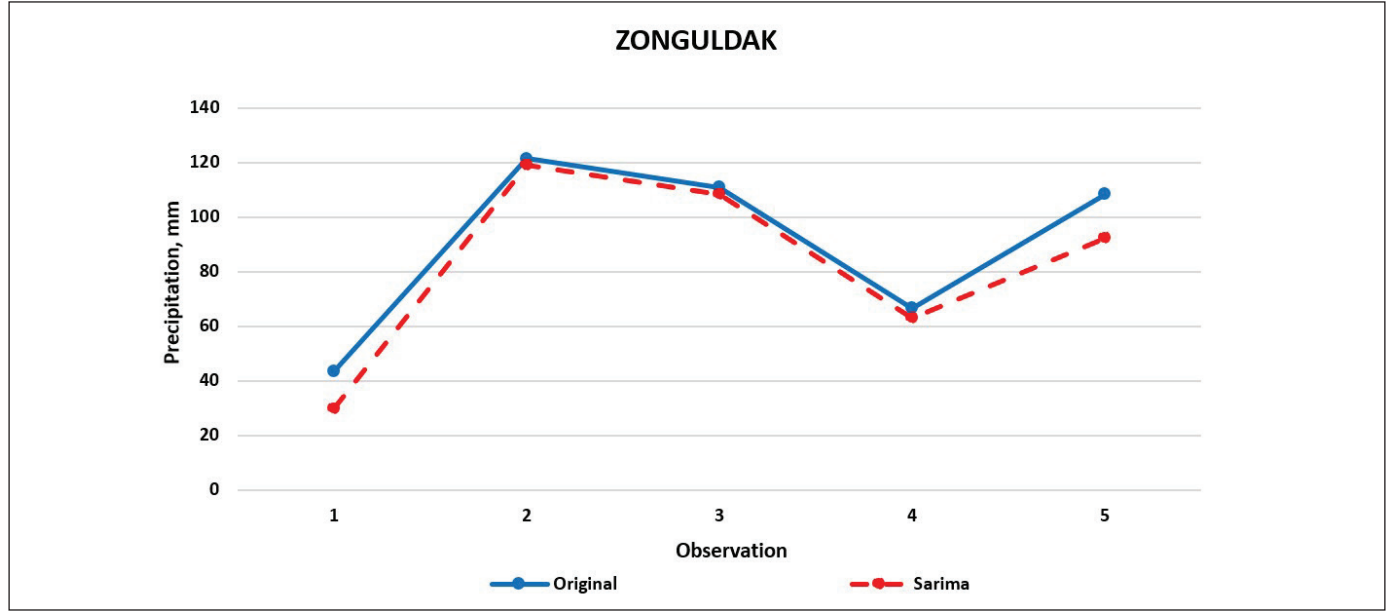
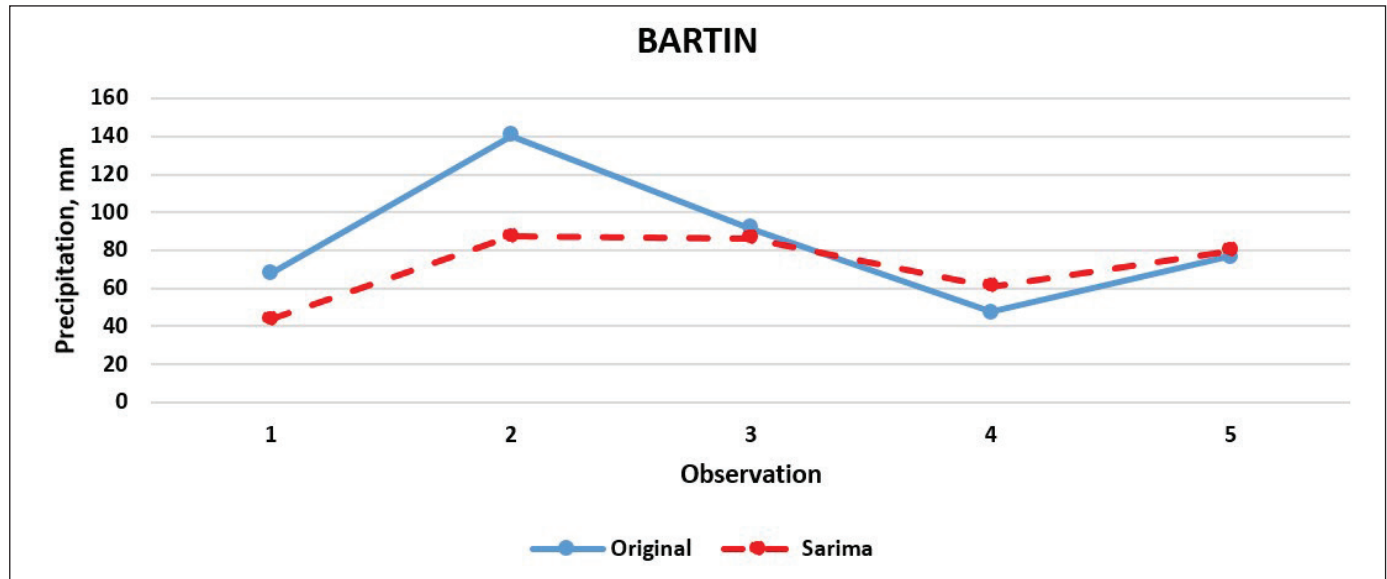
Test	Original	Arimax	Sarima	Arima	Mean	XGBoost
1	43.6	44.11	30.02	104.95	60.61	64.39
2	121.4	135.64	119.12	84.05	120.92	105.24
3	110.8	46.54	108.34	106.81	128.19	128.38
4	66.6	38.92	63	94.33	52.85	30.86
5	108.4	123.09	92.29	113.55	95.09	106.34

Table 6. Model output of Bartın station.

Test	Original	Arimax	Sarima	Arimax	Mean	XGBoost
1	67.8	83.08	43.55	86.42	56.11	41.96
2	140.4	92.83	87.16	83.36	88.87	26.91
3	91.4	165.22	86.44	85	106.67	134.74
4	47.6	25.07	61.08	87.48	62.23	19.73
5	76.8	15.21	79.81	92.76	86.35	72.19

Table 7. Model outputs of Karabuk station.

Test	Original	Arimax	Sarima	Arima	Mean	XGBoost
1	52.4	62.55	32.52	39.69	22.83	42.59
2	46.4	27.75	50.76	37.47	44.29	33.31
3	20.5	46.65	33.74	35.14	28.84	39.85
4	11.9	15.45	29.2	40.21	26.98	14.49
5	36.1	26.93	48.82	52.95	34.1	25.15

**Figure 3.** Model comparison (Zonguldak station).**Figure 4.** Model comparison (Bartın station).

The results obtained for each method as a result of five different method modeling performed at Inebolu station number 17024 are given in Table 8. The model graph giving the most consistent results in Figure 6.

ber 17024 are given in Table 8. The model graph giving the most consistent results in Figure 6.

Table 8. Model outputs of Inebolu station.

Test	Original	Arimax	Sarima	Arima	Mean	XGBoost
1	37.4	19.53	34.62	87.25	53.37	35.03
2	104.2	94.49	110.63	83.03	100.35	92.79
3	71.4	45.34	106.08	75.14	103.6	162.27
4	12.8	3.06	35.84	78.26	52.18	11.49
5	88	142.52	80.86	85.87	86.43	134.25

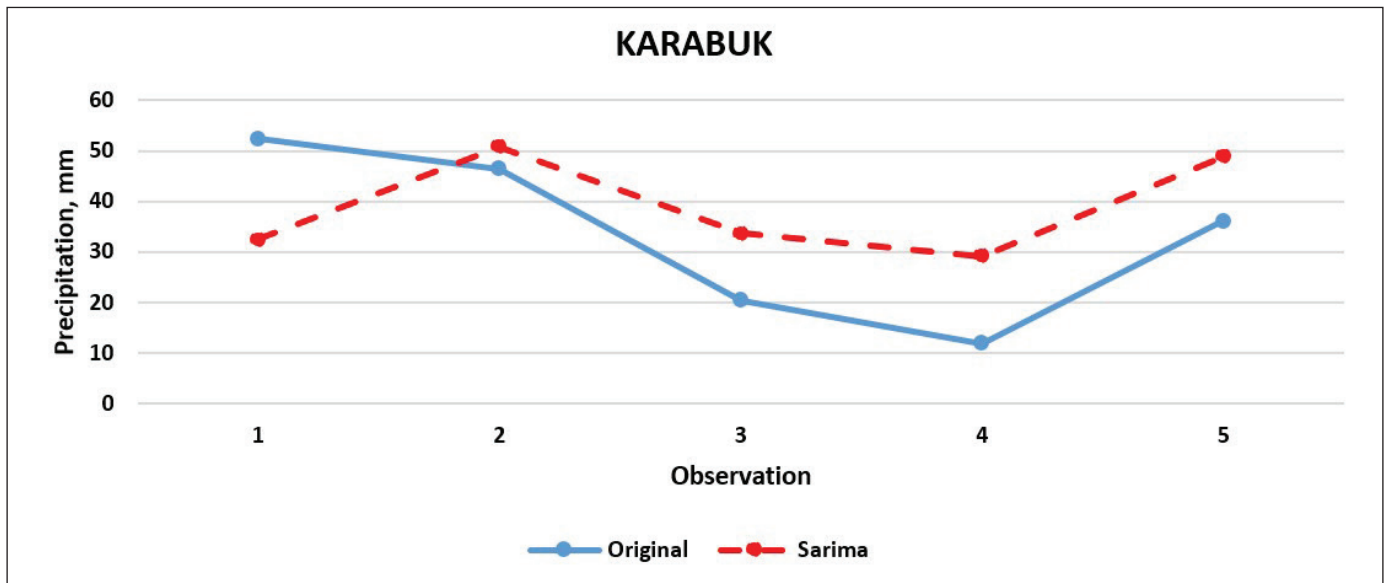


Figure 5. Model comparison (Karabuk station).

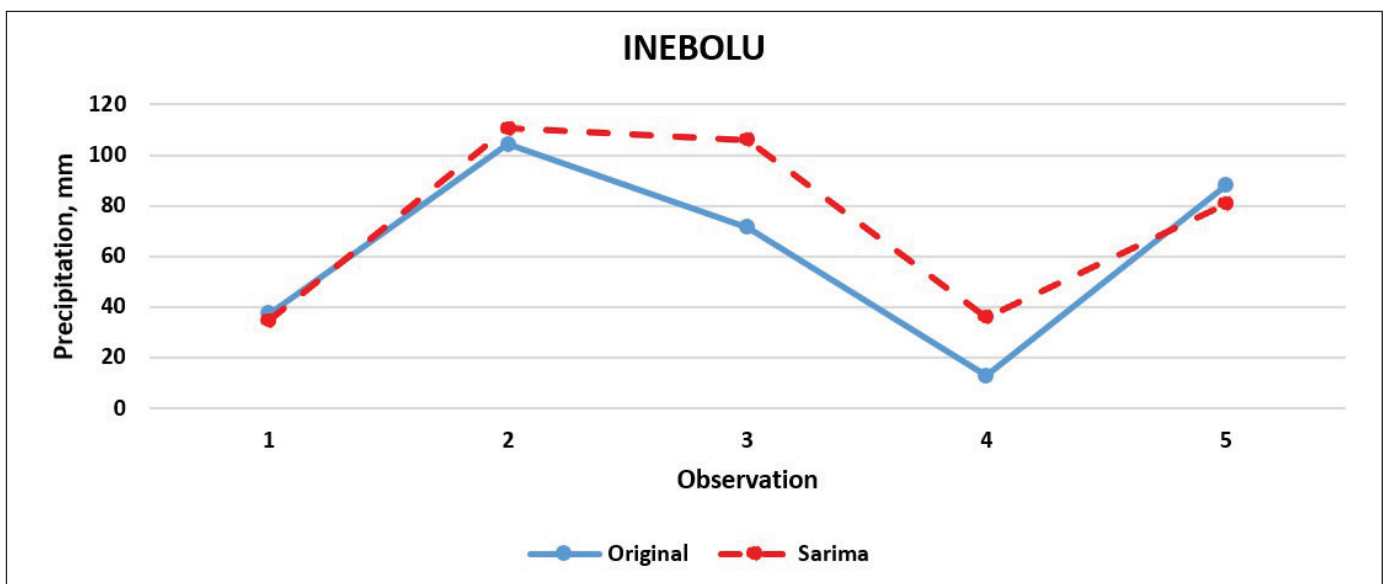


Figure 6. Model comparison (Inebolu station).

Table 9 shows the outcomes of five distinct technique modeling conducted at Bolu station number 17070 for each approach. Figure 7 shows that produces the most consistent results.

Table 10 shows the findings of five distinct methods modeling performed at Duzce station number 17072 for each approach. Figure 8 presents the model graph that produced the most consistent results.

Table 11 provides the findings of five distinct methods modeling conducted at Sinop station number 17026 for each

approach. Figure 9 shows the model graph that provides the most consistent results.

3.2. Error Distributions of Prediction Models

The Root Mean Squared (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), and R^2 error approaches were used to determine performance outputs of the models created to fill in the missing precipitation data. In table 12, performance metrics are provided for test estimation result.

Table 9. Model outputs of Bolu station.

Test	Original	Arimax	Sarima	Arima	Mean	XGBoost
1	63	32.43	48.34	46.11	51.57	62.05
2	22.5	33.38	27.79	40.36	25.45	14.89
3	3.6	89.45	25.29	41.1	35.66	24.39
4	58.1	4.89	25.16	45.38	21.48	39.49
5	29	27.3	44.62	44.45	46.19	70.68

Table 10. Model outputs of Duzce station.

Test	Original	Arimax	Sarima	Arima	Mean	XGBoost
1	32.8	31.98	30.34	69.06	61.29	81.01
2	78.4	48.84	59.36	61.21	54.63	44.06
3	22.6	109.58	53.08	64.54	66.96	44.46
4	7.8	16.57	27.6	58.4	40.92	70.41
5	34.6	11.49	63.83	67.65	72.32	26.62

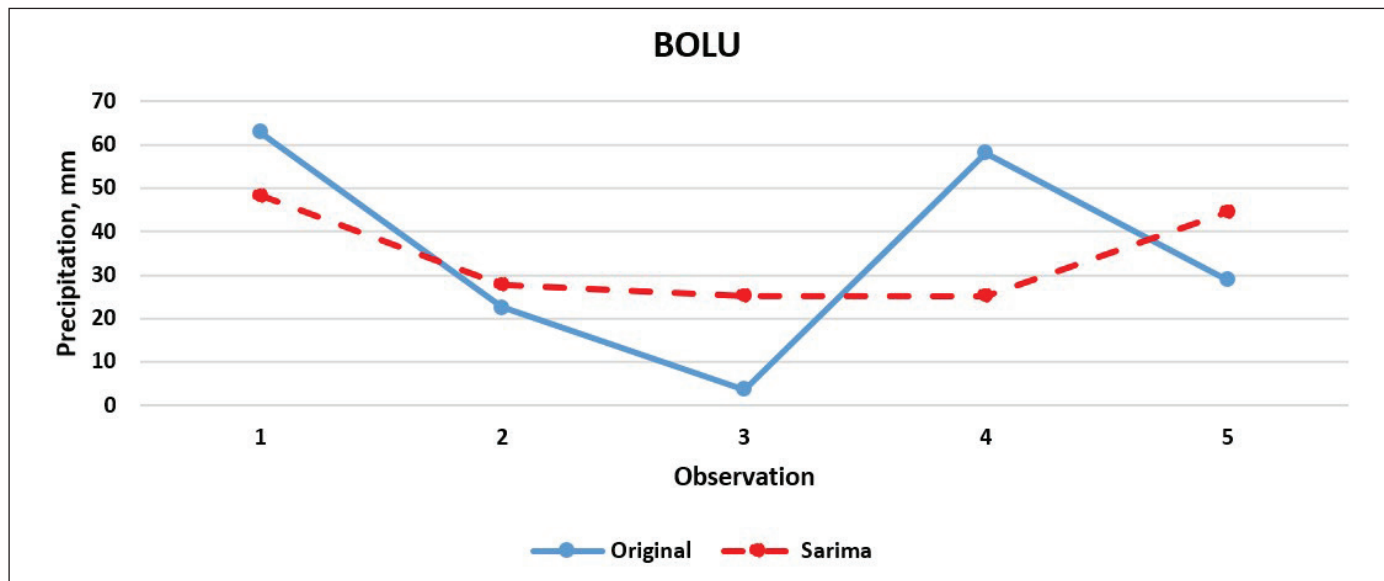


Figure 7. Model comparison (Bolu station).

Table 11. Model outputs of Sinop station.

Test	Original	Arimax	Sarima	Arima	Mean	XGBoost
1	54.8	46.36	35.25	66.59	36.86	58.82
2	106.9	27.17	79.44	57.11	71.67	28.42
3	74.6	118.04	85.78	56.94	83.85	62
4	10.6	3.71	29.36	55.38	38.58	4.66
5	40.3	63.56	49.44	71.81	48.72	52.2

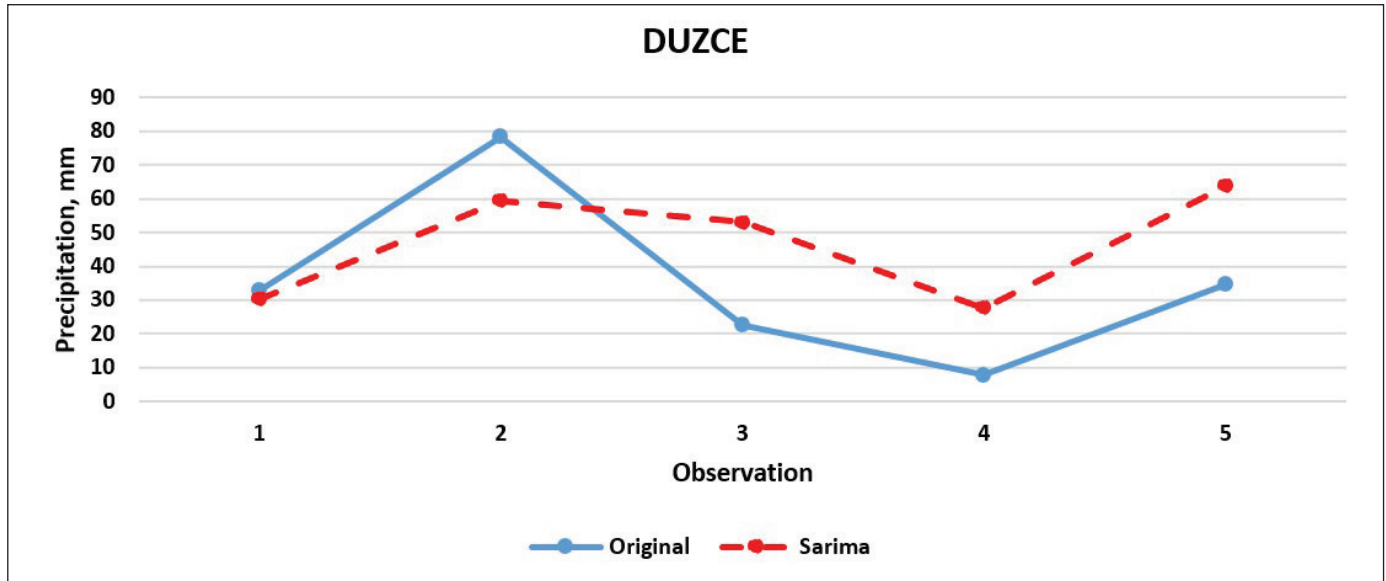
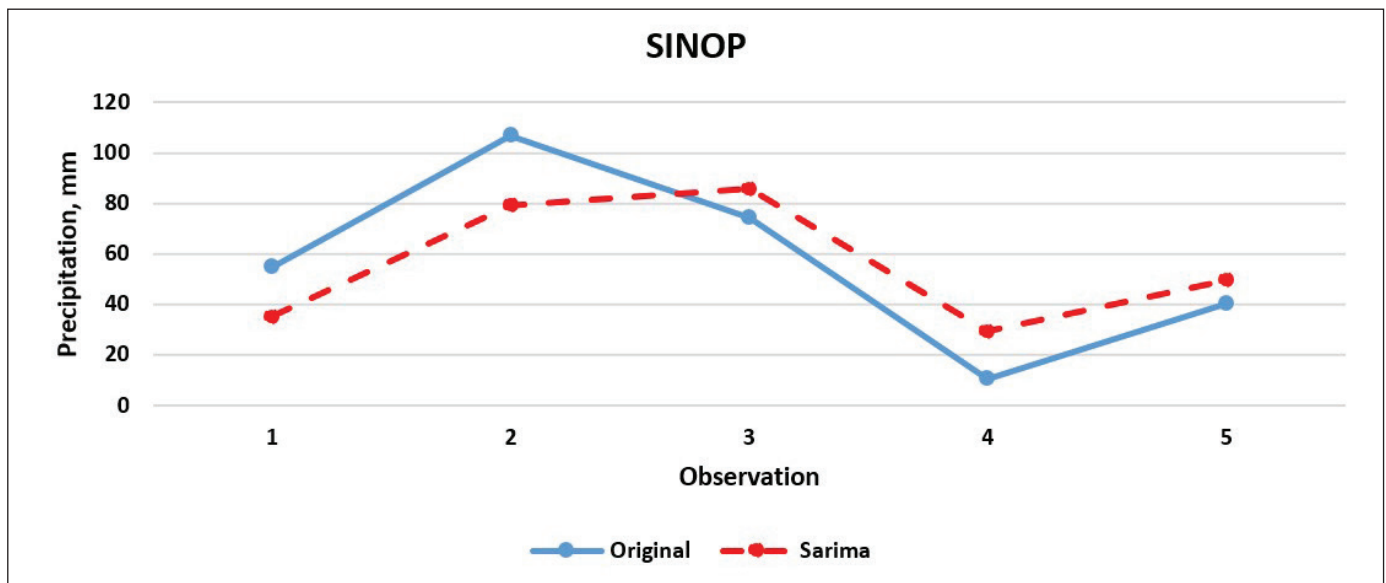
**Figure 8.** Model comparison (Duzce station).**Figure 9.** Model comparison (Sinop station).

Table 12. Performance metrics of models.

Station	Error/Model	Arimax	Arima	Sarima	Mean	XGBoost
Zonguldak	MAE	24.27	27.11	7.6	12.38	18.46
	RMSE	32.6	34.55	9.67	13.84	21.37
	R2	-0.19	-0.33	0.89	0.78	0.48
Bartın	MAE	44.15	27.58	19.78	20.53	43.03
	RMSE	49.49	33.12	26.97	25.8	56.96
	R2	-1.51	-0.12	0.25	0.31	-2.33
Karabük	MAE	13.53	16.28	13.5	11.41	11.15
	RMSE	15.69	17.55	14.49	15.36	12.39
	R2	-0.05	-0.32	0.09	-0.01	0.34
Inebolu	MAE	23.58	28.47	14.81	18.59	30.44
	RMSE	28.84	38.04	19.14	23.91	45.89
	R2	0.25	-0.29	0.67	0.48	-0.89
Bolu	MAE	36.44	20.08	18.04	20.05	17.92
	RMSE	47.44	21.95	20.21	23.67	22.69
	R2	-3.51	0.03	0.18	-0.12	-0.03
Düzce	MAE	29.84	35.8	20.2	33.49	35
	RMSE	42.54	37.47	22.55	34.24	39.91
	R2	-2.25	-1.52	0.08	-1.1	-1.86
Sinop	MAE	32.35	31.1	17.21	19.76	22.58
	RMSE	42.19	34.43	18.42	22.37	36.08
	R2	-0.7	-0.13	0.67	0.52	-0.24

According to models' error measures the Sarima model performs better overall. Sarima is the most effective technique, while averaging comes in second. The Arima approach is the least effective. Since Sarima takes seasonality into account, it is at the forefront. It performs similarly to Sarima since averaging eliminates variation. Due to the absence of data, the machine learning approach performed rather poorly because it was developed as monthly models. Training and, thus, test success were low because of limited amount of data. While time series models can use lagged values directly, for the XGBoost model, lag features may need to be defined manually to train the time dependence. The model can be supplemented by adding different lag features (e.g. by adding data from the past 3, 6, 9, 12 months as features). XGBoost models may face the problem of overfitting in small data sets. In order for XGBoost models to understand seasonal variables, the correct assignment of additional variables may be required. In addition, while differencing can be performed to ensure stationarity, seasonality can be customized by using the Fourier transform. Within the scope of

the study, feature engineering was performed while creating the XGBoost model and different attributes were used as input. In addition, lag features can be used in future studies. Box plots are used to presents the station-based evaluations of error distributions. For all stations, the average Sarima model MAE error was 15.87, the average RMSE error was 18.77, and the average R^2 error was 0.40. Figures 10 and 11 exhibit the stations' error distributions.

Examining the models' error distributions reveals that the Sarima model performs similarly at every station. The error distribution is more constrained in the Sarima model. This demonstrates how more balanced the model is. The average distribution of the errors is balanced, as indicated by the median value being near zero. It is evident that the outliers produced by Arimax and XGBoost might result in significant deviations.

When the performance metrics are analyzed on a station basis, the SARIMA time series model performed better than the other models, since it reflects seasonality best. One

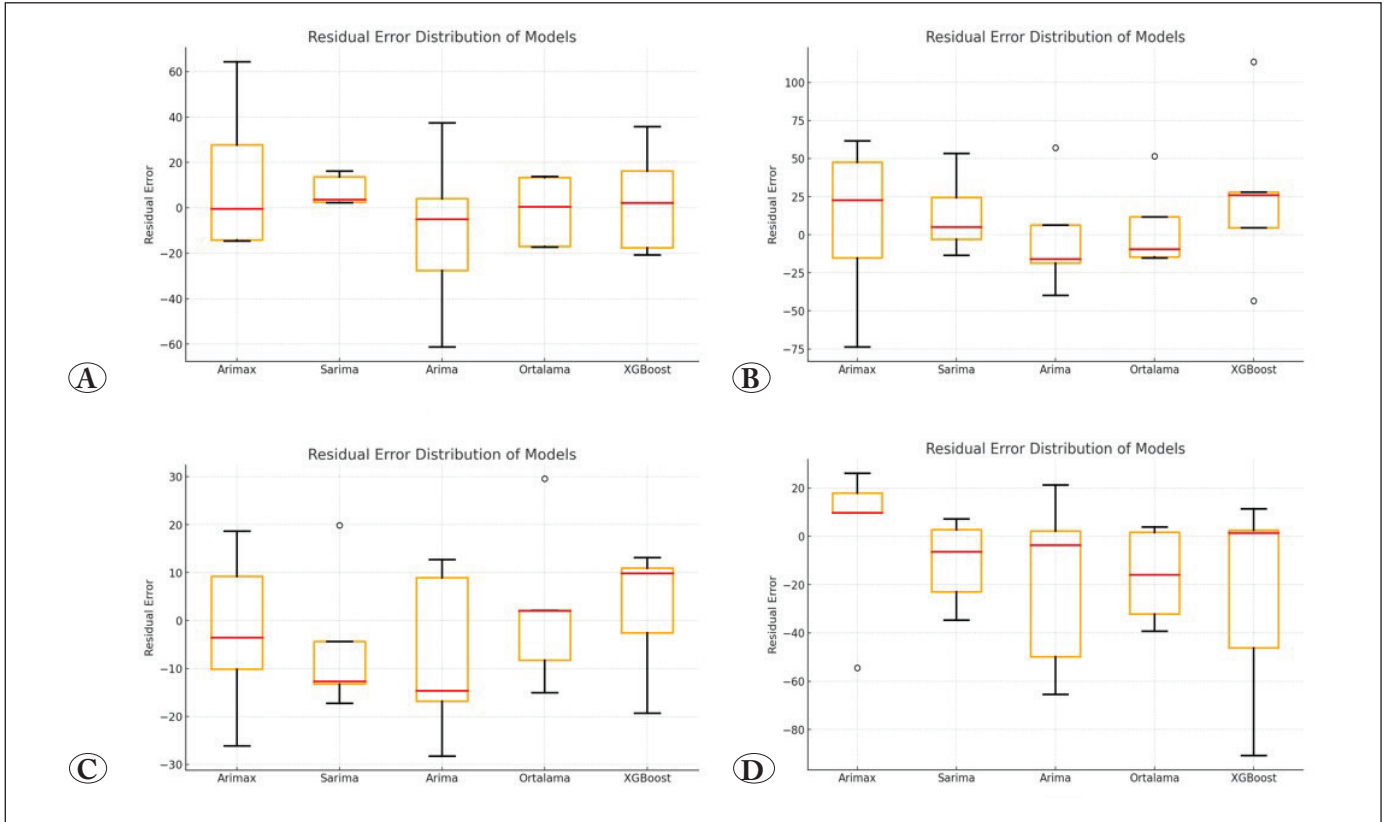


Figure 10. Error distributions; (A) Zonguldak station, (B) Bartın station, (C) Karabuk station, (D) Inebolu station.

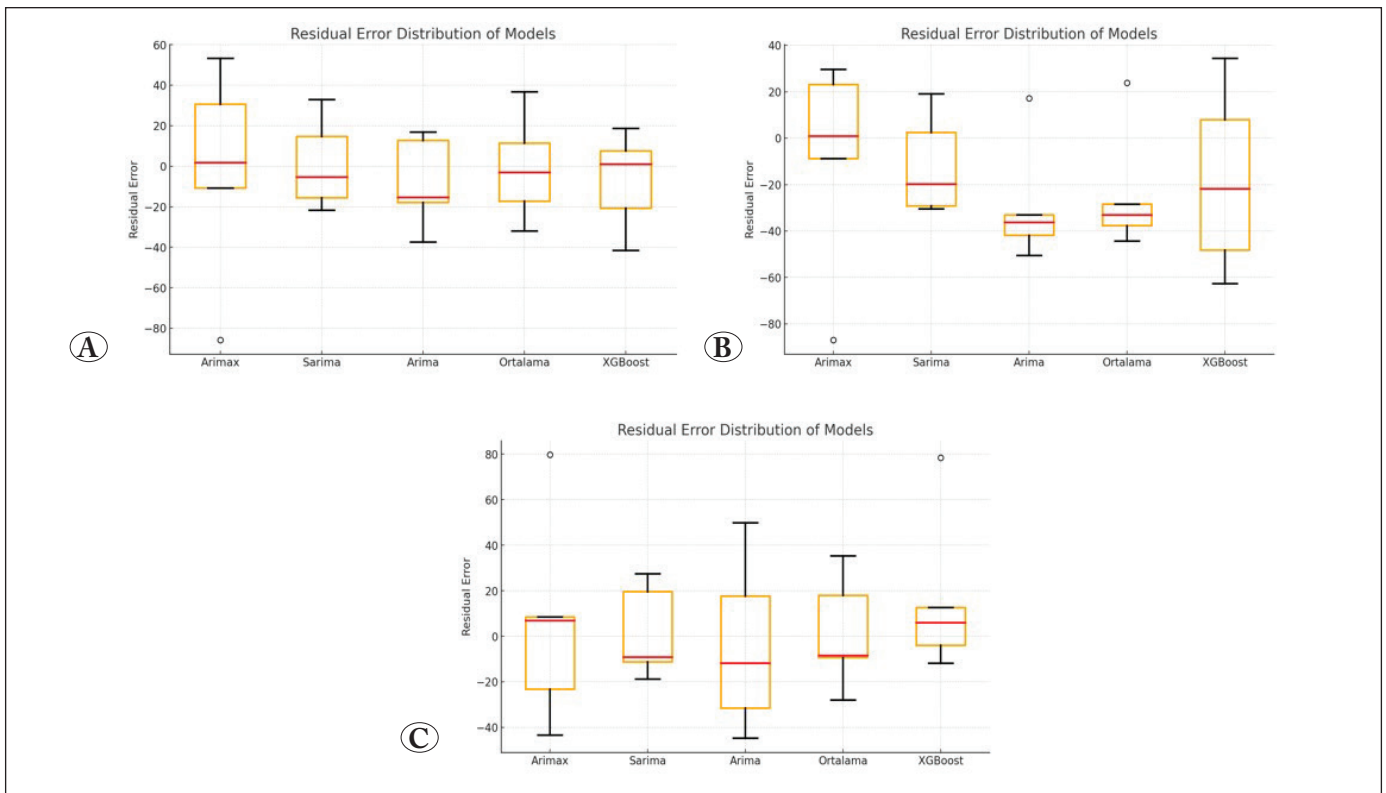


Figure 11. Error distributions; (A) Bolu station, (B) Duzce station, (C) Sinop station.

of the important reason why XGBoost models give different results on a station basis is that the distribution of missing data varies on a station basis, which means that the number of training data varies on a station basis. In addition, the regularity of precipitation patterns facilitates forecasting. This may have a reducing effect on error rates at stations with rainfall regularity. In future studies, station locations (Latitude-Longitude) can be added to the models. In machine learning models, cross-validation approaches are preferred instead of classical statistical tests. In order to evaluate models with similar approaches, common performance measures (MAE, RMSE, and R^2) are used in this study.

4. Conclusions

In this study, time series, statistical, and machine learning techniques were used to fill in the missing values in the precipitation data from 2000 to 2023 that were recorded at principal meteorological stations in the provinces that make up the western Black Sea basin. The Sarima time series approach the most consistent model in the analyses, which investigated test data and error metrics for every precipitation station. The trend in the first precipitation data was captured using Sarima models.

Sarima is highlighted in the results when the performance metrics are looked at. Since Sarima models account for seasonality, their error performance is lower than that of other time series methods. Since the SARIMA model forecasts time series based on past trends and seasonal patterns, its performance can be significantly degraded in situations involving unexpected, sudden and unusual changes, such as extreme weather events. When the data contains outliers, it can be overly sensitive to past data and may have difficulty predicting similar events in the future. XGBoost modeling requires large data sets. In limited data sets, XGBoost's performance is insufficient. This situation demonstrates the need to validate machine learning techniques using several approaches in models that assess months independently. XGBoost does not forecast directly from past observations like time series models. In order for XGBoost to learn time dependence, lag features need to be created manually. In small data sets, overfitting for XGBoost models can significantly reduce model performance. For XGBoost models, feature engineering were made by feature engineering within the scope of the study.

The effects of seasonality have been made clear by setting up the models independently for each month. This characteristic has been reflected in the results of the Sarima model,

one of the well-known models that takes seasonality into account.

Author contribution: Author Yusuf Kaya: wrote the article by analyzing the study, Author Berna Aksoy: Collected and analyzed data about the study, Author İsmail Hakkı Özölçer: planned and designed the study.

5. References

- Bentéjac, C., Csörgo, A., Martínez-Muñoz, G. 2021.** A comparative analysis of gradient boosting algorithms. *Artificial Intelligence Review*, 54. <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09896-5>
- Bierens, HJ. 1987.** ARMAX model specification testing, with an application to unemployment in the Netherlands. *Journal of Econometrics*, 35(1):161–190. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(87\)90086-8](https://doi.org/10.1016/0304-4076(87)90086-8)
- Box, GE., Jenkins, GM., Reinsel, G. 1970.** Forecasting and control. *Time Series Analysis*, 3, 75.
- Box, GEP., Jenkins, GM., Reinsel, GC. 2008.** Time series analysis: Forecasting and control (4th ed.). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 978-0470272848
- Chen, T., Guestrin, C. 2016.** XGBoost: A scalable tree boosting system. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, s. 785–794. ACM. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
- Cryer, JD., Chan, KS. 2008.** Time series analysis: With applications in R. New York: Springer-Verlag. ISBN: 978-0-387-75958-6.
- Dabral, PP., Murry, MZ. 2017.** Modelling and forecasting of rainfall time series using SARIMA. *Environmental Processes*, 4:399–419. <https://doi.org/10.1007/s40710-017-0226-y>
- Dempster, AP., Laird, NM., Rubin, DB. 1977.** Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 39(1):1–38. <https://doi.org/10.2307/2984875>
- Fan, J., Shan, R., Cao, X., Li, P. 2009.** The analysis of the tertiary industry with the ARIMAX model. *Journal of Mathematics Research*, 1(2):156. <https://doi.org/10.5539/jmr.v1n2p156>
- GarcíaLaencina, PJ., SanchoGómez, JL., FigueirasVidal, AR., Verleyesen, M. 2009.** K nearest neighbours with mutual information for simultaneous classification and missing data imputation. *Neurocomputing*, 72(7–9):1483–1493. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2008.11.026>
- Huntra, P., Keener, TC. 2017.** Evaluating the impact of meteorological factors on water demand in the Las Vegas Valley using time-series analysis: 1990–2014. *International Journal of Geo-Information*, 6(8), 249. <https://doi.org/10.3390/ijgi6080249>

- Schafer, J.L., Graham, J.W. 2002.** Missing data: Our view of the state of art. *Psychological Methods*, 7(2):147-177. <https://doi.org/10.1037/1082-989X.7.2.147>
- Stekhoven, D.J., Bühlmann, P. 2012.** MissForest: Nonparametric missing value imputation for mixedtype data. *Bioinformatics*, 28(1):112-118. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btr597>
- Sutthichaimethee, P., Ariyasajakorn, D. 2017.** Forecasting energy consumption in short-term and long-term periods by using the ARIMAX model in the construction and materials sector in Thailand. *Journal of Ecological Engineering*, 18(4):52-59. <https://doi.org/10.12911/22998993/74396>
- Valipour, M. 2012.** Number of required observation data for rainfall forecasting according to the climate conditions. *American Journal of Scientific Research*, 74:79-86.
- Valipour, M. 2015.** Long-term runoff study using SARIMA and ARIMA models in the United States. *Meteorological Applications*, 22:592-598. <https://doi.org/10.1002/met.1491>
- Wangwongchai, A., Waqas, M., Dechpichai, P., Hlaing, P.T., Ahmad, S., Humphries, U. W. 2023.** Imputation of missing daily rainfall data: A comparison between artificial intelligence and statistical techniques. *MethodsX*, 11, 102459. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102459>
- Vincent, P., Larochelle, H., Bengio, Y., Manzagol, P.A. 2008.** Extracting and composing robust features with denoising autoencoders. In *Proceedings of the 25th International Conference on Machine Learning*, s. 1096-1103. ACM. DOI:10.1145/1390156.1390294
- Wang, J., Du, YH., Zhang, XT. 2008.** Theory and application with seasonal time series (1st ed.). Nankai: Nankai University Press.
- Waqas, M., Humphries, UW., Hlaing, P.T., Wangwongchai, A., Dechpichai, P. 2024.** Advancements in daily precipitation forecasting: A deep dive into daily precipitation forecasting hybrid methods in the tropical climate of Thailand. *MethodsX*, 12, 102757. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.102757>
- Zhang, G. P. 2003.** Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model. *Neurocomputing*, 50:159-175. [https://doi.org/10.1016/S0925-2312\(01\)00702-0](https://doi.org/10.1016/S0925-2312(01)00702-0)



Accurate, Simple and Rapid Determination of Climbazole as Fungicide in Tap Water Samples by Gas Chromatography-Mass Spectrometry

Gaz Kromatografisi-Kütle Spektrometresi ile Musluk Suyu Örneklerinde Fungisit Olarak Klimbazolün Doğru, Basit ve Hızlı Tayini

Tuğçe Göver*

Selçuk University, Faculty of Pharmacy, Department of Analytical Chemistry, Konya, Türkiye

Abstract

This study describes the identification and quantification of climbazole, a fungicide, by using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). A proper temperature program was applied for the efficient separation in the gas chromatography system for precise and accurate determination of climbazole. The analysis time for climbazole detection was 7.20 minutes. The identifier and quantifier ions were determined the ion peak with the highest relative abundance for climbazole in the National Institute of Standards and Technology (NIST) library, and the sharp peak at minute 4.95 in the chromatogram obtained in this ion peak was confirmed to belong to climbazole in the library. The analytical system provides linear working range between 2.05 and 99.37 mg/kg. Under the constant instrumental conditions, the limit of detection and limit of quantitation of climbazole were recorded as 0.60 and 2.01 mg/kg, respectively. Accuracy of the method was validated by performing recovery experiments on tap water samples. The climbazole was not detected in the two different tap water samples used in the recovery experiments. On the other hand, percent recovery results were calculated for spiked tap water samples by using an external calibration technique. The recovery values obtained for different climbazole concentrations were in the range of 87.7% - 114.4%. These results indicate the applicability and accuracy of the developed method in the determination of climbazole at water samples.

Keywords: Climbazole, fungicide, gas chromatography, tap water.

Öz

Bu çalışmada, bir fungusit olan klimbazolün gaz kromatografisi-kütle spektrometresi (GC-MS) kullanılarak belirlenmesi ve miktar tayini anlatılmaktadır. Klimbazolün hassas ve doğru tayini için gaz kromatografisi sisteminde etkin bir ayırmanın yapılabilmesi amacıyla uygun sıcaklık programı uygulandı. Klimbazolün tayini için hızlı analiz süresi (7.20 dk) gerçekleştirildi. Tanımlayıcı ve niceleyici iyonlar, Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (NIST) kütüphanesinde klimbazol için en yüksek bağlı bolluğa sahip iyon piki belirlendi ve bu iyon pikinde elde edilen kromatogramda 4.95 dakikadaki keskin pik kütüphanede klimbazole ait olduğu doğrulandı. Analitik sistem 2.05 ile 99.37 mg/kg arasında oldukça iyi doğrusal çalışma aralığı sağlamaktadır. Sabit enstrümantal koşullar altında, klimbazolün gözlenebilirlik sınırı (LOD) ve tayin sınırı (LOQ) sırasıyla 0.60 ve 2.01 mg/kg olarak belirlendi. Yöntemin doğruluğu musluk suyu örneklerinde geri kazanım deneyleri yapılarak doğrulandı. Geri kazanım deneylerinde kullanılan iki farklı musluk suyu örneğinde klimbazol belirlenmedi. Öte yandan, standart ilaveli musluk suyu numuneleri için harici kalibrasyon tekniği kullanılarak yüzde geri kazanım sonuçları hesaplandı. Klimbazolün farklı konsantrasyonları için geri kazanım sonuçlarının %87.7 ile %114.4 arasında değiştiği görüldü. Bu sonuçlar, klimbazol tayini için geliştirilen yöntemin kompleks su örneklerinde bile uygulanabilirliğini ve doğruluğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Klimbazol, fungusit, gaz kromatografisi, musluk suyu.

*Corresponding author: tugce.gover@selcuk.edu.tr

Tuğçe Göver orcid.org/0000-0003-2414-9478



1. Introduction

Pesticides are frequently used in modern agriculture and food industry. They play an important role in preventing plant-damaging organisms and diseases (Li and Shi 2024, Rasheed 2023). Pesticides are chemicals used to destroy harmful plants or animals (Abubakar et al. 2020, Ejigu et al. 2024, Mahmood et al. 2016). While pesticides generally protect plants from pests in agriculture, they also cause improvement in production, increase in quality and prolong the shelf life of the product (Aktaş et al. 2024, Popp et al. 2013, Rana et al. 2021). Pesticides can enter the water system via many pathways such as runoff, groundwater flow, rain flow, atmospheric deposition, and drift (Holvoet et al. 2007, Keikavousi Behbahan et al. 2024). Water pollution caused by agricultural pesticides threatens health of aquatic ecosystems (Chow et al. 2020). Pesticides are known to include herbicides, insecticides, fungicides, disinfectants (Blair et al. 2015, Ejigu et al. 2024, Richardson et al. 2019, Tefera et al. 2018). Fungicides are often found in fruits and vegetables as pesticide residues (Blasco et al. 2002, Scaroni et al. 1996). Climbazole (Figure 1), an azole fungicide, is found in some household and personal care products as an anti-dandruff ingredient (Scientific Committee on Consumer Products (SCCP) 2009, Zhang et al. 2015). Climbazole (CBZ) is an antifungal agent belonging to the imidazole class, commonly utilized in products like shampoos and conditioners to treat dandruff, as well as serving as a preservative. However, this can mix with wastewater as a result of improper use or inadequate treatment processes, which can lead to environmental pollution. The molecular weight of climbazole is 292.8 g/mol. Its melting point is between 95–97°C, and it functions by blocking the synthesis of ergosterol, a principal component of fungal plasma membranes (Paz-Alvarez et al. 2018). Furthermore, it has demonstrated the ability to enhance keratinocyte differentiation, hence increasing the expression of small-proline-rich proteins in primary keratinocytes (Pople et al. 2014).

Chromatography is a separation technique for the resolution of individual components in mixtures (Rasmussen and Huang 2012). Numerous iterations and variations of chromatographic techniques exist depending on the analyte(s) (Gonçalves et al. 2022). Among them, some methods are very popular for the quantitative determination of climbazole, such as high performance liquid chromatography (HPLC) (Liu et al. 2016), liquid chromatography quadrupole time of-flight mass spectrometry (LC-QTOF-MS) (Casado et al. 2014) and high performance liquid chroma-

tography–tandem mass spectrometry (HPLC-MS/MS) (G. Chen et al. 2013, Z.-F. Chen et al. 2013, Sun et al. 2019, Zhong et al. 2017). GC-MS is employed for both the qualitative analysis and the quantitative determination of specific components within complex mixtures. The most commonly used detector is the mass spectrometric detector (MSD), which provides the molecular “fingerprint,” or its mass spectrum. Mass spectra offer details about the molecular weight, elemental composition, and, when using a high-resolution mass spectrometer, the functional groups present. In certain cases, they can also provide information on the geometry and spatial isomerism of the molecule (Pramod et al. 2021). GC-MS system has some advantages over LC-MS system such as higher column efficiency, cost-effective and simple operation structure (Ichihara et al. 2021, Stróżyńska and Schuhen, 2019, Oflu et al. 2023)

The novelty of this study is that the analyte has not been examined in this matrix environment with the proposed method. In this study, climbazole was determined in tap water samples with high accuracy using a GC system. Products containing climbazole are frequently used in daily life and can therefore contaminate water sources. For this reason, tap water samples were selected as real samples to qualitative and quantitative determination of climbazole residues. The recovery studies conducted using these real samples support the applicability of the method.

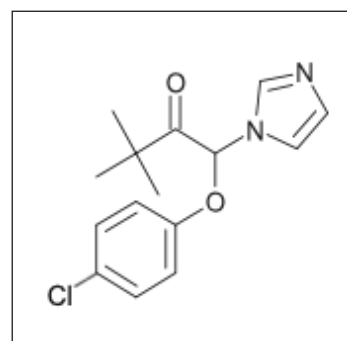


Figure 1. Chemical structure of climbazole (Paz-Alvarez et al. 2018).

2. Material and Methods

2.1. Instrumentation and Chromatographic Conditions

During the quantitative and qualitative analyses of climbazole, an Agilent gas chromatograph (6890 N) integrated with a HP-5MS analytical column was used to achieve the chromatographic separation of the analyte. High purity helium (99.96%, purity), which was set to 50 mL/min, was

employed as a carrier gas. The gas chromatograph was coupled with an Agilent mass spectrometer (5973 N) to qualify and quantify climbazole. The detector and inlet temperatures were kept constant at 280 °C. The oven temperature program was applied to ensure the effective separation in 7.2 minutes of total run time. According to the ramp, the initial temperature was set to 70 °C and reached to 280 °C by increasing 50 °C for each minute. Then, the temperature was remained same for 3.0 minutes of hold time. Optimum parameters such as HP-5MS analytical column (30 m length x 250 µm internal diameter x 250 nm film thickness), Ionization source temperature (230 °C), injection volume/mode (1.0 µL/spitless), transfer line temperature (280 °C), quadrupole temperature (150 °C) were determined.

An analytical balance (Shimadzu, Japan) was used for gravimetrically preparation of standard/sample solutions used throughout the study.

2.2. Reagents and Chemicals

Climbazole was obtained from Dr. Ehrenstorfer (Germany). A stock solution (1000 mg/L) was made by dissolving solid fungicide in appropriate amount of acetonitrile. Acetonitrile (purity ≥ 99.8 %) was supplied from Merck (Darmstadt, Germany). Climbazole solutions with different concentrations (2.05; 5.05; 7.65; 11.8; 19.51; 49.65; 73.6; 99.37 mg/kg) were diluted by gravimetrically from the stock solution with acetonitrile and these solutions were stored in the refrigerator at +4 °C. Deionized water was produced from the Elga PureLab Flex 3 Ultrapure Water System (London, UK) for use in solution preparation and dilution.

2.3. Sample Preparations

The tap water samples used in the recovery studies were obtained from different districts of İstanbul. 0.25 g of sample tap water was weighed in a clean vial using an analytical balance and the climbazole was spiked at different concentrations and finally the solution was completed to 1.0 gram with acetonitrile (Figure 2).

3. Results and Discussion

3.1. Qualitative and Quantitative Determination of Climbazole

The quantitative and qualitative determination of the climbazole was performed by the sharp peak obtained after extracting five major m/z ion peaks. The climbazole peak at 4.95 minutes in the chromatogram (Figure 3) was also

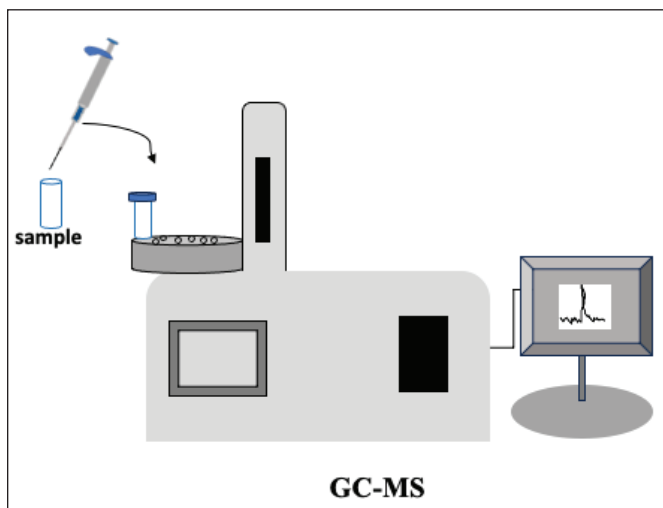


Figure 2. Schematic depiction of method.

suggested as climbazole by NIST mass spectrometry library with 87% accuracy. Afterwards, the performance of this system for climbazole determination was evaluated. For this aim, climbazole calibration standard solutions with different concentrations in the range of 0.50 mg/kg and 100 mg/kg were prepared. Each standard solution was analyzed in the instrumental system by at least three consecutive measurements under the same instrumental conditions. For the quantitative analysis, m/z ratio of 207, which is the highest abundant fragment of climbazole, was used and peak area was calculated by manual integration mode of the ChemStation software. The as seen in Figure 4, an increase in the analyte signal was observed with increasing climbazole concentration.

The mean value for each concentration was calculated and calibration plot was created with the mean peak areas of each concentration versus climbazole concentration. The linear working range was determined as 2.05 mg/kg - 99.37 mg/kg, and the R^2 value was determined as 0.9977 from the obtained graph (Figure 5).

The sensitivity was assessed by calculating the limit of detection (LOD) as $3 \times SD/m$ and the limit of quantification (LOQ) as $10 \times SD/m$ (SD: the standard deviation of six replicates of the lowest concentration in the linear working range, m: the slope of the linear calibration graph) (Serbest 2024). The results obtained were shown in Table 1.

Comparison of the method used in this study with other methods was given in Table 2. The results obtained showed that this simple method could be used efficiently.

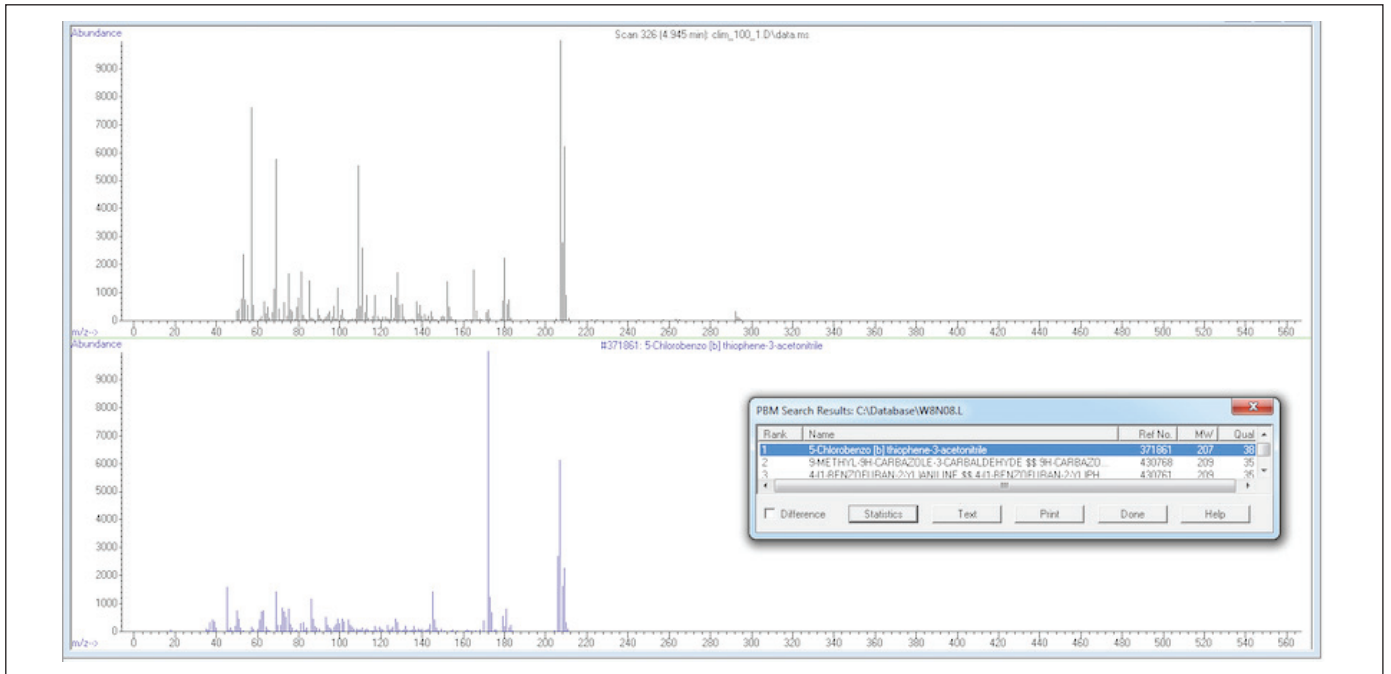


Figure 3. The mass spectrum of climbazole.

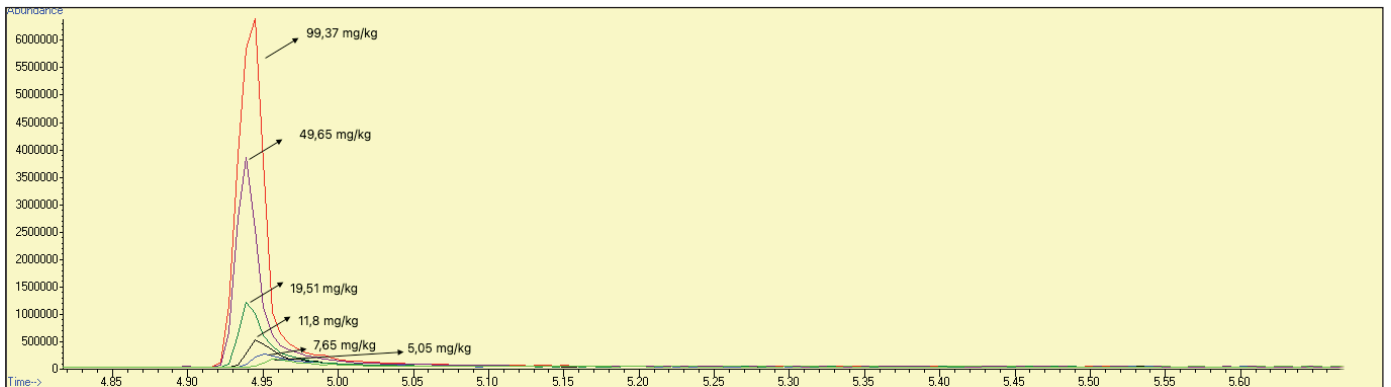


Figure 4. An overlay selected ion chromatogram of climbazole in different concentrations.

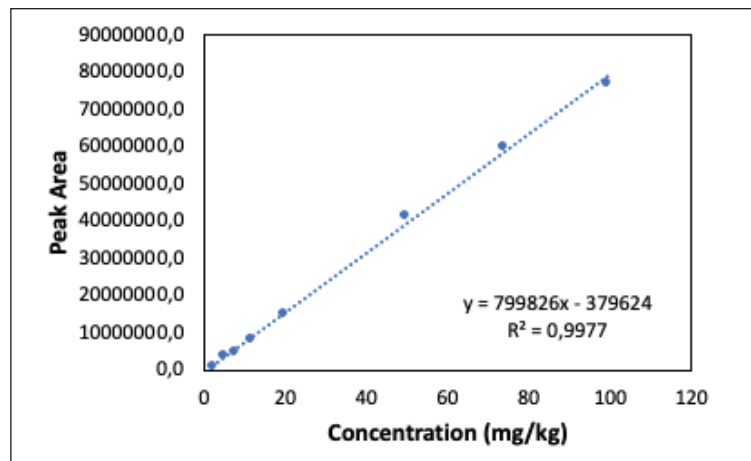


Figure 5. Calibration plot of climbazole in different concentrations.

3.2. Recovery Studies in Real Samples

The rapid expansion of the global pesticide market has led to the introduction of numerous pesticide formulations, driven by extensive usage in both agricultural and non-agricultural sectors. The presence of pesticides in aquatic environments is primarily attributed to runoff from agricultural fields and industrial wastewater. Soluble pesticides are transported by water molecules, particularly during precipitation events, percolating downward through soil layers and ultimately

contaminating surface waters and groundwater. As a result, pesticide residues can be found in water (Boxall et al. 2012, Daughton and Ternes 1999, Zhang et al. 2015) and the determination of these substances is important.

The recovery studies were carried out on tap water samples taken from different regions of İstanbul in the aim of testing the accuracy of the employed analytical technique (Figure 6).

Table 1. The analytical figures of merit of the developed analytical method.

Analyte	LOD, mg/kg	LOQ, mg/kg	Linear Working Range, mg/kg	Regression coefficient, R ²
climbazole	0.60	2.01	2.05-99.37	0.9977

Table 2. Comparison of the performance of the other methods with the present work for the determination of climbazole.

Analytical Method	LOD	LOQ	Linear Working Range	Ref.
UHPLC-MS/MS	1 ng/mL	4 ng/mL	4-2000 ng/mL	Chen et al. 2013
VA- β -CD-SHS-HLPME-HPLC-UV	12 ng/mL	-	40-11000 ng/mL	Arabkhani et al. 2025
GC-MS	0.60 mg/kg	2.01 mg/kg	2.05-99.37 mg/kg	This study

UHPLC-MS/MS: Ultra-high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry

VA- β -CD-SHSs-HLPME: Vortex-assisted-beta-cyclodextrin-Switchable hydrophilicity solvents-homogeneous liquid-phase microextraction

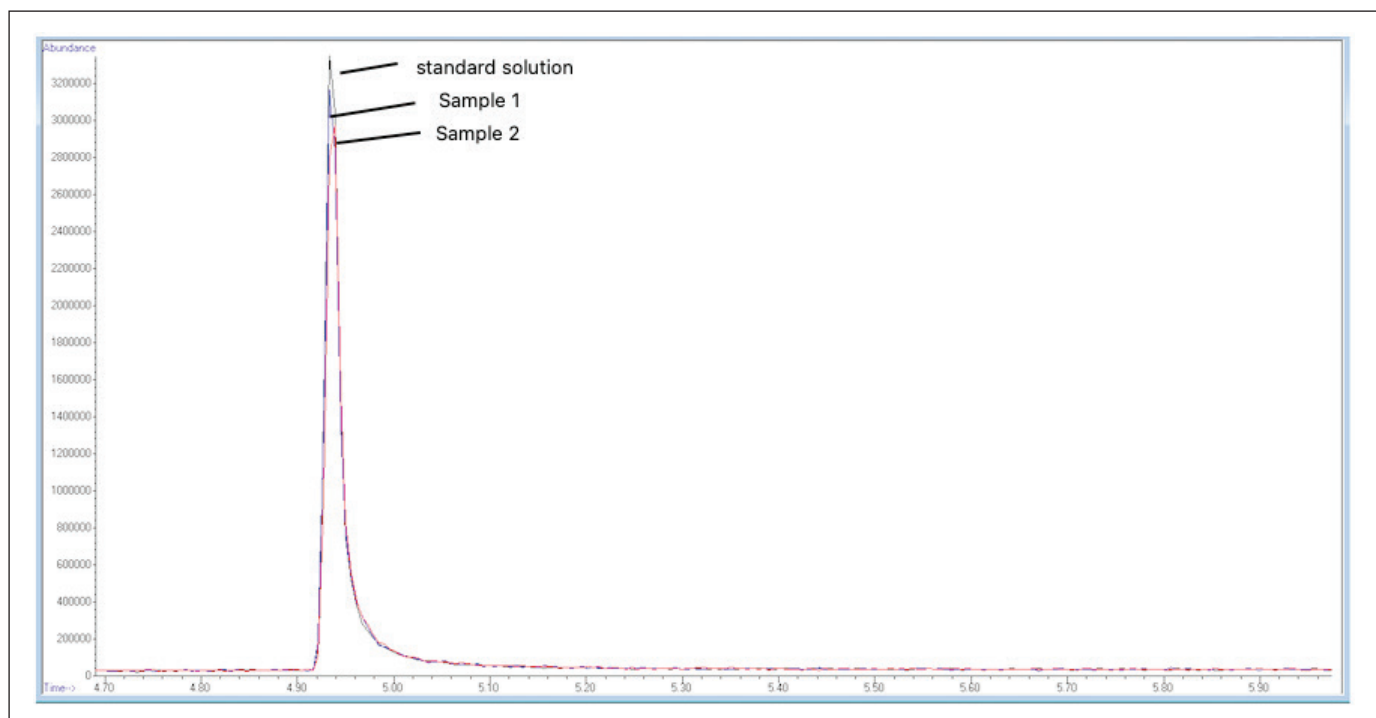


Figure 6. An overlay chromatogram of standard and samples

The presence of climbazole in tap water samples was investigated, and no analytical signal was observed in two different samples. Subsequently, the standard solution at different concentrations (~ 4, 10, 20, 50 ve 76 mg/kg) was spiked into tap water samples, and four replicate measurements were obtained. The percent recovery values were calculated by external calibration method. For this aim, the linear equation ($y = 835168x - 865388$) obtained from the constant instrumental system was used to determine the concentration of the spiked samples. Table 3 shows the recovery results obtained.

Table 3. The results obtained in the recovery experiments.

Sample	Spike Concentration, mg/kg	External Calibration Recovery $\pm$ Std. Dev., %
Tap Water A	4.26	114.4 $\pm$ 12.4
	9.80	91.8 $\pm$ 3.3
	20.22	89.5 $\pm$ 3.9
	50.08	98.0 $\pm$ 3.3
	75.89	103.5 $\pm$ 1.1
Tap Water B	4.02	102.2 $\pm$ 15.8
	9.67	97.3 $\pm$ 7.2
	20.76	87.7 $\pm$ 1.3
	49.87	101.3 $\pm$ 2.0
	75.82	100.4 $\pm$ 0.9

4. Conclusion and Suggestions

In this study, the determination of climbazole, a type of fungicide, was performed using a GC-MS system in tap water matrices. A gradual temperature program was applied with a run time of 7.2 minutes for the determination of climbazole. Under the specified conditions, the LOD value was found to be 0.60 mg/kg, and the LOQ was determined to be 2.01 mg/kg. The applicability of the proposed method in tap water samples was evaluated through recovery experiments by spiking at different concentrations. The recovery results obtained between 87.7% and 114.4% demonstrated the applicability and accuracy of the method in tap water matrices.

5. Acknowledgment

The author is grateful to Bakırdere Research Group/Yıldız Technical University for providing the experimental opportunity to carry out this study.

Author contribution

Tuğçe Göver: Conceptualization, Formal analysis, Data curation, Methodology, Investigation, Validation, Visualization, Supervision, Writing – original draft, review & editing.

Ethics committee approval: No ethical approval is required.

Conflict of interest

The author declares that no conflict of interest.

6. References

- Abubakar, Y., Tijjani, H., Egbuna, C., Adetunji, CO., Kala, S., Kryeziu, TL., Ifemeje, J. C., Patrick-Iwuanyanwu, KC. 2020. Pesticides, History, and Classification (Chapter 3). Natural Remedies for Pest, Disease and Weed Control, Elsevier, pp. 29–42. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819304-4.00003-8>
- Aktaş, Ş., Aminzai, MT., Tegin, İ., Yabalak, E., Acar, O. 2024. Determination of pesticide residues in varieties of pepper sold at different periods and provinces in Turkey and investigation of their adverse effects on human health and the environment. *Int. J. Environ. Health Res.*, 34(6): 2491–2503. Doi: 10.1080/09603123.2023.2254720
- Arabkhani, B., Goudarzi, N., Chamjangali, MA. 2025. Development of a sensitive and accurate method for the simultaneous determination of climbazole and clotrimazole using β -cyclodextrin assisted liquid–liquid microextraction based on switchable solvent. *Chemical Papers*. 79:1945–1957. <https://doi.org/10.1007/s11696-025-03900-4>
- Blair, A., Ritz, B., Wesseling, C., Beane Freeman, L. 2015. Pesticides and human health. *Occup. Environ. Med.*, 72(2): 81–82. Doi: 10.1136/oemed-2014-102454
- Blasco, C., Picó, Y., Mañes, J., Font, G. 2002. Determination of fungicide residues in fruits and vegetables by liquid chromatography–atmospheric pressure chemical ionization mass spectrometry. *J. Chromatogr. A*, 947(2): 227–235. Doi: 10.1016/S0021-9673(02)00009-2
- Boxall, ABA., Rudd, MA., Brooks, BW., Caldwell, DJ., Choi, K., Hickmann, S., Innes, E., Ostapyk, K., Staveley, JP., Verslycke, T., Ankley, GT., Beazley, KF., Belanger, S. E., Berninger, JP., Carriquiriborde, P., Coors, A., DeLeo, PC., Dyer, SD., Ericson, J. F., ... Van Der Kraak, G. 2012. Pharmaceuticals and Personal Care Products in the Environment: What Are the Big Questions? *Environ. Health Perspect.*, 120(9): 1221–1229. Doi: 10.1289/ehp.1104477

- Casado, J., Rodríguez, I., Ramil, M., Cela, R. 2014.** Selective determination of antimycotic drugs in environmental water samples by mixed-mode solid-phase extraction and liquid chromatography quadrupole time-of-flight mass spectrometry. *J. Chromatogr. A*, 1339: 42–49. Doi: 10.1016/j.chroma.2014.02.087
- Chen, G., Hoptroff, M., Fei, X., Su, Y., Janssen, HG. 2013.** Ultra-high-performance liquid chromatography–tandem mass spectrometry measurement of climbazole deposition from hair care products onto artificial skin and human scalp. *J. Chromatogr. A*, 1317: 155–158. Doi: 10.1016/j.chroma.2013.08.032
- Chen, ZF., Ying, GG., Ma, YB., Lai, HJ., Chen, F., Pan, CG. 2013.** Occurrence and dissipation of three azole biocides climbazole, clotrimazole and miconazole in biosolid-amended soils. *Sci. Total Environ.*, 452–453: 377–383. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.03.004
- Chow, R., Scheidegger, R., Doppler, T., Dietzel, A., Fenicia, F., Stamm, C. 2020.** A review of long-term pesticide monitoring studies to assess surface water quality trends. *Water Res. X.*, 9: 100064. Doi: 10.1016/j.wroa.2020.100064
- Daughton, CG., Ternes, TA. 1999.** Pharmaceuticals and personal care products in the environment: agents of subtle change? *Environ. Health Perspect.*, 107(suppl 6): 907–938. Doi: 10.1289/ehp.99107s6907
- Ejigu, A., Tefera, M., Guadie, A. 2024.** Electrochemical detection of pesticides: A comprehensive review on voltammetric determination of malathion, 2,4-D, carbaryl, and glyphosate. *Electrochem. commun.*, 169: 107839. Doi: 10.1016/j.elecom.2024.107839.
- Gonçalves, RFS., Madalena, DA., Fernandes, JM., Marques, M., Vicente, AA., Pinheiro, AC. 2022.** Application of nano-structured delivery systems in food: From incorporation to detection and characterization. *Trends Food Sci. Technol.*, 129: 111–125. Doi: 10.1016/j.tifs.2022.09.016
- Holvoet, KMA., Seuntjens, P., Vanrolleghem, PA. 2007.** Monitoring and modeling pesticide fate in surface waters at the catchment scale. *Ecol. Modell.*, 209(1): 53–64. Doi: 10.1016/j.ecolmodel.2007.07.030
- Ichihara, K., Kohsaka, C., Yamamoto, Y. 2021.** Determination of proteinaceous free amino acids by gas chromatography. *Anal. Biochem.*, 633(114): 423. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2021.114423>
- Keikavousi Behbahan, A., Mahdavi, V., Gordan, H., Bagheri, H. 2024.** Fabrication of neem tree seed shell biochar polyamide composite for determination of pesticides in environmental water samples by GC-ECD: A comparison of various hard shell nuts' biochar in thin-film microextraction setup. *J. Food Compos. Anal.*, 125: 105743. Doi: 10.1016/j.jfca.2023.105743
- Li, WK., Shi, YP. 2024.** Recent advances of carbon materials on pesticides removal and extraction based determination from polluted water. *TrAC, Trends Anal. Chem.*, 171: 117534. Doi: 10.1016/j.trac.2024.117534
- Liu, WR., Ying, GG., Zhao, JL., Liu, YS., Hu, LX., Yao, L., Liang, YQ., Tian, F. 2016.** Photodegradation of the azole fungicide climbazole by ultraviolet irradiation under different conditions: Kinetics, mechanism and toxicity evaluation. *J. Hazard. Mater.*, 318: 794–801. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.06.033
- Mahmood, I., Imadi, SR., Shazadi, K., Gul, A., Hakeem, KR. 2016.** Effects of Pesticides on Environment. In *Plant, Soil and Microbes*, Springer International Publishing, pp. 253–269. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27455-3_13.
- Oflu, S., Erarpat, S., Zaman, BT., Günkara, ÖT., Bakırdere, S., Turak, F. 2023.** Combination of quadrupole isotope dilution mass spectrometry with simultaneous derivatization and spray assisted droplet formation-liquid phase microextraction for the determination of methamphetamine in human urine and serum samples by gas chromatography mass spectrometry. *J. Pharmacol. Toxicol. Methods*. 119: 107207
- Paz-Alvarez, M., Pudney, PDA., Hadgraft, J., Lane, ME. 2018.** Topical delivery of climbazole to mammalian skin. *Int. J. Pharm.*, 549(1–2): 317–324. Doi: 10.1016/j.ij-pharm.2018.07.058
- Pople, JE., Moore, AE., Talbot, DCS., Barrett, KE., Jones, DA., Lim, FL. 2014.** Climbazole increases expression of cornified envelope proteins in primary keratinocytes. *Int. J. Cosmet. Sci.*, 36(5): 419–426. Doi: 10.1111/ics.12137
- Popp, J., Pető, K., Nagy, J. 2013.** Pesticide productivity and food security. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 33(1): 243–255. Doi: 10.1007/s13593-012-0105-x
- Pramod, SK., Navnath, KA., Pramod, SM. 2021.** A Review on Gas Chromatography-Mass Spectrometry(GC-MS). *World J. Pharm. Res.* 10(3): 741–763.
- Rana, RA., Siddiqui, Md. N., Skalicky, M., Brestic, M., Hos-sain, A., Kayesh, E., Popov, M., Hejnak, V., Gupta, DR., Mahmud, NU., Islam, T. 2021.** Prospects of Nanotechnology in Improving the Productivity and Quality of Horticultural Crops. *Hortic.*, 7(10), 332. Doi: 10.3390/horticulturae7100332
- Rasheed, T. 2023.** Carbon dots as robust class of sustainable and environment friendlier nano/optical sensors for pesticide recognition from wastewater. *TrAC, Trends Anal. Chem.*, 160: 116957. Doi: 10.1016/j.trac.2023.116957
- Rasmussen, HT., Huang, K. 2012.** 8.7 Chromatographic Separations and Analysis: Chromatographic Separations and Analysis of Enantiomers. *Comprehensive Chirality*, Elsevier, pp. 96–114. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095167-6.00831-4>

- Richardson, JR., Fitsanakis, V., Westerink, RHS., Kanthasamy, AG. 2019.** Neurotoxicity of pesticides. *Acta Neuropathol.*, 138(3): 343–362. Doi: 10.1007/s00401-019-02033-9
- Scaroni, I., Previati, MP., Bovolenta, A. 1996.** Handbook of Food Analysis. In Marcel Dekker & L. M. L. Nollet (Eds.), *Handbook of Food Analysis*, pp. 1461–1500.
- Scientific Committee on Consumer Products (SCCP). 2009.** *Opinion on climbazole, SCCP/1204/08* (Scientific Committee on Consumer Products, Ed.). https://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_sccp/docs/sccp_o_164.pdf Accessed on Feb 05, 2025.
- Serbest, H. 2024.** Accurate and Sensitive Determination of Me-fenpyr-diethyl in Barley, Oat and Corn Silk Matrices by Gas Chromatography – Flame Ionization Detector (GC–FID). *Karaelmas Fen ve Müh. Derg.*, 14(1): 23–27. Doi: 10.7212/karaelmasfen.1393684
- Stróżyńska, M., Schuhen, K. 2019.** Dispersive solid-phase extraction followed by triethylsilyl derivatization and gas chromatography mass spectrometry for perfluorocarboxylic acids determination in water samples. *J. Chromatogr. A*, 1597: 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2019.03.008>
- Sun, X., Wang, M., Peng, J., Yang, L., Wang, X., Wang, F., Zhang, X., Wu, Q., Chen, R., Chen, J. 2019.** Dummy molecularly imprinted solid phase extraction of climbazole from environmental water samples. *Talanta*, 196: 47–53. Doi: 10.1016/j.talanta.2018.12.017
- Tefera, M., Tessema, M., Admassie, S., Iwuoha, E. I., Waryo, TT., Baker, PGL. 2018.** Electrochemical determination of phenothrin in fruit juices at graphene oxide-polypyrrole modified glassy carbon electrode. *Sens. Bio-Sens. Res.*, 21: 27–34. Doi: 10.1016/j.sbsr.2018.09.003
- Zhang, QQ., Ying, GG., Chen, ZF., Liu, YS., Liu, WR., Zhao, JL. 2015.** Multimedia fate modeling and risk assessment of a commonly used azole fungicide climbazole at the river basin scale in China. *Sci. Total Environ.*, 520: 39–48. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.03.038
- Zhong, Y., Chen, ZF., Liu, SS., Dai, X., Zhu, X., Zheng, G., Liu, S., Liu, G., Cai, Z. 2017.** Analysis of azole fungicides in fish muscle tissues: Multi-factor optimization and application to environmental samples. *J. Hazard. Mater.*, 324, Part B: 535–543. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.11.024



Türkiye'deki *Biarum* Cinsine Ait Türlerin Kloroplast TrnL/TrnF Igs (Intergenic Spacer) Dizilimlerine Dayalı Filogenetik Analizi

Phylogenetic Analysis of Species of the Biarum Genus in Turkey Based on Chloroplast TrnL/TrnF Igs (Intergenic Spacer) Sequences

Cahit Çeçen¹ , Arif Parmaksız² , Hasan Akan^{2*}

¹Elmalı Köyü, Elmalı caddesi, No:34, 47400 Kızıltepe, Mardin, Türkiye

²Harran Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye

Öz

Bu çalışma, Türkiye'de doğal olarak yayılış gösteren *Biarum* cinsine ait türlerin filogenetik analizini yapmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. *Biarum*, Araceae familyasına ait, genellikle Akdeniz bölgesinde yayılış gösteren, rizomlu veya yumrulu bir bitki cinsidir. Türkiye'de bu cinse ait 12 takson bulunmakta olup, bunların 5'i endemiktir. Araştırmada, *Biarum* türlerinin filogenetik ilişkilerini belirlemek amacıyla kloroplast DNA trnL-trnF intergenik bölgesi (IGS) kullanılmıştır. 2020-2022 yılları arasında Türkiye'nin farklı bölgelerinden toplanan bitki örneklerinden DNA ekstraksiyonu yapılmış ve Polimeraz Zincir Reaksiyonu (PCR) yöntemiyle trnL-trnF bölgesi çoğaltılmıştır. Elde edilen DNA dizileri biyoinformatik programlar ile hizalanarak Neighbor-Joining (NJ) yöntemi ile filogenetik ağaç oluşturulmuştur. Sonuçlara göre, *Biarum* cinsine ait türlerin büyük çoğunluğu monofiletik bir grup oluşturmaktadır. Bazı türlerin birbirine genetik olarak daha yakın olduğu belirlenmiştir. Bu türler arasında; *Biarum x cinarensense* ve *Biarum carduchorum* türlerinin yakın akraba oldukları belirlenmiştir. Öte yandan, *Biarum syriacum* daha izole bir konumda yer almakta olup diğer türlerden daha farklı bir genetik yapıya sahiptir. Bu çalışma, *Biarum* cinsinin genetik çeşitliliğini ve filogenetik ilişkilerini daha iyi anlamamıza katkı sağlamıştır. Türkiye'de yayılış gösteren *Biarum* cinsi için yapılan ilk filogenetik çalışma olmasından dolayı burada elde edilen veriler, gelecekte yapılacak çalışmalar için bir kaynak teşkil edecektir.

Anahtar Kelimeler: *Biarum*, filogenetik analiz, kloroplast DNA, TrnL/TrnF Igs.

Abstract

This study was conducted to perform a phylogenetic analysis of species belonging to the genus *Biarum*, which naturally occurs in Turkey. *Biarum* is a genus of rhizomatous or tuberous plants belonging to the Araceae family, predominantly distributed in the Mediterranean region. In Turkey, 12 taxa of this genus are found, five of which are endemic. In the study, the chloroplast DNA trnL-trnF intergenic spacer (IGS) region was used to determine the phylogenetic relationships of *Biarum* species. DNA extraction was performed from plant samples collected from different regions of Turkey between 2020 and 2022, and the trnL-trnF region was amplified using the Polymerase Chain Reaction (PCR) method. The obtained DNA sequences were aligned using bioinformatics programs, and a phylogenetic tree was constructed using the Neighbor-Joining (NJ) method. According to the results, most species belonging to the genus *Biarum* form a monophyletic group. Some species were found to be genetically closer to each other. Among these, *Biarum x cinarensense* and *Biarum carduchorum* were determined to be closely related. On the other hand, *Biarum syriacum* was found to be in a more isolated position, possessing a distinct genetic structure compared to other species. This study contributes to a better understanding of the genetic diversity and phylogenetic relationships of the *Biarum* genus. Since it is the first phylogenetic study conducted on *Biarum* species distributed in Turkey, the data obtained here will serve as a valuable resource for future research.

Keywords: *Biarum*, chloroplast DNA, phylogenetic analysis, TrnL/TrnF Igs.

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: hakan@harran.edu.tr

Cahit Çeçen orcid.org/0000-0001-6789-9397

Arif Parmaksız orcid.org/0000-0003-0321-8198

Hasan Akan orcid.org/0000-0002-3033-4349



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

1. Giriş

Biarum Schott, Araceae familyasına ait, çoğunlukla Akdeniz bölgesinde yayılış gösteren soğanlı veya rizomlu bir bitki cinsidir. Büyük çoğunluğu tropikal alanda yayılış göstermekte olup monokotiledon, rizomlu ya da tuberli, çok yıllık, bitkilerdir. *Biarum* cinsi, G. Avrupa, K. Afrika, Yakın ve Orta Doğu'nun yarı kurak bölgelerinde bulunan yumru 22 bitki türünden oluşur. Çeşitliliğin merkezi, türlerin %75'inin endemik olduğu Orta Doğu'dur (Boyce 2008). *Biarum* cinsinin büyüme dönemi yaz sonu veya sonbahar başlangıcıdır. Yaz aylarından başlayarak ilkbaharın ilk aylarına kadarki dönemi ise uykuda geçirirler. Türlerin çoğu sonbaharda ve kış başlarında çiçek açar. Çoğu türde çiçeklenme yapraklardan önce ortaya çıkar, ancak bazı türlerde yaprak ile çiçek aynı zamanda ortaya çıkar. *Biarum* cinsi Flora of Turkey'e (Mill 1984, Alpınar 2000) göre 8 takson ile temsil edilmekte iken güncel çalışmalar ile tür sayısı dünya genelinde 22, Türkiye'de 12 takson olmuştur (Akan ve Balos 2008, Boyce 2008, Yıldırım vd. 2016, Yıldırım ve Altıoğlu 2016, Yıldırım 2018, Güner vd., 2018; Çeçen vd. 2022). Taksonların 5 tanesi endemik olup endemizm oranı %41.6'dır.

Araceae familyasını kapsayan en erken modern sınıflandırma, Schott (1860) tarafından önerilmiştir. Schott, gruplamalarını ağırlıklı olarak çiçek morfolojisine dayandırmıştır. Öte yandan, Engler (1920), çiçek morfolojisine ek olarak vejetatif morfoloji ve anatomi gibi daha geniş bir bilgi yelpazesine dayanmış ve sistemine açıkça evrimsel bir bakış açısını dahil etmiştir (Grayum 1990, Mayo vd. 1997, Govaerts vd. 2002). Ayrıca son yıllarda moleküler filogenetik çalışmaları canlılar arasındaki ilişkilerin daha bağımsız çerçeveler içinde değerlendirmeye olanak sağlamaktadır.

Moleküler belirteçler, genetik araştırmalarda organizmaların genetik yapısındaki benzersiz bölgeleri tanımlamak ve analiz etmek için geliştirilmiştir. Bu belirteçler, DNA dizilimindeki polimorfizmleri (varyasyonları) tespit ederek bireyler veya türler arasındaki genetik farklılıkları incelemeye olanak sağlar ve türler arası akrabalık ilişkilerinin belirlenmesi için kullanılır. Moleküler belirteçler, bitki gruplarının genetik analizinde genel olarak kullanılmaktadır (Agarwal vd. 2008, Palaz vd. 2023, Karakaya vd. 2023). Bu belirteçler sayesinde spesifik DNA dizileri tespit edilerek evrimsel ilişkiler ortaya çıkarılabilir. Kloroplast genomu, mitokondriyal ve nükleer genomlarına kıyasla, yapısal basitlikleri, nükleotid değişim hızları ve tek ebeveynli kalıtımla karakterize edilmesi (Burke vd. 2012, Ruhfel vd. 2014, Yang vd. 2019) nedeniyle filogenetik çalışmalarda ideal markörler haline getirir ve tür tanımlaması için kullanılır (Chen vd. 2018, Yu

vd. 2021). Ayrıca, kloroplast genomları tamamlayıcı genetik bilgi sağladıkları için türler arasındaki evrimsel ilişkilerin daha iyi çözülmesini kolaylaştırarak, bitki genetik çeşitliliği ve koruma çalışmalarında da yaygın olarak kullanılmaktadır (Wariss vd. 2018). Kloroplast DNA barkodları arasında trnL-trnF intergenik bölgesi (IGS) konservatif bir yapıya sahip olup bitki filogenetik analizleri için genel olarak kullanılmakta (Yulita 2013, Kishor ve Sharma 2018) ve yüksek varyasyon içermesinden dolayı bu bölgenin kullanılması önerilmektedir (Yılmaz 2023).

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'de doğal yayılış gösteren *Biarum* cinsine ait taksonların evrimsel ilişkilerini ortaya koymak ve tür tanımlamalarını desteklemek amacıyla trnL-trnF intergenik bölgesi kullanarak genetik analizler yapmaktır.

2. Gereç ve Yöntemler

2.1. Örnek Toplama ve DNA Ekstraksiyonu

Araştırma materyali *Biarum* cinsinin Türkiye'deki doğal yayılışa sahip taksonlarından oluşmaktadır. Bitki örnekleri, 2020-2022 vejetasyon dönemlerinde farklı lokalitelerden toplanmış ve Dr. Cahit Çeçen tarafından teşhis edilmiştir. Araziden toplanan örnekler Harran herbaryumu (HARRAN)'nda saklanmış ve toplayıcı numarası verilmiştir. Örnekler ait bilgiler Çizelge 1'de belirtilmiştir. Toplanan bitki örnekleri Silika jel içerisinde laboratuvara getirilmiştir. Örneklerin teşhisleri için Flora of Turkey (Mill., 1984) ve Resimli Türkiye Florası (Yıldırım, 2018) adlı eserlerden yararlanılmıştır. Bitki örneklerinin sağlıklı ve genç yaprakları ayıklanıp silika jel içinde muhafaza edilmiştir. Silika jel içindeki taze örnekler 3-5 gün içinde kurumuş ve çalışmaya kurutulmuş bitki örnekleri ile devam edilmiştir. Örneklerin kontaminasyon ve karışma ihtimalleri dikkate alınarak tüm örnekler ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

DNA elde etmek amacıyla silika jel içinde kurutulmuş muhafaza edilen yaprak örneklerinden her bir tür için 3 birey rastgele seçilmiş ve her bir birey için ortalama 40 mg alınarak sıvı azot yardımıyla öğütülmüştür. Öğütme işleminden sonra GeneMark Plant Genomic DNA Purification Kit (GeneMark Technology Co., Ltd., Tainan, Taiwan) kullanılarak kitteki protokol uygulanarak total DNA izolasyonu gerçekleştirilmiştir. DNA varlığını kontrol etmek için her bireye ait DNA örneklerinden 2 µl alınarak ve üzerine 2 µl boyama solüsyonu (2x yükleme boyası) eklendi. Bu karışım, SYBR Green eklenerek hazırlanmış %0.8 agaroz jele yüklenmiş ve 0.5x TBE (Tris/Borik asit/EDTA tamponu) çözeltisi içeren bir tankta yerleştirilmiştir. 120 V'da 30 dakika

Çizelge 1. Bitki örneklerine ait lokasyon, rakım ve tarih bilgileri.

Takson adı ve toplayıcı no	Lokalite	Yükseklik	Tarih	Erişim no
<i>B. x cinarense</i> Çeçen, H. Akan, Yıldırım & Balos / Çeçen 1135	Diyarbakır	660 m	13.10.2020	PV066074
<i>B. eximium</i> (Schott and Kotschy) Engl. / Çeçen 1136	Adana	85 m	02.04.2021	PV107574
<i>B. pyrami</i> (Schott) Engl. / Çeçen 1138	Burdur	795 m	18.03.2021.	PV107575
<i>B. aleppicum</i> J.Thiebaut / Çeçen 1114	Şanlıurfa	352 m	04.03.2021	PV107576
<i>B. carduchorum</i> (Schott) Engl. / Çeçen 1125	Şanlıurfa	522 m	02.04.2021.	PV107577
<i>B. syriacum</i> (Spreng.) Riedl / Çeçen 1168	Gaziantep	1100 m	19.04.2021.	PV107578
<i>B. ditschianum</i> Bogner & P.C.Boyce / Çeçen 1171	Antalya	31 m	23.04.2021.	PV107579
<i>B. davisii</i> Turrill subsp. <i>marmarisense</i> P.C.Boyce / Çeçen 1141	Muğla	20 m.	04.03.2021.	PV107580
<i>B. bovei</i> Blume / Çeçen 1151	Şanlıurfa	522 m	03.04.2021.	PV107581
<i>B. crispulum</i> (Schott) Engl. / Çeçen 1143	Hatay	743 m	23.03.2020.	PV107582
<i>B. rifatii</i> Yıldırım & Altıoğlu / Çeçen 1174	Antalya	1600 m	24.04.2021.	PV107583
<i>B. teunifolium</i> (L.) Schott subsp. <i>zelebori</i> (Schott) P.C.Boyce / Çeçen 1176	Aydın	230 m	25.04.2021.	PV107584

boyunca elektroforez işlemine tabii tutulmuş ve ultraviyole (UV) ışık yayan bir cihazda görselleştirilmiştir.

2.2. Kloroplast DNA trnL-trnF intergenik bölgesi (IGS) Amplifikasyonu ve Sekanslama

Bu çalışmada Polimeraz Zincir Reaksiyonu (PZR) işlemi, BIO-RAD (T100™) cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kloroplast DNA trnL-trnF intergenik (IGS) bölgesi için kullanılan primer dizisi Taberlet ve ark. (1991) çalışmasından alınmıştır. Primer dizileri şu şekildedir. Sequence (5'→3') F: GGT TCA AGT CCC TCT ATC CC; R: ATT TGA ACT GGT GAC ACG AG. PCR koşulları şu şekildedir: 95 °C'de 3 dakika başlangıç denatürasyonu, ardından 35 döngü boyunca 95°C'de 1 dakika denatürasyon, 52.5°C'de 1 dakika bağlanma (annealing) ve 72 °C'de 1 dakika uzama (extension) gerçekleştirilmiş ve son olarak, 72 °C'de 5 dakika süreyle bekletilerek sonlandırılmıştır. PCR işlemi sonrasında oluşan ürünleri kontrol etmek amacıyla, PCR ürünleri % 2 agaroz jel üzerinde 100 V elektrik akımı altında 30 dakika yürütülerek ve UV ışık yayan bir görüntüleme cihazında görüntülenmiştir. Jel görüntüsü kullanılarak doğru ürün oluşumu tespit edilen bireylere ait tüpler, dizi analizinin yapılması amacıyla ticari bir firmaya (MEDSANTEK; İstanbul, Türkiye) gönderilmiştir.

2.3. Veri Analizi

Kloroplast DNA trnL-trnF intergenik bölgesi (IGS) dizilerinin ham verileri FinchTV 1.4 programı kullanılarak değerlendirilerek tüm türlerin dizileri BioEdit 7.2.5 yazılımı ile hizalanmıştır. Tüm türlere ait veriler için MEGA X

programında filogenetik analizler yapılmış ve Neighbor-Joining filogenetik ağaç oluşturulurken, K2 parametre modeline göre gerçekleştirilmiş ve filogenetik ağaç oluşturulmuştur (Kumar vd. 2018). Ağaç dallarının (düğümlerin) güvenilirliği, 1000 tekrarlı bootstrap testi ile değerlendirilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

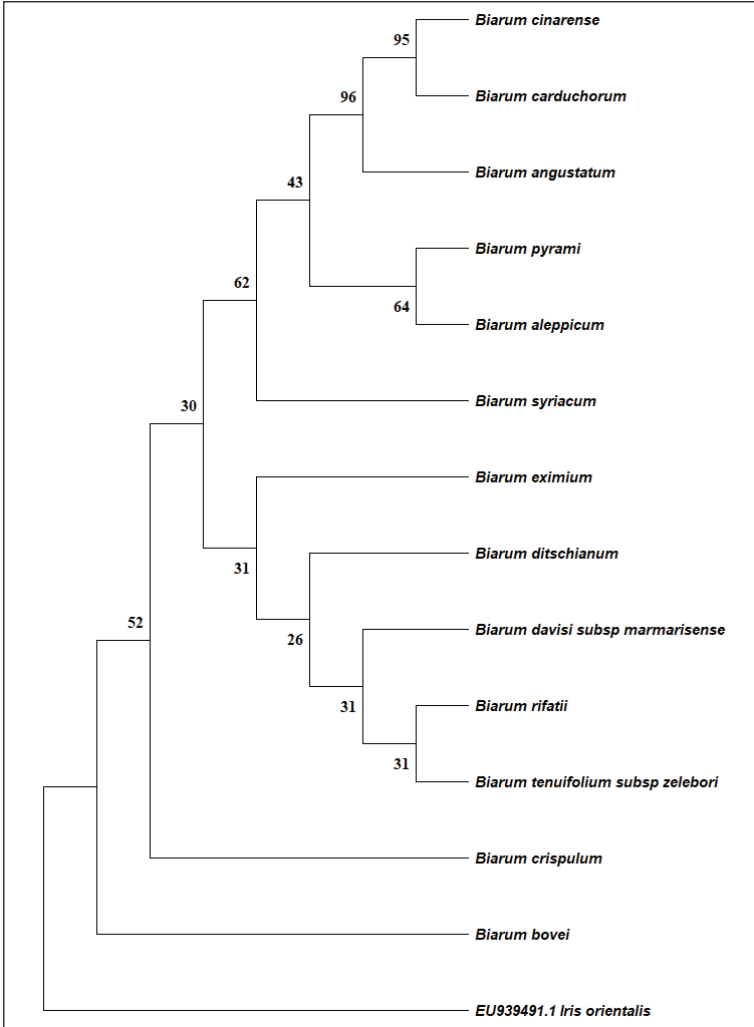
Bu çalışmada, Türkiye'de doğal yayılış gösteren *Biarum* cinsine ait 12 tür için, Kloroplast DNA trnL-trnF intergenik bölgesi (IGS) sekanslanarak filogenetik analizler yapılmıştır. Hedef bölgeye ait örnek bir Kromatogram görüntüsü Şekil 1'de gösterilmiştir.

Bu kromatogram, bir DNA sekanslama analizi için kullanılan Sanger yöntemi ile elde edilmiş ve "Finch TV" programı kullanılarak görüntülenmiştir. Tüm bireylere ait bu dizimler kontrol edilmiş ve baz karışıklığı veya üst üste binmiş pekaklerin bulunmadığı sekanslar bu çalışmaya dahil edilerek, güvenilir data kullanılmıştır. Tüm türlere ait sekanslar için MEGA X programında Neighbor-Joining filogenetik ağaç oluşturulmuştur (Şekil 2).

Şekil 2'de Komşu Birleştirme ağacında *Biarum* türlerine ek olarak NCBI gen bankasından alınan ve dış grup olarak *Iris orientalis* L. kullanılmıştır. Bu ağaçta dış grup dalların ayrılmasında etkili olmuş ve *Biarum* cinsine ait türlerin monofiletik bir grup oluşturduğu varsayımını güçlendirmiştir. Bu ayırma analizde kullanılan yöntemlerin güvenilirliğini artıran önemli bir bulgu olarak değerlendirilebilir. Ağaç üzerinde dallar, türlerin evrimsel ayrışmasını temsil etmektedir.



Şekil 1. Kloroplast DNA trnL-trnF İntergenik bölgesine (IGS) ait örnek bir dizi analizinin kromatogram görüntüsü



Şekil 2. *Biarum* cinsine ait 13 türün Kloroplast DNA trnL-trnF intergenik bölgesine (IGS) dayalı Komşu Birleştirme (Neighbor Joining) ağacı.

Biarum cinarense ve *Biarum carduchorum* türleri, 95 değeri ile birbirlerine en yakın akraba olarak belirlenmiştir. *Biarum* × *cinarense* morfolojik olarak *B. aleppicum* ve *B. carduchorum* türlerinin arasında melez bir türdür. *Biarum* × *cinarense* yumru yapısı, dış katafillerin sert oluşu, spata ayası rengi, yapraklarının fırfırlı olması bakımından ebeveyni *B. aleppicum*'a benzer. Sert katafillere sahip olması, erkek, dişi ve steril bölge bakımından farklı olması ile de *B. carduchorum*'dan ayrılır. *Biarum carduchorum*, Türkiye'nin Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgeleri'nden güney İran'a kadar geniş yayılım göstermektedir. Filogenetik analize göre en yakın iki türün görselleri Şekil 3 & 4 görülmektedir.

Bu yüksek destek değeri, bu iki türün filogenetik olarak yakın bir geçmişte ortak bir atadan türediğini göstermektedir. Benzer şekilde, *Biarum angustatum* türü, yukarıdaki gruba 96 destek değeri ile katılmaktadır. Bu destek değeri, bu türlerin bir monofiletik grup oluşturduğunu güçlü bir şekilde işaret etmektedir.

Ağaçta, *Biarum pyrami* ve *Biarum aleppicum* türleri 64 destek değeri ile aynı dalda yer almakta ve yüksek bir genetik yakınlık göstermektedir. Ancak bu destek değerinin, bazı diğer dallara göre daha düşük olması, bu türlerin daha fazla genetik değişkenliğe sahip olabileceğini düşündürmektedir. *Biarum syriacum*, daha izole bir konumda yer almakta ve diğer türlerden daha uzak bir genetik konuma sahiptir.

Bu durum, bu türün evrimsel açıdan daha erken bir dalda ayrıldığını veya daha farklı genetik bir yola evrildiğini göstermektedir.

Bazı dallar, nispeten düşük destek değerlerine sahiptir. Örneğin, *Biarum davisii* subsp. *marmarisense* ve *Biarum rifatii* arasında 31 destek değeri gözlemlenmiştir. Bu düşük destek değeri, bu türlerin genetik olarak daha çeşitli popülasyonlara sahip olabileceğini veya filogenetik ayrımın henüz tamamlanmamış olabileceğini işaret edebilir.

Bu yakın türlere genetik olarak en uzak türün *B. bovei* olduğu tespit edilmiştir. Bu tür, Türkiye, Lübnan ve Filistin'de doğal olarak yetişmekte. Hatta Irak ve İran'a kadar geniş yayılışa sahip bir türdür. Ekim ve Kasım aylarında çiçeklenme göstermektedir. Genellikle bozkır, taşlık step ve açık yamaçlarda yayılım gösterir. Yapılan arazi çalışmalarında *B. bovei*'nin spata boyu, apendiks boyutu ve kalınlığının, yaprak ayası genişliğinin değişkenlik gösterdiği görülmüştür. Elde edilen bulgulara göre yumru boyutunun daha büyük olduğu, yaprak sayısının diğer çalışmalara göre minimum değerinin daha fazla olduğu, yaprak sapı ve yaprak ayası, skapa boyu, spata tüpü, spadiks, apendiks ve katafil ölçülerinin daha büyük olduğu, katafil sayısının Yıldırım (2018) ile aynı olduğu, Boyce (2008)'de belirtilmediği erkek ve dişi çiçek bölge uzunluklarında bariz bir fark bulunmadığı görülmektedir.



Şekil 3. *Biarum carduchorum* genel görünümü.



Şekil 4. *Biarum* × *cinarense* genel görünümü.

Biarum bovei spatula tüpünün şişkin olması, çiçek ve yaprağın aynı zamanda görülmesi bakımından, *B. crispulum*, *B. dispar*, *B. kotschy* ve *B. pyrami*'ye benzerlik gösterir. *B. kotschy* Yıldırım (2008) tarafından *B. bovei*'nin varyasyon sınırları içerisinde ele alınmıştır.

Bu çalışmada *Biarum* cinsine ait türlerin moleküler olarak filogenetik ilişkileri incelenmiş ve bazı türlerin genetik olarak birbirine yakın veya uzak olduğu belirlenmiştir. Ancak, morfolojik özellikler açısından da bu ilişkilerin değerlendirilmesi önemlidir. Morfolojik olarak yakın türler; *Biarum x cinarense* ve *Biarum carduchorum* türleri genetik analizlerde yakın akraba olarak belirlenmiştir. Bu türler morfolojik olarak da benzer özellikler göstermektedir. Özellikle: Yaprak ve çiçek yapıları benzer olup, çiçeklenme zamanları yakın dönemlere denk gelmektedir. Çiçek rengi ve spatula yapısı açısından da büyük benzerlikler görülmektedir. *Biarum syriacum*, yapılan filogenetik analizlerde diğer türlerden daha izole bir konumda yer almaktadır. Morfolojik olarak da farklı özellikler göstermektedir: Daha büyük ve farklı yaprak morfolojisine sahip olup, diğer türlerden ayrılmaktadır. Çiçek yapısı, özellikle spatula şekli ve rengi, diğer türlere göre belirgin farklılık göstermektedir. Çiçeklenme dönemi de diğer türlere kıyasla farklı zaman dilimindedir. Benzer şekilde, *Biarum davisii* subsp. *marmarisense* ve *Biarum rifatii* türleri de filogenetik ağaçta daha düşük destek değerleriyle ayrılmıştır. Bu durum, bu türlerin genetik olarak farklılaşmış olabileceğini ve muhtemelen morfolojik özelliklerinde de belirgin farklar bulunduğunu düşündürmektedir. Gelecekte bu türlerin morfolojik ve ekolojik faktörler açısından detaylı karşılaştırılması, genetik analizleri destekleyerek evrimsel süreçleri daha iyi anlamamıza yardımcı olabilecektir.

Meidan ve Assadi (2018) çalışmasında trnL gen bölgesi ile *Arum* ve *Biarum* cinsine ait türlerin genetik analizlerini gerçekleştirmiş ve türler arasındaki filogenetik ilişkiler, morfolojik araştırmaları yüksek düzeyde doğruladığını tespit etmiştir. Ayrıca *Arum giganteum*, İran'da yeni bir tür olarak tanıtılmış ve diğer *Arum* türlerinde görülmeyen bitkinin bütün boyutu, yaprak büyüklüğü ve çiçeklenme gibi özgün morfolojik özellikleriyle tanımlanmıştır. Meidan ve ark., (2016) çalışmasında ise Araceae familyasında yer alan üç farklı cinsin filogenetik ilişkileri incelenmiştir. Filogenetik analizler *Eminium*, *Arum* ve *Biarum* türleri farklı gruplar olarak değerlendirilmiş ve monofiletik bir klad içinde yer aldığını tespit etmişlerdir.

4. Sonuç ve Öneriler

Biarum türlerinin konumlarına göre analiz edildiğinde, evrimsel süreçte türlerin bir kısmının yakın genetik ilişkiler gösterdiği, diğerlerinin ise daha izole konumlarda yer aldığı görülmektedir. Türlerin genetik ayrışma düzeyleri, popülasyon geçmişi, coğrafi dağılım ve çevresel faktörler gibi unsurların filogenetik yapıya etki etmiş olabileceğini düşündürmektedir. Gelecekte bu türler arasındaki farklılaşmayı daha iyi anlayabilmek için coğrafi ve ekolojik verilerle desteklenmiş daha kapsamlı genetik analizlerin yapılması önerilmektedir.

Teşekkür: Çalışmada, desteğini esirgemeyen Arş. Gör. Dilara Ulusal Sevimli'ye, Doç. Dr. Maruf Balos'a, maddi katkı sağlayan Harran Üniversitesi (BAP-20055 nolu proje)'ne ve TÜBİTAK- Bilim İnsanı destek Programları Başkanlığı (BİDEP)'na teşekkür ederiz.

Yazar katkısı: Cahit Çeçen ve Hasan Akan: Çalışmayı planlamış ve tasarlamıştır. Cahit Çeçen: Çalışma hakkında verileri toplamıştır. Arif Parmaksız: Moleküler analizleri yapmıştır. Hasan Akan: Makaleyi yazmıştır.

Etik kurul onayı: Bu çalışmada etik kurul onayına gerek duyulmamıştır.

5. Kaynaklar

- Agarwal, M., Shrivastava, N., Padh, H. 2008. Advances in molecular marker techniques and their applications in plant sciences. Plant Cell Rep, 27: 617–631. Doi: 10.1007/s00299-008-0507-z
- Akan, H., Balos, MM. 2008. Check-list of the genus *Biarum* Schott in the Flora of Turkey, with a new record for Turkey: *Biarum syriacum* (Spreng.) H. Riedl. Turk J Bot, 32(4):305–310.
- Alpınar, K. 2000. *Biarum* Schott in Davis PH (ed.), Flora of Turkey and the East Aegean Islands (Suppl. 2). Edinburgh: Edinburgh Univ. Press, Vol 11: 221.
- Boyce, PC. 2008. A taxonomic revision of *Biarum*. Curtis's Bot. Mag., 25(1): 2–17.
- Burke, SV., Grennan, CP., Duvall, MR. 2012. Plastome sequences of two New World bamboos—*Arundinaria gigantea* and *Cryptochloa strictiflora* (Poaceae)—extend phylogenomic understanding of Bambusoideae. Am. J. Bot, 99: 1951–1961. Doi: 10.3732/ajb.1200365
- Chen, X., Zhou, J., Cui, Y., Wang, Y., Duan, B., Yao, H. 2018. Identification of *Ligularia* herbs using the complete chloroplast genome as a super-barcode. Front. Pharmacol, 9: 695. Doi: 10.3389/fphar.2018.00695.

- Çeçen, C., Akan, H., Yıldırım, H. Balos, MM., 2022. *Biarum* × *cinarense* (Araceae), a new natural hybrid from SE Turkey. *Ann. Bot. Fenn.*, 59(1): 67-73. Doi: 10.5735/085.059.0112
- Engler, A. 1920. Araceae, Pars generalis et index familiae generalis. In A. Engler [ed.], *Das Pfl anzenreich* 74 (IV.23A), 1-71.
- Govaerts, R., DG. Frodin, J., Bogner, J., Boos, P., Boyce, B., Cosgriff, ... TB Croat. 2002. World checklist and bibliography of Araceae and Acoraceae. Royal Botanic Gardens, Kew, UK.
- Grayum, MH. 1990. Evolution and phylogeny of the Araceae. *Ann. Missouri Bot. Gard.*, 77: 628 – 697.
- Güner, A., Kandemir, A., Menemen, Y., Yıldırım, H., Aslan, S., Ekşi, G., Güner, I., Çimen, AÖ. 2018. Resimli Türkiye Florası. ANG Vakfı Nezahat Gökyiğit Botanik Bahçesi Yayınları. İstanbul. 2: 520-541
- Karakaya, O., Yaman, M., Balta, F., Yılmaz, M., Balta, MF. 2023. Assessment of genetic diversity revealed by morphological traits and ISSR markers in hazelnut germplasm (*Corylus avellana* L.) from eastern black sea region, Turkey. *Genet Resour Crop Evol*, 70(2): 525-537. Doi:10.1007/s10722-022-01444-0
- Kishor, R., Sharma, GJ. 2018. The use of the hypervariable P8 region of trnL (UAA) intron for identification of orchid species: evidence from restriction site polymorphism analysis. *PLoS ONE*, 13(5): 1-20. Doi: 10.1371/journal.pone.0196680
- Kumar, S., Stecher, G., Li, M., Knyaz, C., Tamura, K. 2018. MEGA X: Molecular evolutionary genetics analysis across computing platforms. *Mol. Biol. Evol.*, 35: 1547-1549. Doi. org/10.1093/molbev/msy096.
- Mayo, SJ., Bogner, J. Boyce, PC. 1997. The genera of Araceae. Royal Botanic Gardens, Kew, UK.
- Meidan, LJG., Assadi, M. 2018. Genetic diversity of *Arum* L. based on plastid marker. *Iranian Journal of Plant Physiology*, 8(3), 2479-2485. Doi: 10.30495/ijpp.2018.541006.
- Meidan, L., Mehregan, I., Assadi, M., Farajzadeh, D. 2016. Molecular phylogeny of the family Araceae as inferred from the nuclear ribosomal ITS data. *Iranian Journal of Genetics and Plant Breeding*, 5(1), 32-39. Doi: 10.30479/IJGPB.2016.1041.
- Mill, RR., 1984. *Biarum* in Davis, P.H. (ed.), *Flora of Turkey*. Edinburgh University Press, 8:41-63.
- Palaz, EB., Demirel, F., Adali, S., et al. 2023. Genetic relationships of salep orchid species and gene flow among *Serapias vomeracea* × *Anacamptis morio* hybrids. *Plant Biotechnol Rep*, 17: 315-327. Doi:10.1007/s11816-022-00782-w
- Ruhfel, BR., Gitzendanner, MA., Soltis, PS., Soltis, DE., Burleigh, JG. 2014. From algae to angiosperms-inferring the phylogeny of green plants (Viridiplantae) from 360 plastid genomes. *BMC Evol. Biol.* 14:23. Doi: 10.1186/1471-2148-14-23.
- Schott, HW. 1860. *Prodromus systematis aroidearum. Congregationis Mechitharisticae*, Vienna, Austria.
- Wariss, HM., Yi, TS., Wang, H., Zhang, R. 2018. The chloroplast genome of a rare and an endangered species *Salweenia bouffordiana* (Leguminosae) in China. *Conserv. Genet. Resour*, 10: 405-407. Doi: 10.1007/s12686-017-0836-8
- Yang, Z., Wang, G., Ma, Q., Ma, W., Liang, L., Zhao, T. 2019. The complete chloroplast genomes of three Betulaceae species: implications for molecular phylogeny and historical biogeography. *Peer J*, 7: e6320. Doi: 10.7717/peerj.6320
- Yıldırım, H., Altıoğlu, Y., 2016. *Biarum rifatii* (Araceae): Güneybatı Anadolu'dan yeni bir Yılanpancarı (*Biarum* Schott.) türü. *Bağbahçe Bilim Dergisi*, 3(2): 12-19.
- Yıldırım, H. 2018. *Biarum* Schott. Şu Eserde: Güner A, Kandemir, A, Menemen, Y, Yıldırım, H, Aslan, S, Ekşi, G, Güner, I. ve Çimen, AÖ (edlr.). Resimli Türkiye Florası 2: 520-541. ANG Vakfı Nezahat Gökyiğit Botanik Bahçesi Yayınları. İstanbul.
- Yıldırım, H., Balos, M. M., Altıoğlu, Y. and Akan, H., 2016. *Biarum aleppicum* J. Thiébaud (Araceae): Türkiye için yeni bir tür kaydı. *Bağbahçe Bilim Dergisi*, 3(2):12-19.
- Yılmaz, A. 2023. The importance of trnL/trnF IGS region in the taxonomy of the genus *Potentilla* L. *Trakya Univ J Nat Sci*, 24(1): 71-76. Doi: 10.23902/trkjniat.1252980
- Yu, X., Wang, W., Yang, H., Zhang, X., Wang, D., Tian, X. 2021. Transcriptome and comparative chloroplast genome analysis of *Vincetoxicum versicolor*: insights into molecular evolution and phylogenetic implication. *Front. Genet.*, 12: 602528. Doi: 10.3389/fgene.2021.602528
- Yulita, K.S. 2013. Secondary structures of chloroplast trnL intron in dipterocarpaceae and its implication for the phylogenetic reconstruction. *HAYATI Journal of Biosciences*, 20(1): 31-39. Doi.org/10.4308/hjb.20.1.31.



Hibrit Enerji Sistemlerine Dayalı Mikro-Şebeke Tasarımı ve Optimizasyonu: Zonguldak-Elvanpazarcık Uygulaması

Design and Optimization of a Microgrid Based on Hybrid Energy Systems: A Case Study in Zonguldak-Elvanpazarcık

Nihat Pamuk*

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, Zonguldak İli sınırları içerisinde yer alan kırsal bölgeler için rüzgâr ve güneş enerjilerinin hibrit bir sistem olarak kullanıldığı dağıtık üretim tesislerine (mikro şebeke) yönelik bir model yapısı tasarlanmıştır. Bu model ile yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması, enerji üretiminde sürdürülebilirliğin sağlanması ve enerji çeşitliliğinin artırılması amaçlanmaktadır. Bu yaklaşım hem bölgesel enerji ihtiyaçlarının karşılanması hem de çevresel etkilerin azaltılması açısından önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada, HOMER Pro yazılımı kullanılarak Zonguldak ili Merkez ilçesine bağlı Elvanpazarcık beldesinde, 20 adet hanenin elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilecek bir mikro-şebeke sisteminin tasarlanması amaçlanmıştır. Bölgenin iklim verileri ve enerji yük ihtiyacı analiz edilerek, sistemde kullanılacak ekipmanlar bu veriler doğrultusunda belirlenmiştir. HOMER Pro programı aracılığıyla, seçilen ekipmanların ekonomik maliyet analizleri yapılmış ve rüzgâr-güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakların entegre edildiği optimum hibrit enerji sisteminin konfigürasyon modeli oluşturulmuştur. Bu model, bölgenin enerji ihtiyacını sürdürülebilir ve ekonomik bir şekilde karşılamayı amaçlamaktadır. Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda, en uygun sistemin rüzgâr türbini, fotovoltaiik (PV) panel ve dizel jeneratörden oluşan hibrit bir yapı olduğu belirlenmiştir. Bu sistemde; 13 adet rüzgâr türbini, 123 kW gücünde güneş paneli, 88 kW gücünde dizel jeneratör, 116 kW kapasiteli batarya bankası ve 81.1 kW gücünde inverter kullanılmıştır. Sistemin başlangıç sermayesi 475.210 bin \$, Net Şimdiki Maliyeti (NPC) 600.673 bin \$, Enerji Maliyeti (COE) 0.283 \$/kWh ve yıllık işletme maliyeti ise 10.834 bin \$ olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, sistemin toplam enerji üretiminin %99.8'inin yenilenebilir enerji kaynakları tarafından karşılandığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, sistemin hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik açıdan uygun bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Ekonomik fizibilite analizi, enerji yönetimi, hibrit güç sistemleri, HOMER Pro yazılımı, mikro-şebeke.

Abstract

In this study, a model structure for distributed generation systems (micro grid) where wind and solar energy are used as a hybrid system for rural areas within the borders of Zonguldak Province is designed. This model aims to popularize the use of renewable energy sources, ensure sustainability in energy production and increase energy diversity. This approach is considered an important step in both meeting regional energy needs and reducing environmental impacts. In this study, it is aimed to design a microgrid system that can meet the electrical energy needs of 20 households in Elvanpazarcık town of Zonguldak province using HOMER Pro software. The climate data and energy load requirements of the region were analyzed and the equipment to be used in the system was determined with these data. Using the HOMER Pro program, economic cost analyses of the selected equipment were performed and the configuration model of the optimum hybrid energy system in which renewable energy sources such as wind and solar energy were integrated was created. This model aims to meet the energy needs of the region in a sustainable and economical way. As a result of the optimization studies, it was determined that the most suitable system is a hybrid structure consisting of a wind turbine, photovoltaic (PV) panel and diesel generator. This system includes 13 wind turbines, 123 kW solar panels, 88 kW diesel generators, 116 kW battery banks and 81.1 kW inverters. The initial capital of the system is \$475.210, Net Present Cost (NPC) is \$600.673, Cost of Energy (COE) is 0.283 \$/kWh and annual operating costs are \$10.834. In addition, it was determined that 99.8% of the total energy production of the system was provided by renewable energy sources. These results show that the system offers a viable solution in terms of both environmental sustainability and economic aspects.

Keywords: Economic feasibility analysis, energy management, hybrid power systems, HOMER Pro software, micro-grid.

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: nihatpamuk@beun.edu.tr

Nihat Pamuk orcid.org/0000-0001-8980-6913



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

1. Giriş

Geçmişten günümüze kadar, dünya genelinde enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla kömür ve doğalgaz gibi yenilenebilir enerji kaynakları yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak, bu kaynaklara olan bağımlılık, yeterli yeraltı kaynaklarına sahip olmayan ülkelerde enerji temini konusunda dışa bağımlılık sorununu beraberinde getirmektedir. Bununla birlikte, fosil yakıtların kullanımı, çevre üzerinde ciddi olumsuz etkilere yol açmakta ve sera gazı emisyonlarının artışına bağlı olarak küresel ısınmanın temel nedenlerinden biri haline gelmektedir. Bu durum, sürdürülebilir ve temiz enerji kaynaklarına geçişin önemini daha da artırmaktadır (Dincer ve Acar 2015). Yenilenebilir enerji kaynaklarının sınırlı sürdürülebilirliği, çevreye verdikleri zarar ve enerji temininde yarattıkları dışa bağımlılık sorunu, alternatif enerji kaynaklarına yönelik araştırma ve geliştirme çabalarını hızlandırmıştır. Bu kapsamda, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması hem çevresel etkilerin minimize edilmesi hem de enerji arz güvenliğinin sağlanması açısından önemli bir çözüm stratejisi olarak benimsenmiştir.

Nüfus artışı, sanayileşme ve teknolojik gelişmelerin insan yaşamında giderek daha fazla yer almasıyla birlikte, dünya genelinde enerji talebi önemli ölçüde artış göstermiştir. 18. yüzyılda ortaya çıkan Sanayi Devrimi'nden itibaren dünya nüfusu logaritmik bir eğilimle hızla artmıştır (Stern ve Kander 2012). Elektrik enerjisi bilimsel ve teknolojik ilerlemelerin etkisiyle, günümüz toplumlarının sosyal, ekonomik ve endüstriyel işleyişi açısından kritik bir gereksinim haline gelmiştir. Bu durum, enerji talebindeki sürekli artışı beraberinde getirmiş ve enerji kaynaklarının verimli kullanımı ile sürdürülebilirliği konularını küresel ölçekte öncelikli bir sorun haline getirmiştir. Elektrik enerjisinin küresel ölçekte sahip olduğu geniş pazar payı, devletlerin ekonomik kalkınma süreçlerini doğrudan etkileyen ve refah düzeylerinin artmasında belirleyici bir rol oynayan temel faktörlerden biri olarak öne çıkmaktadır (Altınay ve Karagöl 2005).

Dünya üzerindeki enerji kaynakları, temel özelliklerine göre iki ana gruba ayrılmaktadır. Doğal süreçlerle kendini yenileyebilen ve sürekli olarak kullanılabilen kaynaklar, "yenilenebilir enerji kaynakları" olarak adlandırılmaktadır (Sayed vd. 2023). Bu kaynaklar, çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımakta ve gelecekteki enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında kritik bir rol oynamaktadır. Rüzgâr, güneş ve hidroelektrik enerjisi, yenilenebilir enerji kaynaklarına örnek olarak gösterilebilir. Yenilenebilir enerji kaynakları ise sınırlı rezervlere sahip olan ve tüketildikçe azalan kaynaklardır. Dünya genelinde en yaygın kullanılan enerji kaynak-

ları arasında yer alan petrol, doğalgaz ve kömür, yenilenebilir enerji kaynakları kategorisinde değerlendirilmektedir. Bu kaynaklar, fosil yakıtlar olarak da adlandırılmakta olup, enerji üretiminde önemli bir paya sahiptir (Güney 2019).

Petrol, doğalgaz ve kömür gibi yenilenebilir enerji kaynakları, endüstriyel gelişim ve ekonomik büyüme süreçlerinde temel bir rol oynamıştır. Ancak, fosil yakıtların sınırlı rezervlere sahip olması ve çevresel etkileri nedeniyle, sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelim giderek artmaktadır (Yuksel ve Kaygusuz 2011). Ülkeler, yeraltı kaynakları bakımından yetersiz olmaları sebebiyle enerji ihtiyaçlarını önemli ölçüde dış kaynaklardan sağlamak durumunda kalmaktadır. Bu durum, enerji alanında dışa bağımlılık sorununu ortaya çıkarmış ve ülkelerin ekonomik yapılarını, zaman zaman da siyasi istikrarlarını olumsuz yönde etkilemiştir. Enerji güvenliği bağlamında yaşanan bu bağımlılık, ulusal ekonomiler üzerinde ciddi riskler yaratmış ve enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesine yönelik stratejilerin geliştirilmesini bir zorunluluk haline getirmiştir. Bu süreç, enerji arz güvenliğinin sağlanması ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılması açısından kritik bir öneme sahiptir.

Fosil yakıtların çevresel tahribata yol açması, sınırlı rezervleri nedeniyle sürdürülebilirliklerinin zayıf olması ve fosil yakıt kaynaklarına sahip olmayan ülkelerde ekonomik bağımlılığa sebep olması, küresel ölçekte alternatif ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi zorunlu hale getirmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının çevre üzerinde yarattığı olumsuz etkiler, enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi yoluyla sürdürülebilirliğin sağlanması gerekliliği ve enerji alanında dışa bağımlılığın azaltılması ihtiyacı, fosil yakıtlara alternatif enerji kaynaklarına yönelik araştırma ve geliştirme çabalarını hızlandırmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları ise çevresel etkilerinin minimal düzeyde olması, sürekli yenilenebilir özelliği, sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu olması ve özellikle enerji ithalatına bağımlı ülkelerde yerli ve milli enerji üretim kapasitesini artırma potansiyeli gibi avantajlarıyla, yenilenebilir enerji kaynaklarına karşı etkili ve çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Demirtas 2013).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemli özelliklerinden biri, diğer enerji kaynakları ile entegre edilerek hibrit sistemler oluşturabilmesidir. Hibrit enerji sistemleri, birden fazla enerji üretim teknolojisinin bir arada çalışarak elektrik yükünü beslediği sistemlerdir (Nema vd. 2009). Bu sistemler, hem şebekeye bağlı olarak hem de şebekeden bağımsız bir şekilde çalışabilme kapasitesine sahiptir. Hibrit enerji sistemlerinin kullanılması durumunda, yaz aylarında rüzgâr

enerjisi üretimindeki azalma, güneş enerjisi üretimindeki artış ile dengelenebilmektedir. Benzer şekilde, kış aylarında güneş enerjisi üretiminin düşmesi, rüzgâr enerjisi üretimindeki artış ile telafi edilebilmektedir. Aynı durum, geceleri güneş enerjisinden yararlanılmadığı zamanlar için de geçerlidir. Bu sayede, enerji üretiminin sürekliliği ve sistemin kararlılığı sağlanarak, kesintisiz bir enerji arzı mümkün hale gelmektedir.

Dağıtık üretim tesisleri (mikro-şebekeler), şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız olarak işletilebilen küçük ölçekli enerji sistemleridir (Aghajani ve Ghadimi 2018). Bu tesisler, enerji üretimini büyük ölçüde yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlamaktadır. Düşük iletim kayıpları, maliyet etkinliği ve yüksek güvenilirlikleri nedeniyle, enterkonnekte şebekeye alternatif bir enerji üretim modeli olarak öne çıkmaktadır. En önemli avantajlarından biri, hem şebeke ile entegre çalışabilme hem de bağımsız bir yapı içinde işletilebilme kapasitesine sahip olmasıdır (Moghaddas-Tafreshi vd. 2019). Özellikle kırsal bölgeler ve merkezi şebekeye uzak yerleşim alanlarında, kesintisiz elektrik arzının sağlanması ve altyapı yetersizliklerinden kaynaklanan sorunların giderilmesi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Sanayi bölgelerinde ise bu tesisler, enerji kalitesini artırmak ve enerji arzının güvenilirliğini sağlamak amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır (Yousefikhah vd. 2025).

HOMER Pro yazılımı, şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemlerinin optimizasyonu üzerine yapılan çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yazılım, farklı coğrafi bölgelerdeki enerji ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla tasarlanan hibrit sistemlerin bileşenlerinin seçimi, boyutlandırılması ve ekonomik analizlerinin yapılmasında etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır. Örneğin, Swarnkar ve arkadaşları, Hindistan'da bulunan Rajasthan Teknik Üniversitesi kampüsünün elektrik ihtiyacını karşılamak üzere PV ve biyokütle temelli bir hibrit sistem tasarlamışlardır (Swarnkar vd. 2016). Bu çalışmada, biyokütle potansiyeli ve maliyeti, güneş ısıtım verileri ve farklı yük koşullarına yönelik hassasiyet analizleri HOMER Pro yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Benzer şekilde Said ve arkadaşları, Tanzanya'nın çeşitli bölgelerinde yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı hibrit sistemler kurarak elektrik ihtiyacını karşılamayı hedeflemişlerdir. Bu kapsamda, sistem bileşenlerinin seçimi ve boyutlandırılması için HOMER Pro yazılımından yararlanmışlardır (Said vd. 2024). Yapılan analizler sonucunda, PV-rüzgâr-dizel-batarya hibrit sisteminin, diğer alternatiflere kıyasla birim elektrik enerjisi maliyeti açısından daha avantajlı ol-

duğu tespit edilmiştir. Niringiyimana ve ekibi ise, Ruanda'da elektrik şebekelerinin kurulumunun ekonomik olarak uygun olmadığı kırsal bölgelerde, ailelerin elektrik ve termal enerji ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla bir hibrit enerji sistemi simülasyonu gerçekleştirmiştir (Niringiyimana vd. 2023). Bu çalışmada, hidro türbinler, PV modülleri, jeneratörler, aküler, konvertörler, şebeke yükleri ve transformatörler gibi bileşenler kullanılarak, enerji ihtiyacının güvenilir bir şekilde karşılanabileceği ortaya konulmuştur.

Mbasso ve arkadaşları, konut binalarında balık yetiştiriciliği için gerekli olan enerji ve oksijen ihtiyacını karşılayacak şekilde tasarlanan bağımsız bir yenilenebilir hibrit sistemin tekno-ekonomik analizini HOMER Pro yazılımı ile gerçekleştirmiştir (Mbasso vd. 2023). Kumar ve ekibi ise, yerleşim yerlerinden uzakta konumlandırılan ATM makinelerinin elektrik ihtiyacını karşılamak amacıyla, minimum maliyet esasına dayalı bir fizibilite çalışması yürütmüş ve bu çalışmada HOMER Pro yazılımından faydalanmıştır (Kumar vd. 2016). Rahmat ve arkadaşları, Malezya'da yenilenebilir enerji teknolojilerinin entegrasyonuna yönelik yatırım analizlerinin optimizasyonunu HOMER Pro kullanarak gerçekleştirmiştir (Rahmat vd. 2022). Son olarak, Sharma ve ekibi, Vietnam'da şebekeden bağımsız bir güneş/biyogaz/pil hibrit enerji sisteminin elektrik ihtiyacını karşılamaya yönelik tekno-ekonomik analizler gerçekleştirmiş ve bu çalışmada HOMER Pro yazılımının etkinliğini göstermiştir (Sharma vd. 2024). Yapılan tüm çalışmalar, HOMER Pro yazılımının, farklı coğrafi ve ekonomik koşullarda yenilenebilir enerji sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonu için güçlü bir araç olduğunu ortaya koymaktadır. Yazılım, hem teknik hem de ekonomik açıdan uygun çözümler sunarak, sürdürülebilir enerji sistemlerinin yaygınlaştırılmasına önemli bir katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmada, HOMER Pro yazılımı kullanılarak Zonguldak ili Merkez ilçesine bağlı Elvanpazarcık beldesindeki elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilecek bir mikro-şebeke sisteminin tasarlanması amacıyla, farklı enerji üretim senaryoları için en iyi yenilenebilir enerji kaynakları kullanım yaklaşımları belirlenmiştir. Güneş, rüzgâr, dizel jeneratör ve hibrit sistemlerin yatırım getirileri ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Elvanpazarcık beldesi kırsal ve şehir merkezine uzak bir bölge olması nedeniyle, şebekeden bağımsız olacak şekilde ve yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı dağıtık bir elektrik üretim tesisi tasarlanmıştır. Söz konusu tesis, 20 hanelin elektrik ihtiyacını karşılayacak şekilde modellenmiştir. Sistem yükünün belirlenmesi amacıyla, bir hanede kullanılan elektrikli cihazların güç tüketimleri hesaplanmıştır.

Rüzgâr türbini, batarya, PV panel, inverter ve dizel jeneratör gibi bileşenlerin teknik özellikleri ve ekonomik parametreleri HOMER Pro yazılımında tanımlanarak sistem benzetimleri gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışma sayesinde kırsal konut özelliklerine sahip olan bölgelerde tek bir yenilenebilir enerji teknolojisi kullanılması yerine, PV-rüzgar-dizel jeneratör-batarya gibi hibrit bir enerji sisteminin tercih edilmesi ile daha avantajlı sonuçlar elde edilmektedir. Hibrit yenilenebilir enerji sistemleri sayesinde daha hızlı geri dönüş süresi, daha fazla maliyet tasarrufu ve daha az çevre kirleticisi emisyon değerleri elde edilmiştir. Yenilenebilir enerji sistemlerindeki stratejiler değerlendirilirken, geri ödeme süresi, NPC değeri ve sistem emisyon değerleri yatırım kararlarını etkilemektedir. Çalışmada kullanılan teknoloji ile sistem bileşenlerinin maliyetleri, enerji kaynaklarının kullanılabilirliği, sistemde kullanılan bileşenlerin birim kazançları, daha hızlı geri ödeme süresi ve negatif yönde daha büyük NPC değerleri ile daha yüksek NPC değerleri elde edilmiş ve daha düşük sistem emisyon değerleri ile sürdürülebilir çevre çalışmalarına katkıda bulunulmuştur.

2. Gereç ve Yöntemler

Sistem tasarımı ve uygulama adımları üç ana kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda, bölgenin enerji kaynakları açısından verimliliği detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. İkinci kısımda, 20 adet konutun günlük enerji tüketimi hesaplanmış ve bu veriler doğrultusunda sistemde kullanılacak bileşenler belirlenmiştir. Ayrıca, bu bileşenlere ilişkin maliyet analiz-

leri gerçekleştirilmiştir. Son olarak, önceki kısımlarda elde edilen iklimsel ve enerji verileri kullanılarak, tasarlanan sistemin optimizasyonu ve benzetimi HOMER Pro yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

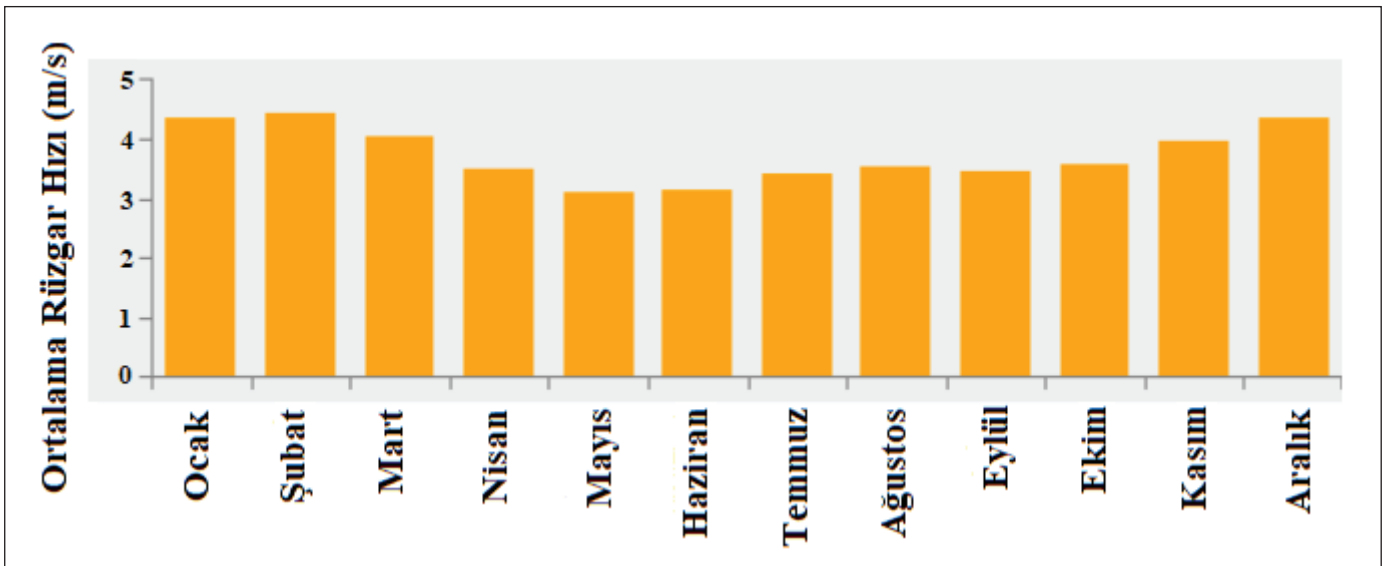
2.1. Bölgenin Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının İncelenmesi

Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr ve güneş enerjisi kullanılarak sistemin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarım aşamasında kullanılacak olan meteorolojik ve enerji verileri, NASA'nın küresel enerji kaynaklarına yönelik tahmin verilerini içeren veri tabanından temin edilmiştir (NASA POWER 2024). Şekil 1'de çalışma bölgesine ait aylık ortalama rüzgar hızı verileri gösterilmiştir. Şekil 2'de ise aylık güneş radyasyon verileri gösterilmiştir.

Bölgede ölçülen yıllık ortalama günlük güneş radyasyonu 4.21 kWh/m²/gün olarak belirlenmiştir. Güneş radyasyonu, Haziran ve Temmuz aylarında en yüksek değerlerine ulaşırken, Aralık ve Ocak aylarında en düşük seviyelerde görülmektedir. Hava açıklığı indeksinin yıllık ortalaması ise 0.51 olarak hesaplanmıştır. Bölgedeki yıllık ortalama rüzgar hızı 3.73 m/s olarak belirlenmiş olup, Ocak, Şubat ve Aralık aylarında en yüksek değerlerine ulaşmaktadır. Bununla birlikte, bölgede yıl boyunca rüzgar hızının dengeli bir dağılım gösterdiği tespit edilmiştir.

2.2. Sistem Bileşenleri

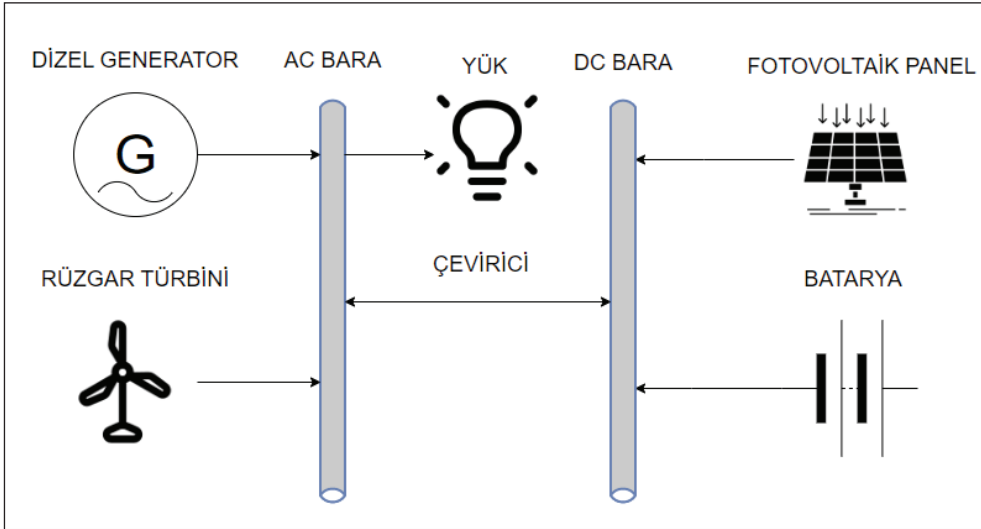
Şebekeden bağımsız olarak çalışan hibrit bir enerji sisteminde, altı temel bileşen bulunmaktadır. Bu bileşenler dizel je-



Şekil 1. Aylık ortalama rüzgar hızı grafiği.



Şekil 2. Aylık güneş radyasyon değeri grafiği.



Şekil 3. Şebekeden bağımsız hibrit sistem yapısı.

neratör, rüzgar türbini, PV panel, batarya, inverter ve yük'tür. Şekil 3'te bu bileşenlerin entegrasyonu ile oluşturulan hibrit sistem yapısı gösterilmiştir. Çizelge 1'de ise tek bir konuta ait günlük enerji tüketimi verilmiştir.

Sistemde 20 adet evin günlük enerji tüketim değerleri yük olarak belirlenmiştir. Toplam yük 479.6 kWh/gün olarak elde edilmiştir. Sistemde kullanılacak rüzgar türbininin seçiminde, bölgenin iklim koşulları, rüzgar hızı dağılımı ve sistemin hesaplanan yük profili gibi temel kriterler dikkate alınmıştır. Bu kriterler doğrultusunda, 10 kW gücüne sahip Eocyle EO10 model rüzgar türbini tercih edilmiştir. Türbinin kurulum maliyeti kW başına 800 \$ olarak belirlenirken, yıllık bakım ve işletim maliyetinin ise 100 \$ olacağı hesaplanmıştır. Sistemde kullanılacak PV panel modeli olarak, 1

Çizelge 1. Tek bir konuta ait günlük enerji tüketim değerleri.

Cihaz	Enerji tüketimi (kWh/gün)
Buzdolabı	4.800
Aydınlatma	1.440
Şarj cihazları	0.840
İndüksiyonlu ocak	4.000
Elektrikli ısıtıcı	3.600
Bilgisayar	0.450
Televizyon	0.450
Fırın	4.400
Bulaşık makinası	1.000
Çamaşır makinası	1.000
Mikrodalga fırın	2.000

kW gücündeki Peimar SG290MFB PV panel tercih edilmiştir. Panelin kurulum maliyeti kW başına 800 \$ olarak hesaplanırken, yıllık bakım ve işletim masraflarının ise 10 \$ olacağı öngörülmüştür. Batarya seçimi kapsamında, 2500 mAh kapasiteli Hoppecke 20 OPzS 2500 modeli tercih edilmiştir. Bir adet bataryanın maliyeti 1500 \$ olarak belirlenirken, yıllık bakım ve işletim masraflarının ise 10 \$ olacağı hesaplanmıştır. Sistemde inverter olarak, 1 kW kapasiteli XTS 1400-48 modeli kullanılmıştır. Her bir inverterin maliyeti 1000 \$ olarak belirlenmiş olup, yıllık bakım ve işletme maliyetleri ise 10 \$ olarak hesaplanmıştır. Sistemde kullanılacak jeneratörün kapasitesi, HOMER Pro programının optimizasyon analizleri doğrultusunda belirlenmiştir. Dizel jeneratörün kurulum maliyetinin 1 kW başına 200 \$ olduğu tespit edilmiştir. Yakıt maliyeti 1.3 \$/L, bakım ve işletme maliyetleri ise saatlik 3 \$ olarak hesaplanmıştır. Çizelge 2'de, sistemde kullanılan bileşenlerin yanı sıra bu bileşenlere ait kurulum maliyetleri ve yıllık işletme-bakım giderleri gösterilmiştir.

Çizelge 2. Sistem bileşenleri, kurulum maliyetleri ile yıllık işletme ve bakım giderleri.

Sistem bileşeni	Kurulum maliyeti	Yıllık işletme-bakım gideri
Rüzgar türbini	800 \$/kW	100 \$/kW
PV panel	800 \$/kW	100 \$/kW
Batarya	1500 \$	10 \$
İnverter	1000 \$/kW	10 \$/kW
Dizel jeneratör	200 \$/kW	3 \$/kW (saatlik)

2.3. HOMER Pro Uygulaması

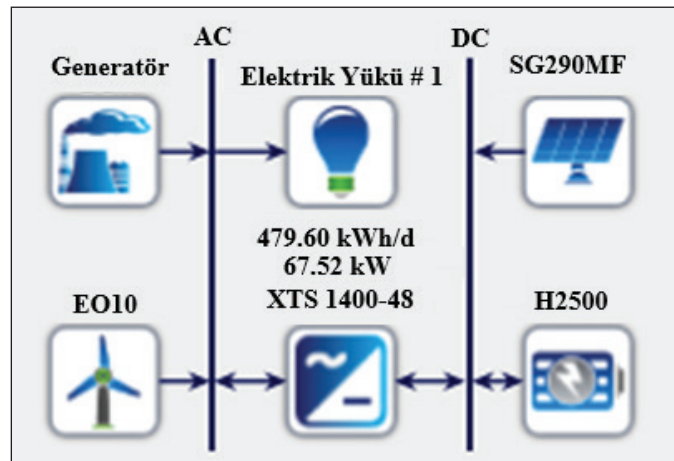
Yapılan çalışmada, sistem optimizasyonu, elektrik enerjisi analizi ve ekonomik değerlendirmeler için HOMER Pro yazılımı kullanılmıştır. HOMER Pro, binaların enerji tüketimini analiz etme, yenilenebilir enerji kaynaklarını entegre etme ve enerji verimliliğini artırma amacıyla geliştirilmiş bir simülasyon programıdır (Khalil vd. 2021). Bu yazılım, tasarlanan sistemlerin enerji tüketimini simüle ederek enerji tasarrufu potansiyelini ve maliyet azaltma imkanlarını ortaya koymaktadır. Ayrıca, farklı enerji kaynaklarının sistem üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla senaryo analizleri de gerçekleştirebilmektedir. HOMER Pro uygulamasında yapılan analizler, beş temel aşamaya ayrılmaktadır. İlk aşamada, bölgenin iklim koşulları, yükün enerji tüketim verileri, kullanılacak ekipmanların teknik özellikleri ve maliyet parametreleri programa girilerek modelleme süreci baş-

latılmaktadır. Şekil 4'te HOMER Pro'da oluşturulan hibrit enerji sisteminin modeli gösterilmiştir.

HOMER Pro yazılımı uygulanan senaryoların benzetimini gerçekleştirerek enerji tüketiminin detaylı bir şekilde analiz edilmesine olanak sağlar. Simülasyon sonuçları, enerji tüketimi, enerji maliyetleri ve çevresel etkiler gibi çeşitli faktörler temel alınarak hesaplanır. Elde edilen sonuçlar kapsamlı bir şekilde incelenir ve toplam enerji tüketimini minimize etmek, enerji maliyetlerini optimize etmek ve sistemin çevresel etkilerini azaltmak amacıyla en uygun senaryolar belirlenir. Çalışmanın sonunda, tüm bu veriler raporlanarak sistemin performans analizi gerçekleştirilir ve bulgular değerlendirilir (Pamuk 2024).

Programda, enerji verimliliği, kullanılan ekipman ve malzemeler gibi faktörler göz önünde bulundurularak detaylı bir enerji modeli oluşturulmuştur. Enerji tüketimini azaltmak amacıyla farklı senaryolar geliştirilmiş ve bu senaryolar çerçevesinde enerji kaynaklarının değiştirilmesi, enerji verimliliğini artırıcı önlemler alınması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme entegre edilmesi gibi uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Bu adımlar, sistemin hem çevresel hem de ekonomik açıdan daha sürdürülebilir hale getirilmesini sağlamıştır.

HOMER Pro programında kullanılan NPC ve Birim COE değerleri, sistemin çevresel ve ekonomik analizinde kritik bir rol oynamaktadır. NPC, sistemin kullanım ömrü boyunca yapılan toplam harcamalardan elde edilen kar değerlerinin çıkartılması ile hesaplanmaktadır. Bu harcamalar, başlangıç yatırım maliyetleri, bakım ve işletim giderleri ile kullanım süresi dolan ekipmanların yenilenme maliyetlerini içermektedir. Sistemin kar miktarı ise geri dönüşüm aşamasından sağlanan kazanç değerleri ve şebekeye satılan enerjiden elde



Şekil 4. Hibrit enerji sistem modeli.

edilen gelirlerden oluşmaktadır. Bu değerler, sistemin ekonomik açıdan uygunluğunu değerlendirmek ve en verimli maliyet çözümünü belirlemek için kullanılmaktadır (Ur Rashid vd. 2022). Denklem 1'de birim COE değerinin eşitliği gösterilmiştir.

$$COE = \frac{[C_{yt} - (C_b \cdot H_s)]}{E_s} \quad (1)$$

Denklem 1'de C_{yt} yıllık üretim maliyetini, C_b ısıtıcı maliyetini, H_s termal yük tüketimini, E_s ise toplam yük tüketimini temsil etmektedir. Birim COE değeri, üretilen faydalı elektrik enerjisinin kilowatt-saat (kWh) başına ortalama maliyetini ifade etmektedir (Basheer vd. 2022). HOMER Pro yazılımında yukarıdaki eşitlik kullanılarak yıllık elektrik üretim maliyet değeri (toplam yıllık maliyetten termal yükü sağlama maliyetinin çıkarılmasıyla elde edilen değer) hizmet verilen toplam elektrik yükü değerine bölünmektedir. Bu hesaplama, enerji sisteminin ekonomik verimliliğini değerlendirmek için kullanılan temel bir parametredir.

Hibrit enerji sistemlerine dayalı şebeke tasarımlarının ekonomik analizlerinde, türbin ve panel kurulum maliyetleri ile bakım giderlerinin doğru bir biçimde hesaplanması, sistemin finansal sürdürülebilirliği açısından büyük önem arz etmektedir. Bu hesaplamalar, projelerin uzun vadeli karlılık oranını ve yatırımın geri dönüş süresini doğru bir şekilde değerlendirebilmek için gereklidir. Ekonomik analizde yaygın olarak tercih edilen yöntemlerden biri, Seviye Maliyet Modeli (LCOE) olarak bilinen yaklaşımdır (Swarnkar vd. 2016). LCOE, bir enerji üretim sisteminin toplam maliyetlerinin, o sistem tarafından üretilen enerji miktarına bölünmesiyle elde edilen bir ölçüttür. Bu model, farklı enerji üretim teknolojilerinin karşılaştırılmasında ve yatırımların ekonomik verimliliğinin değerlendirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Denklem 2'de LCOE modelinin eşitliği gösterilmiştir.

$$LCOE = \frac{capex + \sum_{t=1}^n Opex_t}{\sum_{t=1}^n E_t} \quad (2)$$

Denklem 2'de $Capex$ başlangıç yatırım maliyetlerini, (kurulum, altyapı vb.) $Opex_t$ her yıl için operasyonel ve bakım maliyetlerini, E_t her yıl üretilen enerji miktarını (kWh), n ise sistemin ömrünü (yıl olarak) temsil etmektedir. Denklem 2, enerji başına maliyetin hesaplanmasına olanak tanırken, aynı zamanda yatırımcıların karar alma süreçlerinde sistemin ekonomik etkilerini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. LCOE değeri, enerji üretim teknolojilerinin uzun vadeli

maliyetlerini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Bu nedenle farklı hibrit enerji sistemlerinin ekonomik verimlilikleri arasında karşılaştırma yapılmasına imkan tanımaktadır. Bu model yapısı, enerji üretim sistemlerinin finansal sürdürülebilirliğini sağlamaya yardımcı olmakta ve yatırımcıların en verimli ve etkili çözümleri seçmelerine olanak tanımaktadır.

Bunun yanı sıra, geri dönüş süresinde hibrit enerji sistemlerine dayalı şebeke tasarımlarında yenilenebilir enerji sistemlerinin ekonomik olarak değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılan bir başka yöntemdir. Yatırımın ne kadar sürede kendini amorti edeceğini belirlemek, projelerin finansal açıdan kabul edilebilirliğini anlamak için önemlidir. Geri dönüş süresi, başlangıç maliyetlerinin yıllık gelirlerle karşılaştırılması yoluyla hesaplanmaktadır (Niringiyimana vd. 2023). Denklem 3'de geri dönüş süresinin hesaplama eşitliği gösterilmiştir.

$$GeriDönüşSuresi = \frac{Capex}{YıllıkTasarruf} \quad (3)$$

Denklem 3'de $Capex$ yatırım maliyetini, $Yıllık Tasarruf$ ise yıllık gelir miktarını temsil etmektedir. Bu model, özellikle kısa vadeli finansal risklerin değerlendirilmesi ve yatırım kararlarının alınmasında önemli bir rol oynamaktadır (Said vd. 2024). Yatırımcılar, LCOE hesaplamaları sayesinde enerji üretim sistemlerinin finansal sürdürülebilirliğini daha sağlıklı bir biçimde analiz etmektedir. Bu süreç, yatırım kararlarının daha bilinçli ve verimli bir şekilde alınmasını sağlamaktadır.

NPC ve İç Verim Oranı (IRR), daha karmaşık ekonomik analiz yöntemleri olup, hibrid şebeke tasarımının gelecekteki nakit akışlarının değerini, mevcut yatırım maliyetleriyle karşılaştırarak sistemin kârlılığını değerlendirmeye olanak tanımaktadır (Rahmat vd. 2022). NPC, gelecekteki nakit akışlarının şimdiki değerinin, mevcut yatırım maliyetleriyle farkını hesaplayarak, yatırımın finansal açıdan olumlu olup olmadığına dair somut bir değerlendirme sunmaktadır. Bu yöntem, yatırımcıların projelerin uzun vadeli finansal sürdürülebilirliğini ve ekonomik verimliliğini daha kapsamlı bir biçimde analiz etmelerine yardımcı olmaktadır. Denklem 4'de NPC değerinin hesaplama eşitliği gösterilmiştir.

$$NPC = \sum \frac{R_t}{(1+i)^t} - Capex \quad (4)$$

Denklem 4'de R_t her yıl elde edilen nakit akışını (geliri), i iskonto oranını, t zaman dilimini (yıl), $Capex$ başlangıç yatırım maliyetini temsil etmektedir. IRR, bir yatırımın yıllık beklenen getirisini ölçen ve yatırımın kârlılığını değeren-

dirmeye yardımcı olan bir göstergedir. IRR, NPC değerinin sıfır olduğu iskonto oranını ifade etmektedir. IRR, NPC değerinin sıfır olduğu durumda sistemin yıllık getiri oranını belirlemektedir. Bu analizler, enerji projelerinin yalnızca kısa vadeli değil, aynı zamanda uzun vadeli finansal performanslarının da değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Özellikle yatırımcıların karar alma süreçlerinde, NPC ve IRR değerleri, projelerin kârlılık düzeyini niceliksel olarak ortaya koyarak daha bilinçli ve stratejik yatırım kararlarının alınmasına katkı sağlamaktadır.

Ekonomik modellemelerin doğruluğunu artıran bir diğer önemli yöntem duyarlılık analizidir (Mbasso vd. 2023). Duyarlılık analizi, belirli parametrelerde meydana gelen değişimlerin (örneğin, enerji fiyatları ve bakım maliyetleri) projenin toplam maliyetleri ve getirileri üzerindeki etkilerini değerlendirmektedir. Bu analiz, sistemin ekonomik performansını etkileyebilecek belirsizliklerin belirlenmesine yardımcı olmaktadır ve yatırımcılara farklı senaryolar altında sistemin nasıl bir performans sergileyebileceğine dair öngörüler sunmaktadır. Ayrıca, duyarlılık analizi, enerji projelerinin çevresel ve ekonomik belirsizliklere karşı dayanıklılığını değerlendirmede kritik bir rol oynamaktadır. Sonuç olarak, bu tür modellemeler hibrid yenilenebilir enerji sistemlerinin ekonomik analizlerinde temel bir araç olarak kullanılmakta olup, doğru ve bilinçli yatırım kararlarının alınmasına sağlam bir veri temeli oluşturmaktadır.

3. Bulgular ve Tartışma

HOMER Pro yazılımında modellenen sistem optimal çalışma şartları altında iki senaryo içermekte olup, her senaryo dört simülasyon sonucuna sahiptir. Her sistem için kurulum maliyeti, yenileme maliyeti, hurda maliyeti ve işletme-bakım maliyetleri karşılaştırıldığında, en büyük nakit çıkışı kurulum maliyetinden kaynaklanmaktadır. Buna karşılık, sistem maliyet özetinde en büyük nakit girişi işletme-bakım maliyetinden sağlanmaktadır. Her iki senaryoda da, dizel jeneratör-batarya-rüzgar hibrit sistemi, dizel jeneratör-batarya-PV hibrit sistemlerine kıyasla daha iyi NPC değerine sahiptir. Bu maliyet değerleri birinci senaryo için 1.67 milyon \$, ikinci senaryo için ise 1.14 milyon \$ olarak hesaplanmıştır. Dizel jeneratör-batarya-rüzgar hibrit sistemi, birinci senaryodaki PV sistemine kıyasla 4.93 yıl ve ikinci senaryodaki rüzgar türbini sistemine kıyasla 3.18 yıl daha kısa geri ödeme süresine sahiptir. Hibrit sistemin NPC değeri, birinci senaryoda 669.483 \$ ve ikinci senaryoda ise 912.560 \$ olarak hesaplanmıştır. Yenilenebilir enerji teknolojisinin entegrasyonu, geri ödeme süresini kısaltmış ve

sistemin şimdiki maliyetini arttırmıştır. PV ve rüzgar türbin sistemleri, hibrit sisteme kıyasla sırasıyla yılda 473 kg ve 312 kg daha fazla emisyon üretmektedir. Bu nedenle sistemle bütünleşmiş yenilenebilir enerji teknolojisi, sistem kaynaklı emisyon kirliliği değerlerini azaltmıştır. Hassasiyet analizi, yenilenebilir enerji sisteminin toplam NPC değeri ve CO₂ emisyonlarının, yenilenebilir enerji kaynaklarının bulunması ile sermaye maliyetinden önemli ölçüde etkilendiğini ortaya koymaktadır.

Dizel jeneratör sistemi, şebeke elektriğinden bağımsız olarak çalışabilen ve bu özelliğiyle enerji ihtiyacının karşılanmasında temel bir çözüm olarak kabul edilen bir sistemdir (Yasin ve Alsayed 2020). Çalışmada, 88 kW gücünde bir dizel jeneratör kullanılarak sistemin performansı ve maliyet analizleri incelenmiştir. Sistemin kurulum aşamasında gereken başlangıç sermayesi 17.600 \$ olarak hesaplanmıştır. Bunun yanı sıra, sistemin NPC değeri 28.2 milyon \$, COE değeri ise kWh başına 13.89 \$ olarak belirlenmiştir. Ayrıca, sistemin yıllık işletme ve bakım masrafları 2.43 milyon \$ olarak optimize edilmiştir. Bu parametreler, dizel jeneratör sisteminin hem ekonomik hem de teknik açıdan değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar, sistemin uzun vadeli kullanımında maliyet etkinliği ve sürdürülebilirlik açısından önemli bilgiler sunmaktadır. Şekil 5'te hibrit enerji sisteminden elde edilen optimal sistem parametreleri, sistemin performansı ve maliyet etkinliği gösterilmiştir.

Rüzgar türbini ve dizel jeneratörün entegre edildiği hibrit enerji sisteminde, 32 adet rüzgar türbini, 88 kW kapasiteli bir dizel jeneratör, 102 kW gücünde bir inverter ve 178 adet batarya kullanılarak sistemin teknik ve ekonomik performansı analiz edilmiştir. Sistemin kurulum aşamasında gereken başlangıç sermayesi 642.600 \$ olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, sistemin NPC değeri 869.959 \$, COE değeri kWh başına 0.429 \$ ve yıllık işletme ve bakım masrafları ise 19.633 \$ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, hibrit enerji sisteminin hem yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırması hem de dizel jeneratör ile sürekliliği sağlaması açısından ekonomik ve teknik açıdan uygun bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Elde edilen veriler, sistemin uzun vadeli kullanımında maliyet etkinliği, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından önemli bir referans oluşturmaktadır.

PV paneller ve dizel jeneratörden oluşan hibrit enerji sistemlerinde ise, 461 kW kurulu güce sahip PV paneller, 88 kW kapasiteli bir dizel jeneratör, 262 adet batarya ve 88 kW gücünde bir inverter kullanılarak sistemin teknik ve ekono-

Sistem Parametreleri					Maliyet				Sistem
SG290MFB (kW)	EO10	Jen (kW)	H2500	XTS1400-48 (kW)	NPC (\$)	COE (\$)	İşletme Maliyeti (\$)	Kurulum Maliyeti (\$)	Performans (%)
123	13	88.0	116	81.1	\$600.673	\$0.296	\$10.834	\$475.210	99.8
	32	88.0	178	102	\$869.959	\$0.429	\$19.633	\$642.600	99.5
461		88.0	262	88.0	\$1.01M	\$0.499	\$12.392	\$867.388	99.8
794	119	88.0		67.7	\$9.42M	\$4.65	\$669.483	\$1.67M	67.7
	140	88.0			\$11.7M	\$5.77	\$912.560	\$1.14M	54.1
1.440		88.0		74.4	\$17.2M	\$8.48	\$1.38M	\$1.24M	29.8
		88.0	39	34.0	\$23.6M	\$11.65	\$2.03M	\$110.100	0
		88.0			\$28.2M	\$13.89	\$2.43M	\$17.600	0

Şekil 5. Hibrit enerji sisteminin optimal sistem parametreleri, maliyet etkinliği ve performans değerleri.

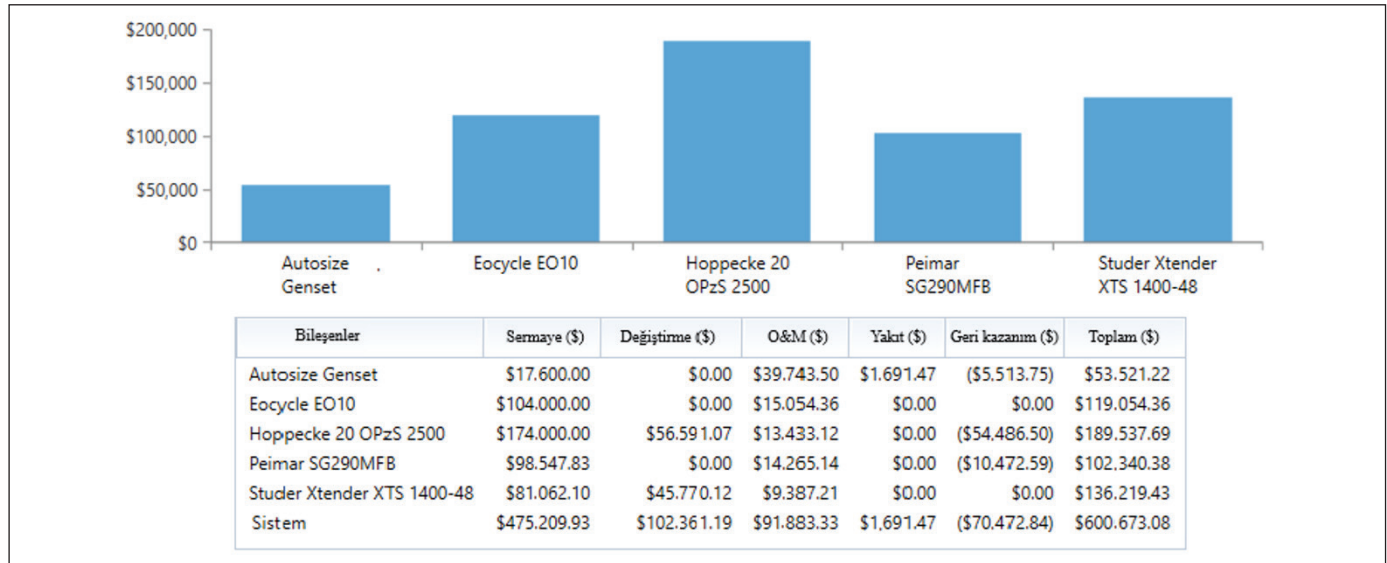
mik performansı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Sistemin kurulum maliyeti 867.388 \$ olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, sistemin NPC değeri 1.01 milyon \$, COE değeri kWh başına 0.499 \$ ve yıllık işletme ve bakım masrafları ise 12.392 \$ olarak belirlenmiştir. Bu bulgular, PV ve dizel jeneratörün entegre edildiği hibrit sistemin, hem yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını optimize etmesi hem de enerji sürekliliği sağlaması açısından ekonomik ve teknik olarak uygun bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Ayrıca, sistemin düşük işletme maliyetleri ve enerji maliyetleri, özellikle şebekeden uzak bölgelerde veya enerji erişiminin sınırlı olduğu alanlarda uygulanabilirliğini artırmaktadır. Elde edilen sonuçlar, hibrit sistemin sürdürülebilirlik ve maliyet etkinliği açısından önemli bir alternatif olduğunu ortaya koymaktadır.

Rüzgar türbini, PV paneller ve dizel jeneratörün entegre edildiği hibrit enerji sisteminde ise, 13 adet rüzgar türbini, 123 kW kurulu güce sahip güneş panelleri, 88 kW kapasiteli bir dizel jeneratör, 116 kW batarya bankası ve 81.1 kW gücünde bir inverter kullanılarak sistemin teknik ve ekonomik performansı kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Sistemin kurulum maliyeti 475.210 \$ olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, sistemin NPC değeri 600.673 \$, COE değeri kWh başına 0.296 \$ ve yıllık işletme ve bakım masrafları ise 10.834 \$ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, hibrit sistemin yenilenebilir enerji kaynaklarının (rüzgar ve güneş) kullanımını maksimize ederken, dizel jeneratör ile enerji sürekliliği sağlaması açısından hem çevresel hem de ekonomik olarak avantajlı bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Özellikle, düşük COE değeri ve işletme maliyetleri, bu hibrit sistemin şebekeden uzak bölgelerde veya enerji altyapısının yetersiz olduğu alanlarda uygulanabilirliğini artırmaktadır. Elde edi-

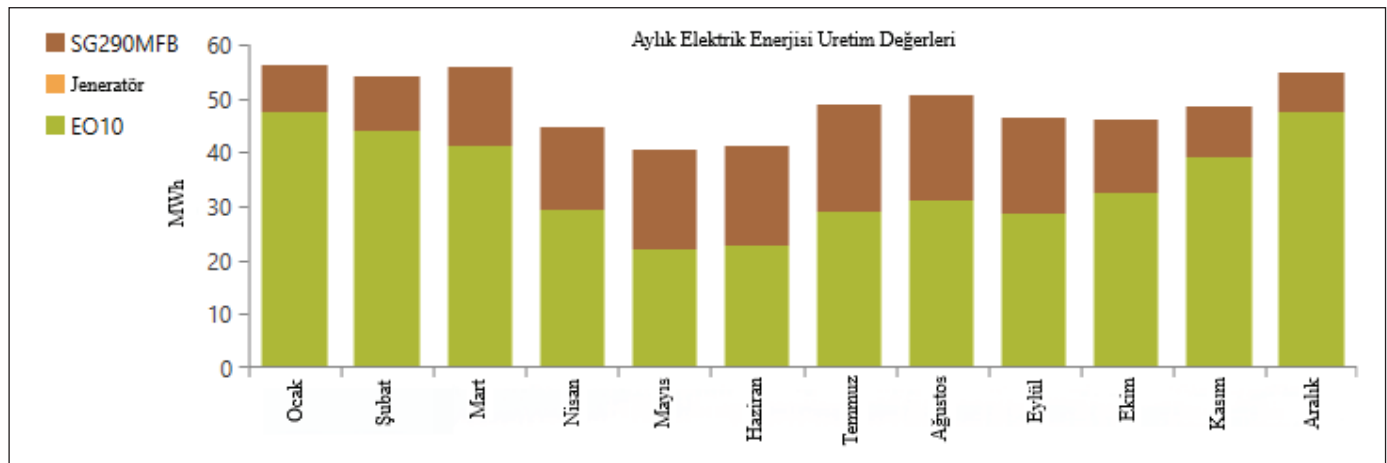
len bulgular, sistemin sürdürülebilirlik, enerji verimliliği ve maliyet etkinliği açısından önemli bir seçenek olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 6'da sistem bileşenlerine ait toplam NPC değerlerinin sonuçları gösterilmiştir.

Optimal sistemin maliyet analizleri incelendiğinde, sistem bileşenleri arasında en yüksek maliyetin 189.537 \$ ile batarya bileşenine ait olduğu tespit edilmiştir. Bataryayı, 136.219 \$ maliyeti ile inverter takip etmektedir. İnverter bileşeni sistemin en yüksek ikinci maliyetli unsuru olarak öne çıkmaktadır. İnverterden sonra, toplam maliyeti 119.054 \$ olan rüzgar türbinleri, sistemin üçüncü en maliyetli bileşenidir. PV paneller ise sistemde 102.340 \$ maliyetle yer almaktadır. Dizel jeneratörler ise 53.521 \$ maliyeti ile sistemdeki en düşük maliyetli bileşen olarak belirlenmiştir. Şekil 7'de sistemdeki enerji üretim bileşenlerinden elde edilecek olan aylık elektrik üretim değerleri gösterilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde, yük tarafından tüketilen toplam enerjinin, PV, rüzgar ve dizel jeneratör bileşenlerinden sağlanan enerjilerin toplamına eşit olduğu tespit edilmiştir. HOMER Pro yazılımı ile gerçekleştirilen simülasyon sonuçları doğrultusunda, yıllık toplam enerji talebinin %63.47'sinin rüzgar enerjisi tarafından karşılandığı belirlenmiştir. Benzer şekilde, PV panellerinin sağladığı enerjinin yıllık toplam enerji tüketiminin %36.49'unu oluşturduğu, jeneratör katkısının ise yalnızca %0.04 gibi oldukça düşük bir seviyede kaldığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, rüzgar ve güneş enerjisi kaynaklarının sistemin enerji ihtiyacını karşılamada baskın rol oynadığını, jeneratörün ise ancak çok sınırlı düzeyde bir destek sağladığını ortaya koymaktadır.

Şekil 8'de, sistem bileşenlerinin optimal büyüklüklerine bağlı olarak iki farklı senaryo incelenmiştir. İlk senaryoda, batarya, invertör ve güneş panelinin optimal büyüklüklerinin



Şekil 6. Sistem bileşenlerinin toplam NPC değeri sonuçları.



Şekil 7. Aylık elektrik enerjisi üretim değerleri.

sabitlendiği durumda, rüzgar türbini sayısının NPC üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. İkinci senaryoda ise, batarya ve invertörün optimal büyüklüklerinin sabitlendiği koşullarda, rüzgar türbini sayısı ve güneş paneli büyüklüklerinin NPC değeri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Her iki senaryoda da rüzgar türbini sayısı ile NPC değeri arasındaki ilişki grafiksel olarak gösterilmiştir. Bu analizler, sistem bileşenlerinin boyutlandırılmasının toplam maliyet üzerinde nasıl kritik bir rol oynadığını ve bileşen optimizasyonunun maliyet etkinliği açısından ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, rüzgar türbini sayısı ve güneş paneli kapasitesi gibi parametrelerin, sistemin ekonomik performansını doğrudan etkilediğini ve bu bileşenlerin optimal seçiminin maliyet etkinliği açısından büyük önem taşıdığını göstermektedir. Çizelge 3'te sistemde uygulanan

hibrit varyasyonlar ve bu varyasyonlara ait maliyet bilgileri gösterilmiştir.

Analiz sonuçlarına göre, sistemde üretilen enerjinin büyük bir kısmının rüzgar türbinleri tarafından sağlandığı tespit edilmiştir. PV panellerin ürettiği enerji, yalnızca yaz aylarında rüzgar türbinlerinin ürettiği enerjiye yaklaşmaktadır. Yaz ayları süresince sistemdeki toplam enerji üretiminin %70.4'ünün rüzgar türbinlerinden, %29.6'sının PV panellerden ve %0.0487'sinin ise dizel jeneratörlerden sağlandığı belirlenmiştir. Yenilenebilir enerji fraksiyon oranı %99.8 olarak hesaplanmış olup, bu durum sistemin büyük ölçüde yenilenebilir enerji kaynaklarına dayandığını ortaya koymaktadır. Sistemdeki toplam yıllık enerji üretimi 587.488 kW olarak belirlenmiştir. Üretilen enerjinin %67.8'ine denk gelen 398.217 kW'lık kısmı, yük tarafından tüketilen ener-

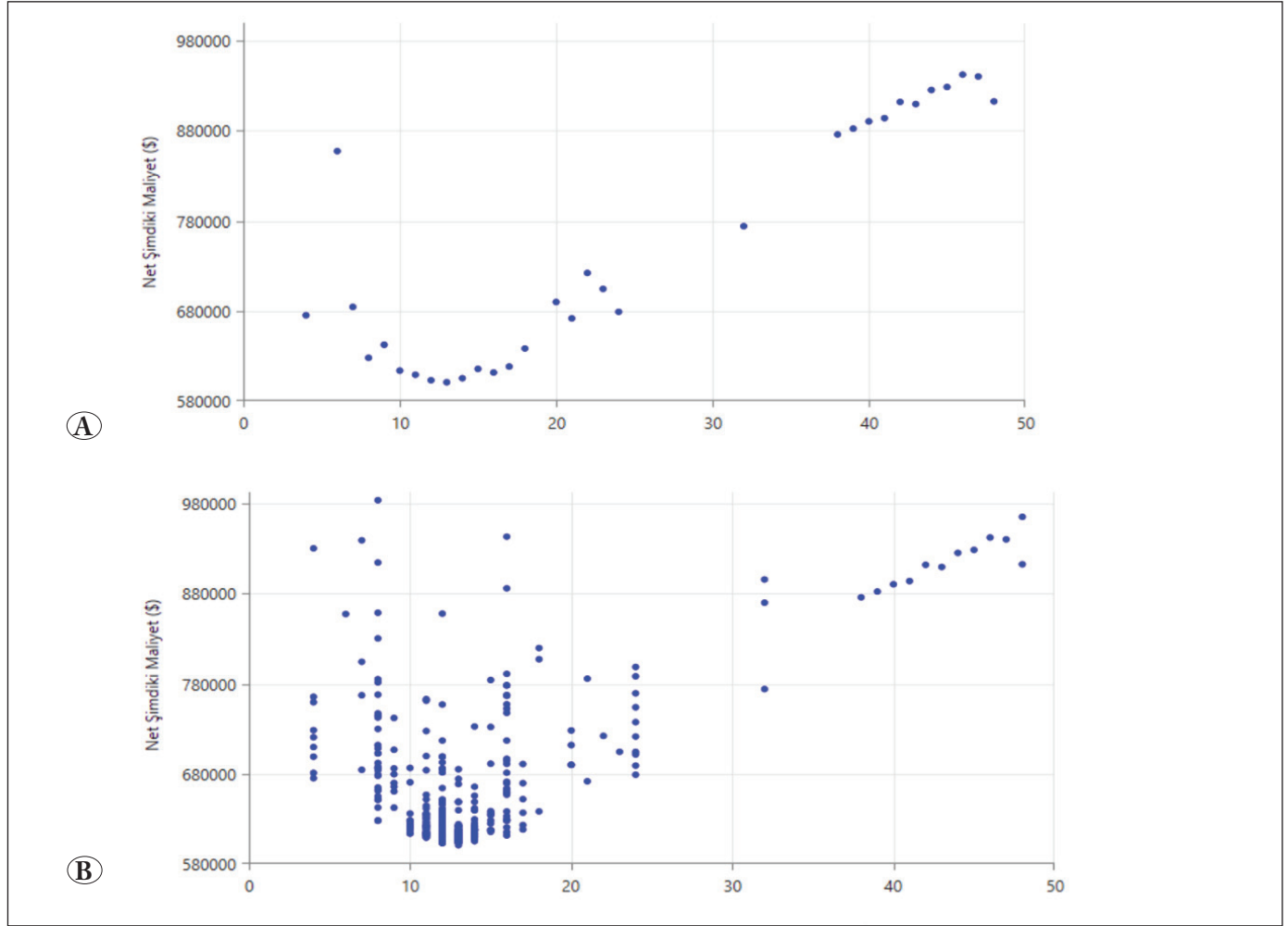
Çizelge 3. Sistemde uygulanan hibrit varyasyonlar ve maliyet bilgileri.

Senaryo	Sistem Tipi	Toplam NPC Değeri (\$)	COE Değeri (\$/kWh)
1	Rüzgar	325.37	0.178
	PV	512.54	0.112
	Batarya	3.09 M	4.012
	Dizel	28.2 M	13.89
	PV+Rüzgar	340.14	0.207
	Rüzgar+Batarya	1.16 M	0.853
	Rüzgar+Dizel	869.959	0.429
	PV+Batarya	913.527	0.513
	PV+Dizel	1.01 M	0.499
	Batarya+Dizel	12.183 M	6.541
	Rüzgar+PV+Dizel	600.673	0.296
	Rüzgar+PV+Batarya	815.317	0.795
	Batarya+PV+Dizel	1.67 M	0.894
	PV+Rüzgar+Batarya+Dizel	669.483	0.307
2	Rüzgar	310.25	0.185
	PV	520.12	0.116
	Batarya	3.10 M	3.952
	Dizel	29.3 M	14.27
	PV+Rüzgar	330.12	0.213
	Rüzgar+Batarya	1.15 M	0.883
	Rüzgar+Dizel	875.253	0.435
	PV+Batarya	920.450	0.546
	PV+Dizel	1.02 M	0.492
	Batarya+Dizel	12.462 M	6.432
	Rüzgar+PV+Dizel	607.462	0.314
	Rüzgar+PV+Batarya	826.514	0.813
	Batarya+PV+Dizel	1.14 M	0.718
	PV+Rüzgar+Batarya+Dizel	912.560	0.466

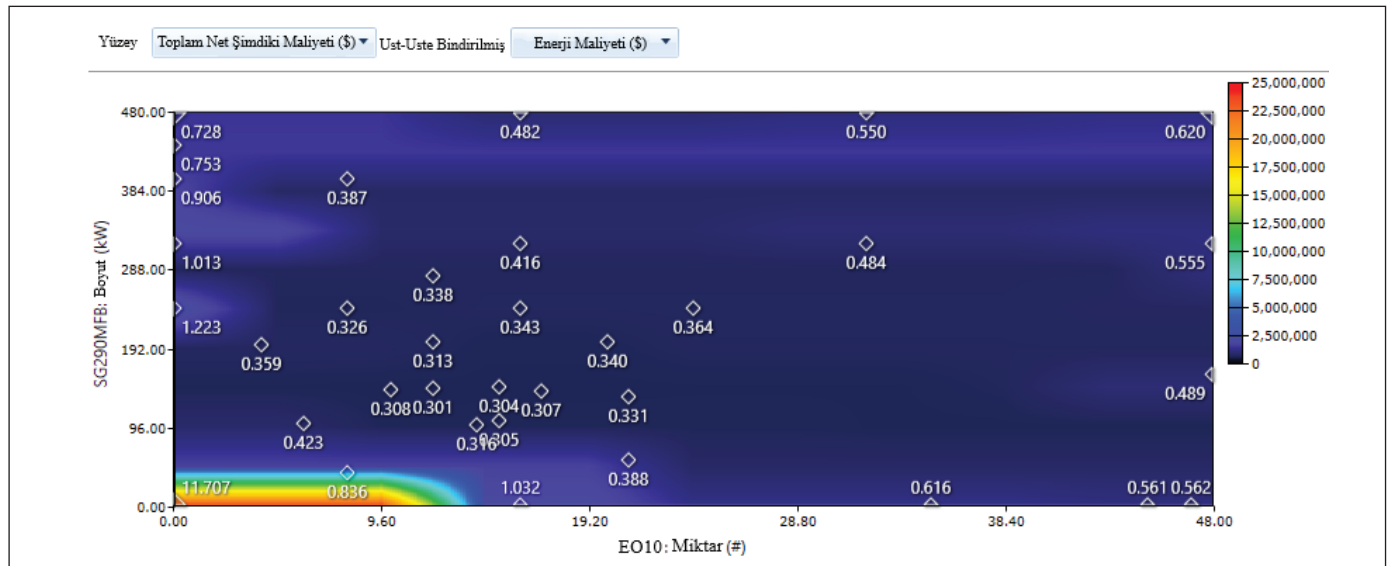
jinin üzerinde kalan fazla enerji olarak kaydedilmiştir. NPC analizlerinde, 25 rüzgar türbininden sonra maliyetlerin önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Bununla birlikte, NPC değerinin 10-18 rüzgar türbini aralığında en düşük değerlerine ulaştığı ve özellikle 13 rüzgar türbini kullanıldığında en optimal maliyet seviyesine ulaşıldığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, sistemin hem enerji üretim performansını hem de maliyet etkinliğini optimize etmek için rüzgar türbini sayısının kritik bir parametre olduğunu göstermektedir. Şekil 9'da rüzgar türbini sayısı ve güneş paneli büyüklüğüne bağlı olarak birim COE değerindeki değişimleri veren ısı haritası gösterilmiştir. Bu grafik, rüzgar türbini sayısı ve güneş

paneli kapasitesi arasındaki ilişkinin birim COE üzerindeki etkisini göstermektedir. Isı haritası, farklı bileşen kombinasyonlarının enerji maliyetleri üzerindeki etkisini analiz etmek ve sistemin en uygun konfigürasyonunu belirlemek için kullanılmıştır.

Isı haritası incelendiğinde, sistemdeki en düşük birim COE değerinin, 10 ile 18 adet rüzgar türbini kullanıldığı durumda gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu aralık, rüzgar türbinlerinin enerji üretim verimliliği ile maliyet etkinliği arasındaki optimal dengeyi sağladığını göstermektedir. Güneş paneli büyüklükleri açısından yapılan değerlendirmede ise, 96 kW ile 192 kW aralığında hem birim COE değerinin hem de NPC



Şekil 8. Sistem bileşenlerine bağlı NPC ilişkisi (A) Batarya, inverter ve güneş panellerinin optimal çalışma durumundaki rüzgar türbini sayısı ve dağılımı (B) Batarya ve inverterin optimal çalışma durumundaki rüzgar türbini sayısı ve dağılımı.



Şekil 9. Optimal çalışma şartlarındaki birim COE değerindeki ısı haritası değişimi.

değerinin en düşük değerlerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, güneş paneli kapasitesinin belirli bir aralıkta tutulmasının, sistemin genel maliyet performansını optimize ettiğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, hem rüzgar türbini sayısının hem de güneş paneli büyüklüğünün belirli aralıklarda seçilmesi, hibrit enerji sisteminin hem ekonomik hem de teknik açıdan en verimli şekilde çalışmasını sağlamaktadır.

4. Sonuç ve Öneriler

Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda, rüzgar türbini, PV paneller ve dizel jeneratörden oluşan hibrit enerji sisteminin, teknik ve ekonomik açıdan en uygun çözüm olduğu tespit edilmiştir. Bu tür hibrit enerji sistemlerinde, NPC değeri ve COE değerlerinin, diğer sistem konfigürasyonlarına kıyasla önemli ölçüde daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca, yıllık işletme ve bakım masraflarının da diğer sistemlerle karşılaştırıldığında daha ekonomik olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, hibrit enerji sisteminde üretilen yenilenebilir enerjinin (rüzgar ve güneş) toplam enerji üretimine oranının, diğer hibrit enerji sistemlerine göre en yüksek seviyede olduğu görülmüştür. Bu durum, sistemin hem çevresel sürdürülebilirliği desteklediğini hem de fosil yakıt kullanımını minimize ettiğini göstermektedir. Maliyet dağılımları incelendiğinde ise, hibrit enerji sistemlerinde enerji depolama ve dönüşüm bileşenlerinin (batarya ve inverter) toplam maliyet içinde önemli bir paya sahip olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, yenilenebilir enerji kaynaklarına (rüzgar türbinleri ve PV paneller) yapılan yatırımların da sistem maliyetleri üzerinde önemli bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular, hibrit enerji sistemlerinin tasarım ve optimizasyon süreçlerinde maliyet etkinliğinin sağlanması için bileşen seçiminin kritik bir rol oynadığını ortaya koymakta ve gelecekteki benzer çalışmalar için önemli bir referans oluşturmaktadır.

5. Kaynaklar

- Aghajani, G., Ghadimi, N. 2018.** Multi-objective energy management in a micro-grid. *Energy Reports*, 4, 218-225. Doi: 10.1016/j.egy.2017.10.002
- Altinay, G., Karagol, E. 2005.** Electricity consumption and economic growth: evidence from Turkey. *Energy Economics*, 27(6): 849-856. Doi: 10.1016/j.eneco.2005.07.002
- Basheer, Y., Waqar, A., Qaisar, SM., Ahmed, T., Ullah, N., Aloatai, S. 2022.** Analyzing the prospect of hybrid energy in the cement industry of Pakistan, using HOMER pro. *Sustainability*, 14(19): 12440. Doi: 10.3390/su141912440
- Demirtas, O. 2013.** Evaluating the best renewable energy technology for sustainable energy planning. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 3(4): 23-33.
- Dincer, I., Acar, C. 2015.** A review on clean energy solutions for better sustainability. *International Journal of Energy Research*, 39(5): 585-606. Doi: 10.1002/er.3329
- Güney, T. 2019.** Renewable energy, non-renewable energy and sustainable development. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 26(5): 389-397. Doi: 10.1080/13504509.2019.1595214
- Khalil, L., Bhatti, KL., Awan, M. AI., Riaz, M., Khalil, K., Alwaz, N. 2021.** Optimization and designing of hybrid power system using HOMER pro. *Materials Today: Proceedings*, 47, S110-S115. Doi: 10.1016/j.matpr.2020.06.054
- Kumar, P., Pukale, R., Kumabhar, N., Patil, U. 2016.** Optimal design configuration using HOMER. *Procedia Technology*, 24, 499 – 504. Doi: 10.1016/j.protcy.2016.05.085
- Mbasso, WF., Naoussi, SRD., Molu, RJJ., Saatong, KT., Kamel, S. 2023.** Technical assessment of a stand-alone hybrid renewable system for energy and oxygen optimal production for fishes farming in a residential building using HOMER pro. *Cleaner Engineering and Technology*, 17, 100688. Doi: 10.1016/j.clet.2023.100688
- Moghaddas-Tafreshi, SM., Mohseni, S., Karami, ME., Kelly, S. 2019.** Optimal energy management of a grid-connected multiple energy carrier micro-grid. *Applied Thermal Engineering*, 152, 796-806. Doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.02.113
- NASA POWER 2024.** NASA Prediction of Worldwide Energy Resources, <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Nema, P., Nema, RK., Rangnekar, S. 2009.** A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8): 2096-2103. Doi: 10.1016/j.rser.2008.10.006
- Niringiyimana, E., Wanquan, S., Dushimimana, G., Niyigena, JB., 2023.** Hybrid Renewable Energy System Design and Optimization for Developing Countries Using HOMER Pro: Case of Rwanda. 7th International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA), 10-12 March, Singapore, pp. 72-76. Doi: 10.1109/ICGEA57077.2023.10125739
- Pamuk, N. 2024.** Techno-economic feasibility analysis of grid configuration sizing for hybrid renewable energy system in Turkey using different optimization techniques. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(3): 102474. Doi: 10.1016/j.asej.2023.102474
- Rahmat, MAA., Abd Hamid, AS., Lu, Y., Ishak, MAA., Suheel, SZ., Fazlizan, A., Ibrahim, A. 2022.** An analysis of renewable energy technology integration investments in Malaysia using HOMER pro. *Sustainability*, 14(20): 13684. Doi: 10.3390/su142013684

- Said, TR., Kichonge, B., & Kivevele, T. 2024.** Optimal design and analysis of a grid-connected hybrid renewable energy system using HOMER Pro: A case study of Tumbatu Island, Zanzibar. *Energy Science & Engineering*, 12(5): 2137-2163. Doi: 10.1002/ese3.1735
- Sayed, ET., Olabi, AG., Alami, AH., Radwan, A., Mdallal, A., Rezk, A., Abdelkareem, MA. 2023.** Renewable energy and energy storage systems. *Energies*, 16(3): 1415. Doi: 10.3390/en16031415
- Sharma, P., Bora, BJ., Bui, TMT., Efremov, C., Tran, MH., Kowalski, J., Cao, DN., 2024.** Techno-economic analysis of a hybrid energy system for electrification using an off-grid solar/biogas/battery system employing HOMER: A case study in Vietnam. *Process Safety and Environmental Protection*, 191, 1353-1367. Doi: 10.1016/j.psep.2024.09.046
- Stern, DI., Kander, A. 2012.** The role of energy in the industrial revolution and modern economic growth. *The Energy Journal*, 33(3): 125-152. Doi: 10.5547/01956574.33.3
- Swarnkar, NM., Gidwani, L., Sharma, R. 2016.** An application of HOMER Pro in optimization of hybrid energy system for electrification of technical institute. 2016 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS), 07-08 April, Nagercoil, India, pp. 56-61. Doi: 10.1109/ICEETS.2016.7582899
- Ur Rashid, M., Ullah, I., Mehran, M., Baharom, MNR., Khan, F. 2022.** Techno-economic analysis of grid-connected hybrid renewable energy system for remote areas electrification using HOMER Pro. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 17(2): 981-997. Doi: 10.1007/s42835-021-00984-2
- Yasin, A., Alsayed, M. 2020.** Optimization with excess electricity management of a PV, energy storage and diesel generator hybrid system using HOMER Pro software. *International Journal of Applied Power Engineering*, 9(3): 267-283. Doi: 10.11591/ijape.v9.i3.pp267-283
- Yousefikhah, S., Asgharizadeh, E., Jahangir, MH., 2025.** Multi-objective optimization of a hybrid micro-grid system for reducing grid dependency in the automotive industry: a case study of Iran Khodro company. *International Journal of Modelling and Simulation*, 45(1): 114-136. Doi: 10.1080/02286203.2023.2188512
- Yuksel, I., Kaygusuz, K. 2011.** Renewable energy sources for clean and sustainable energy policies in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8): 4132-4144. Doi: 10.1016/j.rser.2011.07.007



Askıda Katı Madde Konsantrasyonunun Tahmininde Yığma Modelleri ve Hiperparametre Optimizasyonunun Etkisi: Filyos Çayı Örneği

The Impact of Stacking Models and Hyperparameter Optimization on the Prediction of Suspended Solid Concentration: A Case Study of Filyos Stream

Rukiye Uzun Arslan¹ , Berna Aksoy^{2,*} , İrem Şenyer Yapıcı³

¹Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

²Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

³Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

Öz

Canlı yaşamının devamlılığı ve ekosistem dengesinin sürdürülebilirliği için hayati bir unsur olan su, çevresel ve insan kaynaklı faktörlerin etkisiyle fiziksel ve kimyasal özelliklerinde değişimlere uğrayabilmektedir. Su kalitesinin temel göstergelerinden biri olan askıda katı madde (AKM) konsantrasyonunun doğru bir şekilde tahmin edilmesi, sürdürülebilir su yönetimi açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, Batı Karadeniz Havzası'ndaki Filyos Çayı Alt Havzası'na ait su kalitesi verileri kullanılarak, AKM konsantrasyonunun tahmini için yığma modeli temelli bir yaklaşım önerilmiştir. Modelde, temel model olarak rasgele orman (RO) ve gradyan artırma (GA) algoritmaları, meta-model olarak ise K-en yakın komşu (KNN), çok katmanlı algılayıcı (ÇKA), kategorik artırma (CatBoost), uyarlamalı artırma (AdaBoost) ve Torbalama (Bagging) algoritmaları kullanılmıştır. Model performansı, ortalama karesel hata (MSE), kök ortalama kare hatası (RMSE), ortalama mutlak hata (MAE), ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) ve korelasyon katsayısı (R^2) gibi metriklerle değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre, en yüksek R^2 değeri (%87) RO-GA+CatBoost modeli tarafından elde edilmiştir. Bu model, diğer kombinasyonlara kıyasla daha düşük hata değerleri (MSE: 143.85, RMSE: 11.99, MAE: 9.03, MAPE: 0.21) ile en iyi tahmin performansını sergilemiştir. Hiperparametre optimizasyonu sürecinde Izgara Arama (Grid Search) ve Rasgele Arama (Randomized Search) yöntemleri kullanılarak modellerin performansı daha da iyileştirilmiştir. Özellikle RO-GA+CatBoost modeli, optimizasyon sonrası R^2 değerini %89'a çıkararak en yüksek performansı göstermiştir. Bu çalışma, doğru algoritma seçimi ve hiperparametre optimizasyonunun model performansını artırmada kritik bir rol oynadığını ortaya koymuştur. CatBoost ve KNN algoritmaları, uygun hiperparametre optimizasyon teknikleri (örneğin Grid Search veya Randomized Search) ile entegre edildiğinde, modelin tahmin doğruluğu üzerinde anlamlı bir iyileşme sağlamaktadır. Gerçekleştirilen optimizasyon süreçleri, modelin karar sınırlarını veri setinin yapısına daha iyi uyarlamasına olanak tanıyarak genelleme performansını artırmakta ve aşırı öğrenme riskini azaltmaktadır. Elde edilen bulgular, benzer regresyon problemlerinde algoritma seçimi ve optimizasyon adımlarının titizlikle planlanması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Askıda katı madde (AKM), hiperparametre optimizasyonu, makine öğrenmesi, regresyon analizi, su kalitesi.

Abstract

Water, a vital element for the survival of life and sustainability of ecosystem balance, can undergo changes in its physical and chemical properties under the influence of environmental and anthropogenic factors. Accurate estimation of suspended solids (SSM) concentration, one of the basic indicators of water quality, is of critical importance for sustainable water management. In this study, a stacking model-based approach is proposed for the estimation of SSM concentration using water quality data from the Filyos

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: berna.oaksoy@beun.edu.tr

Rukiye Uzun Arslan orcid.org/0000-0002-2082-8695

Berna Aksoy orcid.org/0000-0001-6925-1594

İrem Şenyer Yapıcı orcid.org/0000-0003-0655-340X



Stream Sub-basin in the Western Black Sea Basin. In the model, random forest (RF) and gradient boosting (GB) algorithms are used as base models, and K-nearest neighbor (KNN), multilayer perceptron (MLP), categorical boosting (CatBoost), adaptive boosting (AdaBoost), and Bagging algorithms are used as meta-models. Model performance was evaluated with metrics such as mean square error (MSE), root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), mean absolute percentage error (MAPE), and correlation coefficient (R^2). According to the results, the highest R^2 value (87%) was obtained by the RF-GB+CatBoost model. This model exhibited the best prediction performance with lower error values (MSE: 143.85, RMSE: 11.99, MAE: 9.03, MAPE: 0.21) compared to other combinations. The performance of the models was further improved by using Grid Search and Randomized Search methods in the hyperparameter optimization process. In particular, the RF-GB+CatBoost model showed the highest performance by increasing the R^2 value to 89% after optimization. This study revealed that the correct algorithm selection and hyperparameter optimization play a critical role in improving model performance. CatBoost and KNN algorithms, integrated with appropriate hyperparameter optimisation techniques (e.g. Grid Search or Randomised Search), provide a significant improvement on the prediction accuracy of the model. The optimisation processes performed allow the model to better adapt its decision boundaries to the structure of the dataset, improving generalisation performance and reducing the risk of overlearning. The findings suggest that algorithm selection and optimisation steps should be carefully planned for similar regression problems.

Keywords: Suspended solids (SS), hyperparameter optimization, machine learning, regression analysis, water quality.

1. Giriş

Nüfus artışı, sanayileşme ve kentleşme gibi insan kaynaklı faaliyetler, su kaynakları üzerinde giderek artan bir baskı oluşturmaktadır. Bu durum, su kalitesinin düşmesine ve ekosistem dengelerinin bozulmasına yol açmaktadır. Özellikle yeterli arıtma işlemlerinden geçirilmeden doğrudan alıcı ortamlara deşarj edilen atık sular, su kaynaklarının kirlenmesine ve biyolojik çeşitliliğin azalmasına neden olmaktadır. Su kalitesindeki bozulmaların çok boyutlu etkileri, yalnızca çevresel dengeleri tehdit etmekle kalmayıp aynı zamanda halk sağlığı riskleri oluşturmakta ve ekonomik istikrarı derinden etkileyebilmektedir. Bu nedenle, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi ve su kalitesinin korunması günümüzde küresel ölçekte öncelikli bir araştırma konusu haline gelmiştir.

Özellikle akarsu ve göl gibi yüzeysel su kaynaklarında gözlemlenen kalite değişimleri, etkili yönetim stratejileri geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu süreçlerin karmaşıklığı, geleneksel doğrusal modelleme yöntemlerinin yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Örneğin, akarsulardaki katı madde taşınımının neden olduğu morfolojik değişimler, hem su kalitesinin bozulmasına hem de mühendislik yapılarında hasara yol açabilmektedir (Mete vd. 2022). Bu tür karmaşık sistemlerin modellenmesinde karşılaşılan temel zorluk, parametreler arasındaki doğrusal olmayan dinamik ilişkilerin geleneksel stokastik ve deterministik yöntemlerle tam olarak temsil edilememesidir. Söz konusu yöntemlerin doğrusal ilişki varsayımına dayanması, gerçek dünyada gözlemlenen karmaşık hidrolojik süreçlerin modellenmesini sınırlandırmaktadır (Gu vd. 2016, Li vd. 2018, Lu ve Ma 2020, Varol 2020). Bu sınırlamalar, son yıllarda makine öğrenmesi (MÖ) tabanlı yaklaşımların, su kalitesi modelleme ve öngörü süreçlerinde giderek daha fazla tercih edilmesine yol

açmıştır. Özellikle yapay sinir ağları (YSA), destek vektör makineleri (DVM) ve rastgele orman (RO) gibi algoritmalar; doğrusal olmayan etkileşimleri tanımlayabilme kapasiteleri, yüksek boyutlu veri kümelerinde başarılı tahmin performansı sunmaları ve ölçeklenebilirlik açısından sağladıkları avantajlar sayesinde, su kalitesi parametrelerinin tahminde geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek doğruluk oranlarıyla öne çıkmaktadır (Yadav vd. 2018, Adiat vd. 2020, Tiyasha vd. 2020, Vijay ve Kamaraj 2021, Gaur vd. 2021, Ewusi vd. 2021, Rizal vd. 2022). Ayrıca, bu modellerin farklı çevresel senaryolara kolaylıkla uyarlanabilir olması ve gerçek zamanlı tahmin yetenekleri, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimine yönelik karar destek sistemlerinde önemli katkılar sağlamaktadır. Bu çerçevede, toplam çözünmüş madde, kimyasal oksijen ihtiyacı, toplam sertlik, askıda katı madde (AKM), pH seviyesi, elektriksel iletkenlik, tuzluluk ve toplam azot gibi çeşitli su kalite parametreleri, MÖ teknikleri aracılığıyla etkin biçimde tahmin edilebilmektedir. Özellikle AKM, suyun fiziksel özelliklerini doğrudan yansıtmaması ve çevresel faktörlerden yüksek oranda etkilenmesi nedeniyle, literatürde sıklıkla incelenen ve tahmin edilmesine yönelik çalışmaların yoğunlaştığı başlıca parametrelerden biri olarak öne çıkmaktadır. Literatürde gerçekleştirilen çok sayıda çalışmada, farklı MÖ algoritmalarının AKM parametresine ilişkin tahminlerde yüksek doğruluk düzeylerine ulaştığı çeşitli örneklerle ortaya konulmuştur (Bayram ve Kanal 2015, Kisi ve Zounemat-Kermani 2016, Aksoy vd. 2019, Baghapour vd. 2020, Samantaray ve Sahoo 2021).

Bununla birlikte, farklı coğrafi bölgelerde, değişken çevresel koşullar altında ve özgün veri kümeleri kullanılarak gerçekleştirilecek yeni uygulamalara duyulan ihtiyaç devam etmektedir. Bu çalışmada, söz konusu boşluğu doldurmak amacıyla, Batı Karadeniz Havzası'nda yer alan Filyos Nehri'ne ait

su kalitesi verileri kullanılarak, AKM konsantrasyonunun tahmini için yığma model (stacking ensemble) temelli bir yaklaşım önerilmektedir. Önerilen model, geleneksel yöntemlerin sınırlılıklarını aşarak doğrusal olmayan ilişkileri daha etkin şekilde temsil etmeyi amaçlamakta; ayrıca farklı algoritma kombinasyonlarının model performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmekte ve hiperparametre optimizasyonu ile tahmin doğruluğunun nasıl iyileştirilebileceği detaylı olarak incelenmektedir.

2. Gereç ve Yöntemler

2.1. Çalışma Alanı

Filyos Nehri, 228 km uzunluğu ile Batı Karadeniz Havzası'nın en büyük alt havzası olan Filyos Havzası'nda yer almaktadır (Şekil 1). Çeşitli uzunluklara sahip birçok kolun birleşmesiyle oluşan nehrin debisi, özellikle kış ve ilkbahar aylarında artan yağış miktarına bağlı olarak önemli ölçüde artış göstermektedir. Nehrin debi rejimi, bölgesel iklim koşulları ve mevsimsel yağış farklılıklarından doğrudan etkilenmektedir.

Nehri besleyen havzanın karakteristik özellikleri, su kalitesi ve debi üzerinde belirleyici etkiler oluşturmaktadır. Filyos Havzası ağırlıklı olarak ormanlık alanlarla kaplı olup, bu arazi örtüsü bölgedeki hidrolojik süreçler üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Ormanlık yapı, yağışın yüzey akışına dönüşümünü sınırlayarak toprak su emilimini artırmakta ve bu durum hem nehir debisini hem de su kalitesi parametrelerini doğrudan etkilemektedir. Ayrıca, havzanın doğal karakteristiği, kirleticilerin taşınımı ve seyreltme mekanizmaları üzerinde de belirgin etkiler göstermektedir.

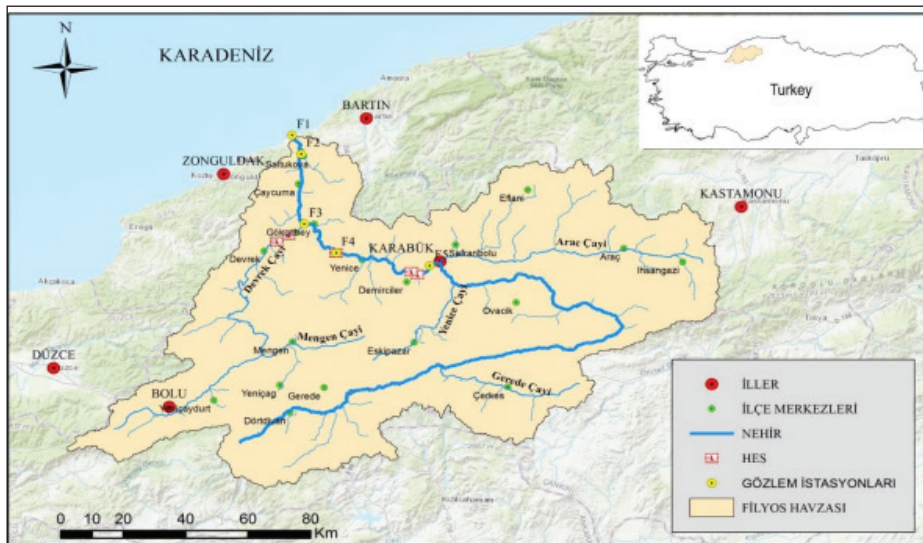
Havzanın bu hidrolojik ve çevresel özellikleri dikkate alınarak, çalışmada Filyos Nehri'nin su kalitesi parametrelerinin belirlenmesine yönelik saha ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, nehrin ana kolu üzerinde belirlenen beş istasyonda su numuneleri toplanmış ve laboratuvar ortamında detaylı analizler yapılmıştır. İstasyon seçiminde, karşılaştırmalı değerlendirmelerin sağlıklı biçimde yapılabilmesi amacıyla Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından ölçüm gerçekleştirilen noktalar referans alınmıştır. İstasyonların coğrafi konumlarına ilişkin bilgiler Çizelge 1'de sunulmaktadır.

Çizelge 1. İstasyonların lokasyonları (Aksoy vd. 2019).

İstasyon Adı	Koordinatlar
Filyos Ağız (F1)	41°34'45.91"K - 32° 2'55.88"D
Saltukova Köprü (F2)	41°31'20.68"K - 32° 5'11.09"D
Çaydeğirmeni Köprü (F3)	41°17'2.83"K - 32° 4'9.88"D
Tefen HES (F4)	41°13'14.00"K - 32°13'31.00"D
Karabük TOKİ (F5)	41°11'9.21"K - 32°35'25.83"D

2.2. Yığma Modeli

Yığma modeli birden fazla MÖ algoritmasının tahminlerini birleştirerek, bu çıktıları ikinci seviye bir meta-sınıflandırıcıya girdi olarak aktaran bir topluluk öğrenme yöntemidir (Yıldırım vd. 2018). Bu yöntem, farklı MÖ algoritmalarının güçlü yönlerini bir araya getirerek daha sağlam, genellenebilir ve yüksek doğruluklu modeller oluşturmaya hedeflemektedir. Yığma modeli, temel model ve meta-model olmak üzere iki katmandan oluşmaktadır. Temel model çeşitli MÖ algoritmaları ile veri kümesinin farklı özelliklerini yakalar-



Şekil 1. Filyos alt havzası (Aksoy vd. 2019).

ken, meta-model ise bu temel modellerin çıktılarını birleştirerek nihai tahmini üretmektedir. Bu iki katmanlı yapı, temel modellerin bireysel hatalarını dengeleyerek, modelin genel performansını artırmayı ve aşırı öğrenme riskini azaltmayı amaçlamaktadır (Akkur ve Öztürk 2023). Gerçekleştirilen bu çalışmada, temel model olarak RO ve GA algoritmaları seçilmiştir. Bu algoritmalar, veri setindeki farklı özellikleri ve örüntüleri yakalama yetenekleri nedeniyle tercih edilmiştir. Temel modeller tarafından üretilen tahminler, meta-modele girdi olarak kullanılmadan önce, K-en yakın komşu (KNN), çok katmanlı algılayıcı (ÇKA), kategorik artırma (CatBoost), uyarlamalı artırma (AdaBoost) ve Torbalama (Bagging) algoritmalarıyla birleştirilmiştir. Bu sayede, modelin farklı MÖ algoritmalarıyla entegrasyonuna olanak tanıyan esnek ve uyarlanabilir bir yapı geliştirilmiştir.

2.3. Regresyon Algoritmaları

Bu bölümde, yığma modelinin oluşturulmasında kullanılan regresyon algoritmaları ve bunların temel özellikleri ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

2.3.1. Gradyan Arttırma

GA, zayıf tahmin modellerini birleştirerek güçlü bir regresyon modeli oluşturan bir MÖ yöntemidir. Bu yöntemde, her bir modelin eğitimi, bir önceki modelin oluşturduğu hata terimlerini minimize etmeye odaklanmakta, bu sayede öğrenme süreci aşamalı bir şekilde optimize edilmektedir. Ek bir hiperparametre optimizasyon sürecine gerek duymadan yüksek doğrulukta tahminler üretebilen GA, özellikle yüksek boyutlu ve karmaşık yapıya sahip veri setlerinde regresyon problemleri için etkili bir çözüm sunmaktadır (Al-Haddad vd. 2024).

2.3.3. Rasgele Orman

RO, karar ağaçlarını temel alan denetimli bir topluluk öğrenme algoritmasıdır. Bu algoritmada, birden fazla KA eğitilmekte ve her bir ağacın ürettiği tahminlerin ortalaması alınarak nihai çıktı belirlenmektedir. RO, modelin genelleme yeteneğini artırmak ve aşırı öğrenme riskini azaltmak için Torbalama (Bagging, bootstrapaggregating) ve rastgele alt uzay yöntemlerini kullanmaktadır. Bu yöntemler sayesinde, paralel olarak oluşturulan bağımsız KA hem modelin doğruluğunu artırmakta hem de hesaplama maliyetlerini optimize etmektedir (Shanmugasundar 2021, Arslan ve Yapıcı 2024).

2.3.4. K-En Yakın Komşu

KNN algoritması, regresyon analizinde sıklıkla tercih edilen, hesaplama açısından pratik ve etkili bir yöntemdir. Bu

algoritma, yeni bir veri noktasının en yakın K komşusunu belirleyerek, ilgili komşuların hedef değişken değerlerinin ortalamasını almak suretiyle tahmin yapmaktadır. Komşuların belirlenmesinde Öklid, Manhattan ve Minkowski gibi farklı mesafe ölçütleri kullanılmaktadır. KNN'nin parametrik olmayan ve kolay uygulanabilir bir yapıya sahip olması önemli bir avantaj sağlarken, büyük veri kümelerinde artan bellek ve hesaplama maliyeti dezavantaj oluşturmaktadır (Özcan 2020, Yapıcı ve Arslan 2024).

2.3.5. Çok Katmanlı Algılayıcı

ÇKA, bir giriş katmanı, bir çıkış katmanı ve en az bir gizli katmandan oluşan ileri beslemeli bir YSA'dır. En yaygın kullanılan ÇKA modeli, tek bir gizli katmana sahip üç katmanlı bir yapıdır. Bu ağlarda katmanlar tamamen bağlantılıdır; her bir nöron, önceki ve sonraki katmandaki tüm nöronlarla etkileşim halindedir. Bu yapıda bilgi akışı yalnızca ileri yönde gerçekleşmekte olup, geri besleme mekanizması bulunmamaktadır (Yapıcı vd. 2021, Zhang 2024).

2.3.6. CatBoost

CatBoost, kategorik ve sayısal verilerle çalışan denetimli bir MÖ algoritmasıdır. Özellikle kategorik değişkenlerin işlenmesini iyileştirmek ve modele entegrasyonunu optimize etmek üzere geliştirilmiştir. Bu doğrultuda algoritma, verinin iki değerli forma dönüştürülmesi (binarize edilmesi), kategorik değişkenlerin sayısal forma dönüştürülmesi ve karar ağaçlarıyla özellik birleştirme işlemlerinden oluşan üç aşamalı bir süreç izlemektedir. Bu süreç, modelin verimliliğini artırırken aşırı öğrenme riskini azaltarak genelleme performansını iyileştirmektedir (Singh vd. 2024).

2.3.7. AdaBoost

AdaBoost, zayıf öğrencilerin ardışık olarak eğitilmesi yoluyla hata oranını minimize etmeyi amaçlayan bir topluluk öğrenme yöntemidir. Modelleme sürecinde, önceki aşamalarda yüksek hata oranına sahip örnekler belirlenerek bu örnekler daha yüksek ağırlık atanmaktadır. Bu yaklaşım, sonraki öğrencinin hata payı yüksek örnekler üzerinde daha yüksek doğrulukla genelleme yapmasını sağlamaktadır. Modelin performansı, tahmin edilen ve gerçek değerler arasındaki hata göz önünde bulundurularak iteratif bir şekilde iyileştirilmekte ve süreç, belirlenen hata eşiğine ulaşılan kadar devam etmektedir. İteratif bir yapıya sahip olan AdaBoost, hata oranını kademeli olarak azaltarak modelin genelleme kapasitesini artırmakta ve tahmin doğruluğunu optimize etmektedir (Shanmugasundar 2021).

2.3.8. Torbalama

Torbalama algoritması, birden fazla zayıf öğrenicinin farklı veri alt kümeleri üzerinde paralel olarak eğitilmesi ve tahminlerin birleştirilmesi prensibine dayanan bir topluluk öğrenme yöntemidir. Bu yaklaşım, bootstrap örnekleme ve değişken alt kümelerinin kullanımı yoluyla model çeşitliliğini artırmakta ve aşırı öğrenme riskini azaltmaktadır. Torbalama, öngörülen değerlerin ortalamasını alarak tahmin doğruluğunu artırmakta ve bu sayede modelin genelleme performansını iyileştirmektedir (Moeini 2024).

2.4. Performans Kriterleri

Bu çalışmada, model performansını değerlendirmek için çeşitli hata ve doğruluk metriklerinden yararlanılmıştır. Değerlendirme sürecinde, temel performans ölçütleri olarak ortalama karesel hata (Mean Square Error, MSE), kök ortalama kare hatası (Root Mean Square Error, RMSE), ortalama mutlak hata (Mean Absolute Error, MAE) ve ortalama mutlak yüzde hata (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) tercih edilmiştir. Ayrıca, modelin açıklayıcılık gücünü belirlemek amacıyla korelasyon katsayısı (R^2) da önemli bir karar ölçütü olarak ele alınmıştır. İlgili metriklere ait matematiksel eşitsizlikler aşağıda verilmiştir:

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

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

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Burada y_i i. gözleme ait gerçek (gözlemlenen) değerini, $\hat{y}_i$ i. gözleme ait model tarafından tahmin edilen değerini, $\bar{y}$ tüm gözlemlerinin aritmetik ortalamasını ve n ise toplam gözlem sayısını temsil etmektedir.

Model performansının değerlendirilmesinde, R^2 değerinin yüksek olması modelin açıklayıcılık gücünün yüksek olduğunu ve hedef değişken üzerindeki varyansı iyi açıkladığını göstermektedir. Buna karşılık, MSE, RMSE, MAE ve MAPE gibi hata ölçütlerinin düşük değerler alması, modelin tahmin hatalarının minimal düzeyde olduğunu ve dolayısıyla genel performansının daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır (Gültepe 2019).

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, Batı Karadeniz Havzası'nın en büyük alt havzası olan Filyos Çayı Alt Havzası'nda yer alan Filyos Çayı'na ait su kalitesi verileri kullanılarak, sudaki AKM konsantrasyonunun tahmini için MÖ tabanlı bir yığma modeli önerilmiştir. Önerilen modelde, iki farklı algoritma temel model, bir algoritma ise yığma meta-model olarak kullanılmıştır. Temel model olarak RO ve GA tercih edilirken, meta-model olarak KNN, ÇKA, CatBoost, AdaBoost ve Torbalama algoritmalarından yararlanılmıştır. Model değerlendirme sürecinde RO-GA+KNN, RO-GA+ÇKA, RO-GA+CatBoost, RO-GA+AdaBoost ve RO-GA+Torbalama şeklindeki algoritma kombinasyonları incelenmiştir.

Modelleme sürecinde kullanılan veri seti, Filyos nehri üzerinde belirlenen 5 farklı istasyondan alınan su örneklerine ait fiziksel ve kimyasal parametreleri içermekte olup, iletkenlik, sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$), pH, çözülmüş oksijen (ÇO), kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), bulanıklık, toplam organik karbon (TOC), amonyum (NH_4^+), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mn), sertlik, fosfat (PO_4^{3-}), nitrit, nitrat, alüminyum (Al), mangan (Mn), demir (Fe), krom (Cr), kurşun (Pb) ve çinko (Zn) değişkenleri giriş (bağımsız değişken) olarak kullanılmış; AKM değeri ise hedef (bağımlı değişken) değişken olarak modellenmiştir. Çizelge 2'de, F1 istasyonundan alınan veri setinin bir kesit verilmiştir. Ayrıca F1 istasyonuna ait verilerin mevsimsel olarak minimum, maksimum ve ortalama değerleri Çizelge 3'te sunulmuştur.

Veri seti, modelin daha sağlıklı bir öğrenme süreci geçirmesi için *Standard Scaler* yöntemi ile ölçeklendirilmiş ve %80'i eğitim, %20'si test olmak üzere iki alt veri kümesine ayrılmıştır. Modelin performansı, MSE, RMSE, MAE, MAPE ve R^2 gibi performans ölçütleri ile değerlendirilmiştir. Şekil 2'de, incelenen algoritma kombinasyonlarına ait R^2 değerleri sunulmuştur.

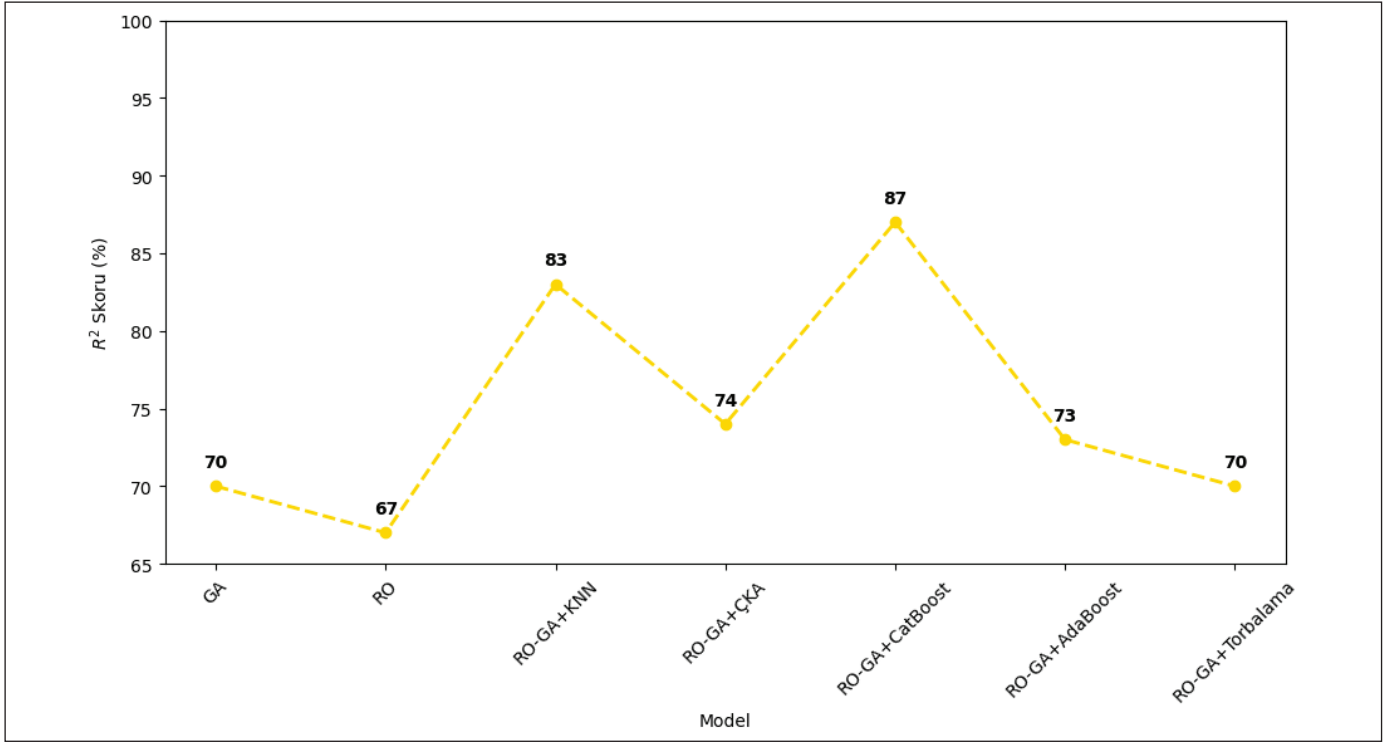
Şekil 2'de, çeşitli algoritma kombinasyonlarına ilişkin R^2 değerleri karşılaştırıldığında, modeller arasında istatistiksel olarak anlamlı performans farkları olduğu dikkati çekmektedir. Özellikle, RO-GA+CatBoost modeli %87'lik R^2 değeri ile en yüksek doğrusal uyum başarımını sergilemiştir. Bu sonuç, RO-GA+CatBoost modelinin tahmin performansı açısından diğer kombinasyonlara göre daha üstün olduğunu göstermektedir. RO-GA+KNN modeli %83'lük R^2 değeri ile yüksek bir tahmin performansı ortaya koymuştur. RO-GA+ÇKA ve RO-GA+AdaBoost modelleri ise sırasıyla %74 ve %73'lük R^2 değerlerine ulaşmış ve diğer modellere kıyasla daha düşük bir performans sergilemiştir.

Çizelge 2. Filyos nehri üzerindeki F1 istasyondan alınan su örneklerine ait fiziksel ve kimyasal parametreler.

Parametre												
İletkenlik	0.52	0.57	0.52	0.52	0.52	0.53	0.53	0.41	0.48	0.48	0.55	0.55
Sıcaklık	23.40	21.00	19.40	15.00	10.10	9.80	14.00	16.40	25.70	26.80	23.40	23.30
pH	8.03	8.13	8.26	8.21	8.06	8.35	8.25	8.41	8.35	8.15	8.42	8.40
ÇO	5.28	3.11	4.14	3.42	3.94	3.98	5.35	9.77	7.94	7.81	9.19	9.24
AKM	62.00	116.00	30.00	52.00	61.00	49.00	48.00	75.00	120.00	162.00	110.00	109.00
KOİ	126.00	92.00	97.00	94.00	96.00	91.00	93.00	102.86	73.47	39.84	88.00	91.00
Bulanıklık	98.60	86.40	95.60	78.40	68.30	69.10	46.70	28.12	63.25	35.72	17.09	64.12
TOC	2.27	2.31	2.87	2.98	3.46	3.41	2.86	2.95	5.03	3.86	3.49	5.26
Amonyum	1.09	1.07	1.28	1.13	0.46	0.28	0.19	0.17	0.96	1.25	0.99	1.06
Kalsiyum	52.31	50.68	51.64	52.31	54.86	55.16	55.13	55.23	55.25	55.31	53.48	51.68
Magnezyum	21.30	23.41	25.14	22.57	21.63	20.45	22.46	20.36	26.42	26.41	20.49	21.46
Sertlik	347.89	352.46	321.48	364.21	355.41	352.16	351.36	359.69	384.69	384.93	354.26	345.35
Fosfat	0.53	0.32	0.45	0.28	0.43	0.51	0.49	0.41	0.78	0.11	0.42	0.32
Nitrit	1.28	1.34	1.38	1.43	1.56	1.62	1.68	1.79	1.73	1.54	1.38	1.24
Nitrat	6.91	7.06	6.81	6.53	5.87	5.64	5.32	5.28	6.73	6.16	6.54	6.82
Al	7.65	10.96	12.80	17.50	25.40	15.24	4.33	4.64	2.14	5.53	4.43	8.61
Mn	0.22	0.15	0.35	0.44	0.37	0.37	0.33	0.11	0.64	0.02	0.09	0.15
Fe	22.45	20.61	18.46	13.52	19.45	21.05	66.85	74.08	41.02	10.96	12.05	11.68
Cr	0.09	0.14	0.43	0.26	0.32	0.36	0.13	0.03	0.28	0.11	0.05	0.07
Pb	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.00	0.05	0.01	0.08	0.02
Zn	0.25	0.55	0.37	0.25	0.21	0.13	0.59	0.66	0.39	0.59	0.29	0.10

Çizelge 3. F1 istasyonuna ait verilerin mevsimsel olarak istatistiksel analizi.

Parametre	Sonbahar			Kış			İlkbahar			Yaz		
	Min.	Ort.	Mak.	Min.	Ort.	Mak.	Min.	Ort.	Mak.	Min.	Ort.	Mak.
İletkenlik	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Sıcaklık	19.4	21.4	23.4	9.8	12.4	15.0	14.0	19.9	25.7	23.3	25.1	26.8
pH	8.0	8.1	8.3	8.2	8.3	8.4	8.3	8.3	8.4	8.2	8.3	8.4
ÇO	4.1	4.7	5.3	3.4	3.7	4.0	5.4	6.6	7.9	7.8	8.5	9.2
AKM	30.0	46.0	62.0	49.0	50.5	52.0	48.0	84.0	120.0	109.0	135.5	162.0
KOİ	97.0	111.5	126.0	91.0	92.5	94.0	73.5	83.2	93.0	39.8	65.4	91.0
Bulanıklık	95.6	97.1	98.6	69.1	73.8	78.4	46.7	55.0	63.3	35.7	49.9	64.1
TOC	2.3	2.6	2.9	3.0	3.2	3.4	2.9	3.9	5.0	3.9	4.6	5.3
Amonyum	1.1	1.2	1.3	0.3	0.7	1.1	0.2	0.6	1.0	1.1	1.2	1.2
Kalsiyum	51.6	52.0	52.3	52.3	53.7	55.2	55.1	55.2	55.2	51.7	53.5	55.3
Magnezyum	21.3	23.2	25.1	20.5	21.5	22.6	22.5	24.4	26.4	21.5	23.9	26.4
Sertlik	321.5	334.7	347.9	352.2	358.2	364.2	351.4	368.0	384.7	345.4	365.1	384.9
Fosfat	0.5	0.5	0.5	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.8	0.1	0.2	0.3
Nitrit	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6	1.7	1.7	1.7	1.2	1.4	1.5
Nitrat	6.8	6.9	6.9	5.6	6.1	6.5	5.3	6.0	6.7	6.2	6.5	6.8
Al	7.7	10.2	12.8	15.2	16.4	17.5	2.1	3.2	4.3	5.5	7.1	8.6
Mn	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.5	0.6	0.0	0.1	0.2
Fe	18.5	20.5	22.5	13.5	17.3	21.1	41.0	53.9	66.9	11.0	11.3	11.7
Cr	0.1	0.3	0.4	0.3	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.1	0.1	0.1
Pb	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
Zn	0.2	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.1	0.3	0.6



Şekil 2. Modellerin R² skorlarının karşılaştırılması.

Çizelge 4. Modellere ait regresyon performans metrikleri.

MODELLER	MSE	RMSE	MAE	MAPE
RO	372.91	19.31	16.34	32.78
GA	343.96	18.54	15.38	32.66
RO-GA+KNN	189.99	13.78	11.13	0.23
RO-GA+ÇKA	294.10	17.14	13.56	0.30
RO-GA+CatBoost	143.85	11.99	9.03	0.21
RO-GA+AdaBoost	295.83	17.19	12.53	0.20
RO-GA+Torbalama	336.69	18.34	15.74	0.26

GA ve RO modelleri ise %70 ve %67'lik R² değerleri ile temel yöntemler arasında yer almış ve daha sınırlı bir uyum başarımı sunmuştur. Öte yandan, yalnızca kombinasyon yöntemleri dikkate alındığında, en düşük R² değeri %70 ile RO-GA+Torbalama modelinde elde edilmiştir. Elde edilen bulgular, yığma modelinde tercih edilen algoritma kombinasyonlarının önerilen modelin performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, modellerin tahmin performanslarını daha ayrıntılı bir şekilde incelemek amacıyla farklı algoritma kombinasyonları için çeşitli regresyon hata metrikleri hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 4'te özetlenmiştir.

Çizelge 4'te sunulan regresyon performans metrikleri incelendiğinde, temel yöntemler olan RO ve GA modellerinin hata değerlerinin, kombinasyon yöntemlerine kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Özellikle, RO modeli 372.91 MSE, 19.31 RMSE, 16.34 MAE ve 32.78 MAPE değerleri ile en yüksek hata oranlarına sahip olurken, GA modeli 343.96 MSE, 18.54 RMSE, 15.38 MAE ve 32.66 MAPE değerleri ile RO'ya göre bir miktar daha iyi bir performans sergilemiştir. Buna karşılık, RO ve GA yöntemlerinin farklı algoritmalarla kombinasyonu sonucunda tahmin performansında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, en düşük hata değerlerine sahip olan model, 143.85 MSE, 11.99 RMSE, 9.03 MAE ve 0.21 MAPE de-

Çizelge 5. Grid Search ve Randomized Search yöntemleri ile RO ve GA modelleri için hiperparametre değerleri.

	RO	GA
Grid Search	n_estimators: [300, 400, 500] max_depth: [12, 15, 20] min_samples_split: [2, 5] min_samples_leaf: [1, 2]	n_estimators: [300, 400, 500] learning_rate: [0.01, 0.05, 0.1] max_depth: [3, 5, 7]
Randomized Search	n_estimators: [300, 400, 500, 600] max_depth: [12, 15, 20, 25] min_samples_split: [2, 4, 6] min_samples_leaf: [1, 2, 3]	n_estimators: [300, 400, 500, 600] learning_rate: [0.01, 0.05, 0.1] max_depth: [3, 5, 7, 9]

ğerleri ile RO-GA+CatBoost modeli olarak belirlenmiştir. Bu bulgular, RO-GA+CatBoost modelinin, diğer modellere kıyasla daha yüksek bir tahmin performansı sergilediğini ve veri setindeki karmaşık ilişkileri daha etkili bir şekilde modelleyebildiğini ortaya koymaktadır. RO-GA+KNN modeli ise 189.99 MSE, 13.78 RMSE, 11.13 MAE ve 0.23 MAPE değerleri ile nispeten iyi bir performans göstermiştir. Ancak, bu modelin hata metrikleri RO-GA+CatBoost modeline kıyasla daha yüksek olduğundan, tahmin doğruluğu açısından ikinci sırada yer aldığı görülmektedir. RO-GA+KNN modelinin performansı, özellikle büyük ölçekli veri setlerinde hesaplama karmaşıklığı ve model esnekliği açısından sınırlı kalabileceğini düşündürmektedir. Diğer taraftan, RO-GA+ÇKA ve RO-GA+AdaBoost modelleri sırasıyla 294.10 ve 295.83 MSE değerleri ile daha yüksek hata oranlarına sahip olmuştur. Bu modellerin MAE ve MAPE değerleri de (sırasıyla 13.45 ve 0.28 için RO-GA+ÇKA; 13.52 ve 0.29 için RO-GA+AdaBoost) RO-GA+CatBoost ve RO-GA+KNN modellerine kıyasla daha düşük performans sergilediğini göstermektedir. Bu durum, söz konusu modellerin veri setindeki karmaşık ilişkileri modellemede yetersiz kaldığını veya hiperparametre optimizasyonunun yeterince etkin yapılamadığını düşündürmektedir. En yüksek hata değerleri ise 336.69 MSE, 18.34 RMSE, 15.74 MAE ve 0.26 MAPE ile RO-GA+Torbilama modelinde gözlemlenmiştir. Bu modelin performansının diğer modellere kıyasla önemli ölçüde düşük olması, tahmin doğruluğu açısından sınırlı bir kapasiteye sahip olduğunu göstermektedir.

Model performansını daha da iyileştirmek ve genelleme yeteneğini artırmak amacıyla, hiperparametre optimizasyonu süreci gerçekleştirilmiştir. Bu süreç, modellerin eğitim aşamasında kullanılan parametrelerin sistematik olarak ayarlanmasını ve en uygun kombinasyonların belirlenmesini içermektedir. Bu amaçla, Grid Search ve Randomized Search gibi yaygın olarak kullanılan optimizasyon yöntemleri tercih edilmiştir. Grid Search yöntemi, belirli bir hiperpara-

metre uzayını kapsamlı bir şekilde tarayarak en iyi kombinasyonu bulmayı hedeflerken, Randomized Search yöntemi ise rastgele örnekleme yoluyla daha geniş bir hiperparametre uzayını daha verimli bir şekilde keşfetmeyi amaçlamaktadır.

RO ve GA için belirlenen hiperparametre aralıkları ve değerleri, Çizelge 5'te ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bu parametrelerden *n_estimators*, modelde oluşturulacak toplam ağaç sayısını belirlerken; *max_depth*, her bir ağacın alabileceği maksimum derinliği sınırlayarak modelin karmaşıklığını kontrol etmektedir. *min_samples_split* ve *min_samples_leaf* parametreleri ise, her bir bölünme ve yaprak düğümünde bulunması gereken minimum örnek sayısını düzenleyerek aşırı uyum riskini azaltmayı amaçlamaktadır. GA modellerinde *learning_rate* parametresi, her bir zayıf öğrencinin model üzerindeki katkı oranını ayarlayarak genel öğrenme sürecinin hızını ve performansını optimize etmektedir. Hiperparametrelerin belirlenmesinde kullanılan Randomized Search yöntemi ise, klasik Grid Search yöntemine kıyasla daha geniş bir parametre uzayını rastgele örnekleyerek daha hızlı ve verimli bir arama süreci sağlamaktadır. Belirlenen bu hiperparametreler, modellerin karmaşıklığı, öğrenme dinamikleri ve genelleme yeteneği üzerinde doğrudan etkili olup model performansını belirleyen temel unsurlar arasında yer almaktadır.

Hiperparametre optimizasyonu sürecinin ardından, modellerin hata metriklerinde önemli iyileşmeler kaydedilmiş ve bu sonuçlar Çizelge 6'da verilmiştir. Özellikle RO-GA+CatBoost ve RO-GA+KNN modellerinde, optimizasyon sonrası MSE, RMSE, MAE ve MAPE değerlerinde belirgin düşüşler gözlemlenmiştir. Bu bulgular, hiperparametre optimizasyonunun model performansını artırmada kritik bir rol oynadığını ve hata oranlarını minimize etmede etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Çizelge 6'da sunulan sonuçlar incelendiğinde, Grid Search yöntemi ile optimize edilen modeller arasında en iyi per-

Çizelge 6. Grid Search ve Randomized Search yöntemlerinin model performansları üzerindeki etkisi.

	MODEL	MSE	RMSE	MAE	MAPE	R ²
Grid Search	RO-GA+KNN	185.15	13.60	11.10	0.20	0.83
	RO-GA+ÇKA	321.72	17.93	14.21	0.32	0.71
	RO-GA+CatBoost	126.14	11.23	9.71	0.21	0.89
	RO-GA+AdaBoost	228.93	15.13	12.78	0.22	0.79
	RO-GA+Torbalama	271.09	16.46	13.12	0.24	0.75
Randomized Search	RO-GA+KNN	185.15	13.60	11.10	0.20	0.83
	RO-GA+ÇKA	312.80	17.68	13.91	0.31	0.72
	RO-GA+CatBoost	188.66	13.73	12.98	0.23	0.83
	RO-GA+AdaBoost	295.17	17.18	13.66	0.22	0.73
	RO-GA+Torbalama	299.24	17.29	13.51	0.24	0.73

formansın CatBoost algoritması ile elde edildiği görülmektedir. Bu model, R² değeri olarak 0.89 ile diğer modellere kıyasla belirgin bir üstünlük sergilemiştir. Ayrıca, CatBoost modelinin hata metrikleri de oldukça düşük değerler göstermiştir: MSE (126.14), RMSE (11.23) ve MAE (9.71). Ancak Randomized Search uygulandığında, CatBoost'un performansında dikkat çekici bir düşüş gözlemlenmiştir (MSE: 188.66, R²: 0.83). Bu sonuçlar, CatBoost'un hem doğrusal hem de doğrusal olmayan ilişkileri etkili bir şekilde modelleyebildiğini ve Grid Search ile hiperparametre optimizasyonu sonrasında tahmin performansını önemli ölçüde artırabildiğini ortaya koymaktadır.

Öte yandan, Grid Search ile optimize edilen modeller arasında en düşük performans, ÇKA modelinde gözlemlenmiştir. Bu model, R² değeri olarak 0.71, MSE değeri olarak 321.72 ve RMSE değeri olarak 17.93 ile diğer modellere kıyasla daha yüksek hata oranlarına sahip olmuştur. Randomized Search'te ise ÇKA modelinin performansında hafif bir iyileşme görülmüştür (MSE: 312.80, R²: 0.72), bu da bazı modellerde rastgele aramanın daha iyi sonuçlar verebileceğini göstermektedir. Bu durum, ÇKA modelinin veri setindeki karmaşık ilişkileri yakalamada yetersiz kaldığını veya hiperparametre optimizasyonunun model performansı üzerindeki etkisinin algoritmaya bağımlı olduğunu göstermektedir.

Randomized Search yöntemi ile optimize edilen modellerin performansları incelendiğinde ise en yüksek doğruluk oranlarına KNN (R² = 0.83, MSE = 185.15, RMSE = 13.60) ve CatBoost (R² = 0.83, MSE = 188.66, RMSE = 13.73) algoritmalarının sahip olduğu görülmektedir. Her iki model de benzer R² değerleri ve hata metrikleri ile nispeten yüksek bir tahmin performansı sergilemiştir. Bununla birlikte, Rando-

mized Search ile optimize edilen modeller arasında en düşük performans yine ÇKA modelinde gözlemlenmiştir. Bu model, R² değeri olarak 0.72, MSE değeri olarak 312.80 ve RMSE değeri olarak 17.68 ile diğer modellere kıyasla daha zayıf sonuçlar vermiştir.

Grid Search ve Randomized Search optimizasyon yöntemlerinin uygulanması, genel olarak tüm modellerde tahmin doğruluğunu artırmış ve R² değerlerinde anlamlı iyileşmelere katkı sağlamıştır. Özellikle Grid Search yöntemi, hata metriklerini azaltarak modellerin doğrusal uyum performansında belirgin bir artış sağlamıştır. Bu kapsamda, RO-GA+CatBoost modeli, Grid Search sonrası elde ettiği 0.89 R² skoru ile en yüksek başarıyı göstermiştir. Bununla birlikte, Randomized Search yöntemi uygulandığında, RO-GA+CatBoost modelinde hata metriklerinde kısmi bir artış ve R² değerinde yaklaşık %4 oranında bir azalma gözlemlenmiştir. Ancak bu durum, çalışmanın genel bulgularını değiştirmemekte; hiperparametre optimizasyon yönteminin seçiminde, model ve veri seti özelliklerine uygun stratejilerin belirlenmesinin performans üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, önerilen yöntemlerin uygun hiperparametre optimizasyonları ile desteklendiğinde, model başarımının istikrarlı bir şekilde artırılacağına ortaya koymaktadır.

Bu bulgular, yığma modelinde kullanılan algoritma kombinasyonlarının ve uygulanan optimizasyon süreçlerinin, tahmin performansı üzerinde doğrudan ve önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle CatBoost ve KNN gibi algoritmalar, uygun hiperparametre optimizasyon yöntemi ile birlikte kullanıldığında, tahmin doğruluğunu önemli ölçüde artırabilmektedir. Diğer taraftan, ÇKA gibi modellerin performansının görece düşük kalması, bu

tür modellerin hiperparametre optimizasyonu süreçlerinde daha detaylı bir ayarlama gerektirdiğini veya alternatif modelleme yaklaşımlarının değerlendirilmesi gerektiğini belirtmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, doğru algoritma seçimleri ve uygun hiperparametre optimizasyonu stratejilerinin, model performansını artırmada kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Özellikle Grid Search ve Randomized Search gibi sistematik optimizasyon yöntemlerinin kullanılması, modellerin genelleme yeteneklerini geliştirerek hata oranlarını minimize etmekte etkili olmuştur. Bu bulgular, benzer regresyon problemlerinde algoritma seçimi ve optimizasyon süreçlerinin titizlikle planlanması gerektiğini vurgulamaktadır.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, Filyos Çayı Alt Havzası'ndaki su kalitesi verileri kullanılarak, AKM konsantrasyonunun tahmini için yığma modeli temelli bir yaklaşım önerilmiştir. Elde edilen sonuçlar, farklı algoritma kombinasyonlarının ve hiperparametre optimizasyonu süreçlerinin model performansı üzerinde önemli etkileri olduğunu ortaya koymuştur. Çalışmada, temel öğrenici olarak RO ve GA algoritmaları, meta öğrenici olarak ise KNN, ÇKA, CatBoost, AdaBoost ve Bagging algoritmaları kullanılmıştır. En yüksek performans, RO-GA+CatBoost kombinasyonu tarafından elde edilmiştir. Bu model, %87'lik R^2 değeri ve düşük hata metrikleri (MSE: 143.85, RMSE: 11.99, MAE: 9.03, MAPE: 0.21) ile diğer modellere kıyasla belirgin bir üstünlük sergilemiştir. CatBoost'un bu başarısı, hem doğrusal hem de doğrusal olmayan ilişkileri etkili bir şekilde modelleyebilme yeteneğinden kaynaklanmaktadır. RO-GA+KNN modeli de %83'lük R^2 değeri ile iyi bir performans göstermiştir. Ancak, KNN algoritması, büyük ölçekli veri setlerinde hesaplama maliyeti açısından yüksek karmaşıklığa sahip olup, özellikle yüksek boyutlu verilerde performans açısından sınırlamalar göstermektedir.

Diğer modeller (RO-GA+ÇKA, RO-GA+AdaBoost ve RO-GA+Torbalama) ise daha düşük performans sergilemiştir. Özellikle ÇKA modelinin düşük performansı, bu modelin veri setindeki karmaşık ilişkileri yakalamada yetersiz kaldığını veya hiperparametre optimizasyonunun yetersiz etkili olmadığını düşündürmektedir. Bu durum, ÇKA gibi modellerin daha karmaşık veri setlerinde etkili bir şekilde kullanılabilmesi için daha detaylı hiperparametre optimizasyonu süreçlerine ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

Öte yandan hiperparametre optimizasyonu çalışmaları, model performansını artırmada yöntem seçiminin önemini ortaya koymuştur. Özellikle, RO-GA+CatBoost modelinde Grid Search yönteminin $R^2=0.89$ ve $MSE=126.14$ gibi üstün performans metrikleri elde ederken, aynı modelde Randomized Search yönteminin $R^2=0.83$ ve $MSE=188.66$ değerleriyle nispeten daha düşük performans sergilemesi, bu durumu açıkça göstermektedir. Ayrıca, farklı modeller üzerinde gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları da bu bulguları desteklemektedir. Randomized Search yöntemi ile RO modeli için en iyi hiperparametreler $\{ 'n_estimators': 400, 'min_samples_split': 2, 'min_samples_leaf': 1, 'max_depth': 20 \}$ olarak, GB modeli için ise $\{ 'n_estimators': 600, 'max_depth': 3, 'learning_rate': 0.01 \}$ olarak belirlenmiştir. Öte yandan, Grid Search yöntemi kullanıldığında RO modelinin en iyi hiperparametreleri $\{ 'max_depth': 12, 'min_samples_leaf': 1, 'min_samples_split': 2, 'n_estimators': 300 \}$ şeklinde; GB modelinin ise $\{ 'learning_rate': 0.01, 'max_depth': 3, 'n_estimators': 300 \}$ şeklinde olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, hiperparametre optimizasyonunun model başarımını artırmada ve hata oranlarını azaltmada etkili bir yaklaşım olduğunu bir kez daha ortaya koymaktadır. Bu bulgu, hiperparametre optimizasyonunun model başarımını artırmada ve hata oranlarını azaltmada etkili bir yaklaşım olduğunu göstermektedir.

Bu çalışma, doğru algoritma seçimi ve uygun hiperparametre optimizasyonu stratejilerinin, model performansını artırmada kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Özellikle CatBoost ve KNN gibi algoritmalar, Grid Search veya Randomized Search gibi sistematik hiperparametre optimizasyon teknikleriyle birlikte kullanıldığında, tahmin doğruluğunda kayda değer artışlar sağlayabilmektedir. Bu artış, modelin parametre uzayında en uygun yapılandırmalara ulaşması sayesinde daha iyi genelleme yeteneği kazanmasıyla açıklanabilmektedir. Diğer taraftan, ÇKA gibi modellerin performansının görece düşük kalması, bu tür modellerin hiperparametre optimizasyonu süreçlerinde daha detaylı bir ayarlama gerektirdiğini veya alternatif modelleme yaklaşımlarının değerlendirilmesi gerektiğini belirtmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, su kalitesi tahmini gibi karmaşık regresyon problemlerinde yığma modelleri ve hiperparametre optimizasyonu süreçlerinin etkinliğini ortaya koymuştur. Gelecekteki araştırmalar, farklı algoritma kombinasyonlarının ve optimizasyon yöntemlerinin daha geniş veri setleri üzerinde incelenmesini gerektirmektedir. Ayrıca, özellikle ÇKA gibi modellerin performansını iyileştirmek amacıyla daha kapsamlı hiperparametre optimizasyonu çalışmalarının yapılması önerilmektedir. Bu tür araştırmalar, model

performansını artırarak, su kalitesi yönetimi ve diğer çevresel uygulamalarda daha güvenilir tahminler yapılmasına olanak tanıyacaktı.

Yazar katkısı: Bu çalışmanın tüm aşamalarına (tasarım, veri analizi, yazım ve revizyon dahil) tüm yazarlar eşit düzeyde katkı sağlamıştır.

Etik Beyan: Bu çalışma kapsamında etik kurul onayı gerektiren herhangi bir insan veya hayvan deneyi yürütülmemiştir. Bu nedenle, çalışmada etik beyan yer almamaktadır.

5. Kaynaklar

- Adiat, KAN., Ajayi, OF., Akinlalu, AA., Tijani, IB. 2020.** Prediction of groundwater level in basement complex terrain using artificial neural network: a case of Ijebu-Jesa, southwestern Nigeria. *Applied Water Science*, 10:1-14. DOI: 10.1007/s13201-019-1094-6
- Akkur, E., Öztürk, AC. 2023.** Chronic kidney disease prediction with stacked ensemble-based model. *Alfa Mühendislik ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 1(1):50-61.
- Aksoy, B., Özölçer, İH., Dünder, O., İlhan, S. 2019.** Filyos Nehri'ndeki askıda katı madde miktarının yapay sinir ağları ile belirlenmesi. *SETSCI-Conference Proceedings*, 9:404-407. DOI: 10.36287/setsci.4.6.103
- Al-Haddad, LA., Jaber, AA., Hamzah, MN., Fayad, MA. 2024.** Vibration-current data fusion and gradient boosting classifier for enhanced stat or fault diagnosis in three-phase permanent magnet synchronous motors. *Electrical Engineering*, 106(3):3253-3268. DOI: 10.1007/s00202-023-02148-z
- Arslan, RU., Yapıcı, İŞ. 2024.** Farklı örnekleme tekniklerine ve farklı sınıflandırıcılara dayanarak kalp yetmezliği tanılı hastaların sağkalımlarının incelenmesi. *EMO Bilimsel Dergi*, 14(2):35-47.
- Baghapour, MA., Shooshtarian, MR., Zarghami, M. 2020.** Process mining approach of a new water quality index for long-term assessment under uncertainty using consensus-based fuzzy decision support system. *Water Resources Management*, 34:1155-1172. DOI: 10.1007/s11269-020-02489-5
- Bayram, A., Kankal, M. 2015.** Artificial neural network modeling of dissolved oxygen concentration in a Turkish Watershed. *Polish Journal of Environmental Studies*, 24(4).
- Ewusi, A., Ahenkorah, I., Aikins, D. 2021.** Modelling of total dissolved solids in water supply systems using regression and supervised machine learning approaches. *Applied Water Science*, 11(2):1-16. DOI: 10.1007/s13201-020-01352-7
- Gaur, S., Mishra, A., Gupta, A., Jain, A., Dave, A., Eslamian, S., ..., Graillot, D. 2021.** Application of artificial neural network model for the prediction of suspended sediment load in the Large River. *Water Resources*, 48:565-575. DOI: 10.1134/S0097807821040163
- Gu, Q., Zhang, Y., Ma, L., Li, J., Wang, K., Zheng, K., ..., Sheng, L. 2016.** Assessment of reservoir water quality using multivariate statistical techniques: a case study of Qiandao Lake, China. *Sustainability*, 8(3):243. DOI: 10.3390/su8030243
- Gültepe, Y. 2019.** Makine öğrenmesi algoritmaları ile hava kirliliği tahmini üzerine karşılaştırmalı bir değerlendirme. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 16:8-15. DOI: 10.31590/ejosat.530347
- Kisi, O., Zounemat-Kermani, M. 2016.** Suspended sediment modeling using neuro-fuzzy embedded fuzzy c-means clustering technique. *Water resources management*, 30:3979-3994. DOI: 10.1007/s11269-016-1405-8
- Li, Z., Wang, G., Wang, X., Wan, L., Shi, Z., Wanke, H., ..., Uahengo, CI. 2018.** Groundwater quality and associated hydrogeochemical processes in Northwest Namibia. *Journal of Geochemical Exploration*, 186:202-214. DOI: 10.1016/j.gexplo.2017.12.015
- Lu, H., Ma, X. 2020.** Hybrid decision tree-based machine learning models for short-term water quality prediction. *Chemosphere*, 249:126169. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.126169
- Mete, B., Baki, OT., Bayram, A. 2022.** Sera Deresi Havzasında (Trabzon) Askıda Katı Madde Hareketinin İncelenmesi ve Değerlendirilmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 27(1): 419-436. DOI: 10.17482/uumfd.970338
- Moeini, M. 2024.** Hyperparametertuning of supervised bagging ensemble machine learning model using Bayesian optimization forestimating storm water quality. *Sustainable Water Resources Management*, 10(2):83. DOI: 10.1007/s40899-024-01064-9
- Onan, A. 2018.** Parçacık sürüşü eniyilemesine dayalı yığılmuş genelleme yöntemi ve metin sınıflandırma üzerinde uygulanması. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 6(2):134-141.
- Özcan, T. 2020.** Yığıllanmış özdevinimli kodlayıcılar ile göğüs kanserinin sınıflandırılması ve klasik makine öğrenme metotları ile performans karşılaştırması. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 36(2):151-160.
- Rizal, NNM., Hayder, G., Yusof, KA. 2022.** Water quality predictive analytics using an artificial neural network with a graphical user interface. *Water*, 14(8):1221. DOI: 10.3390/w14081221
- Samantaray S. Sahoo A. 2021.** Prediction of suspended sediment concentration using hybrid SVM-WOA approaches. *Geocarto International*, 37(19):5609-5635. DOI: 10.1080/10106049.2021.1920638
- Shanmugasundar, G., Vanitha, M., Çep, R., Kumar, V., Kalita, K., Ramachandran, M. 2021.** A comparative study of linear, random forest and adaboost regressions for modeling non-traditional machining. *Processes*, 9(11):2015. DOI: 10.3390/pr9112015

- Singh, P., Hasija, T., Ramkumar, KR. 2024.** Leveraging ML with XGBoost, CatBoost and LGBost classifiers to optimize water quality assessment and prediction. 2024 IEEE International Conference on Information Technology, Electronics and Intelligent Communication Systems (ICITEICS), pp. 1-6, Karnataka, India. DOI: 10.1109/ICITEICS61368.2024.10625322
- Tiyasha, T., Tran, TM, Yaseen, ZM. 2020.** A survey on river water quality modelling using artificial intelligence models: 2000-2020. *Journal of Hydrology*, 585(3731):124670. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124670
- Varol, M. 2020.** Use of water quality index and multivariate statistical methods for the evaluation of water quality of a stream affected by multiple stressors: A case study. *Environmental Pollution*, 266:115417. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115417
- Vijay, S., Kamaraj, K. 2021.** Prediction of water quality index in drinking water distribution system using activation functions based Ann. *Water Resources Management*, 35(2):535-553. DOI: 10.1007/s11269-020-02729-8
- Yadav, A., Chatterjee, S., Equeenuddin, SM. 2018.** Prediction of suspended sediment yield by artificial neural network and traditional mathematical model in Mahanadi river basin, India. *Sustainable Water Resources Management*, 4:745-759. DOI: 10.1007/s40899-017-0160-1
- Yapıcı, İŞ., Arslan, RU. 2024.** Gebelikte anne sağlığı risk gruplarının tahminine yönelik makine öğrenmesi tabanlı bir karar destek sistem tasarımı. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 7(3):509-520. DOI: 10.34248/bsengineering.1455473
- Yapıcı, İS., ErKaymaz, O., Arslan, RU. 2021.** A hybrid intelligent classifier to estimate obesity levels based on ERG signals. *Physics Letters A*, 399:127281. DOI: 10.1016/j.physleta.2021.127281
- Yildirim, P., Birant, KU., Radevski, V., Kut, A., Birant, D. 2018.** Comparative analysis of ensemble learning methods for signal classification. 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), pp. 1- 4, Turkey. DOI: 10.1109/SIU.2018.8404601
- Zhang, W., Shen, X., Zhang, H., Yin, Z., Sun, J., Zhang, X., Zou, L. 2024.** Feature importance measure of a multilayer perceptron based on the presingle-connection layer. *Knowledge and Information Systems*, 66(1):511-533. DOI: 10.1007/s10115-023-01959-7



Melissa officinalis Fidelerinin Gelişimi ve Rizosfer Özelliklerine Bokashi Gübresi Dozlarının Etkisi

The Effect of Bokashi Fertilizer Doses on the Growth and Rhizosphere Characteristics of Melissa officinalis Seedlings

Çiğdem Küçük*, Göksal Sezen, Abdul Cenap Cevheri

Harran Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye

Öz

Bokashi, faydalı mikroorganizmalar tarafından organik atıkların fermente edildiği organik bir gübredir. Bokashi, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini iyileştirerek bitki büyümesini ve verimini artırmaktadır. Bu çalışmada, bokashi gübresinin farklı dozlarının (%0 (kontrol), %2, %4, %8, %16 ve %32) toprağa uygulanması ile melisa fidelerinin gelişimi ve rizosferdeki bazı mikrobiyolojik özellikler üzerine etkisini belirlemek amaçlanmıştır. Bokashi gübresi kullanılarak melisa fidelerinin bitki boyu, sürgün ve kök yaş ağırlıkları, kök uzunluğu, yaprakların klorofil içerikleri, kök bölgesi dehidrogenaz, üreaz, β -glukosidaz enzim aktiviteleri, toprak solunumu gibi bazı toprak biyolojik özellikleri incelenmiştir. Bokashi'nin artan dozları ile klorofil miktarı, fidelerin sürgün ve kök yaş ağırlıklarında istatistiksel olarak anlamlı artış gözlenmiştir. En yüksek kök uzunluğu, kök ve sürgün yaş ağırlıklarının yanı sıra rizosferin enzimatik aktivitesinde de en belirgin artış, Bokashi'nin %32'lik uygulama dozu ile elde edilmiştir. Toprağın toplam küf sayısı bokashinin %32'lik dozu ile artmıştır. Buna karşın en yüksek toplam bakteri sayısı ise %16'lık uygulama dozunda belirlenmiştir. Sonuç olarak Bokashinin %32'lik dozunun hem bitki gelişimi hem de toprağın biyolojik özellikleri üzerinde uygun olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bokashi, organik gübre, *Melissa officinalis*, mikrobiyal aktivite, toprak enzimleri.

Abstract

Bokashi is an organic fertilizer in which beneficial microorganisms ferment organic waste. Bokashi improves plant growth and yields by improving the physical, chemical and biological properties of soil. In this study, it was aimed to determine the effect of different doses of bokashi fertilizer (0% (control), 2%, 4%, 8%, 16% and 32%) on the growth of lemon balm seedlings and some microbiological characteristics in the rhizosphere. Some soil biological characteristics of lemon balm seedlings, such as plant height, shoot and root wet weights, root length, chlorophyll content of leaves, root zone dehydrogenase, urease, β -glucosidase enzyme activities and soil respiration, were investigated using Bokashi fertilizer. Statistically significant increases were observed in chlorophyll content and shoot and root wet weights of seedlings with increasing doses of Bokashi. The highest root length, root and shoot wet weight were determined with 32% treatment dose. The highest root length, root and shoot wet weights, and the most significant increase in the enzymatic activity of the rhizosphere were obtained with the 32% application dose of Bokashi. The total mold count of the soil increased with the 32% dose of bokashi. On the other hand, the highest total bacterial count was determined at 16% application dose. As a result, it was determined that 32% dose of Bokashi was suitable for both plant growth and soil biological properties.

Keywords: Bokashi, organic fertilizer, *Melissa officinalis*, microbial activity, soil enzymes.

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: ckucuk@harran.edu.tr

Çiğdem Küçük orcid.org/0000-0001-5688-5440

Göksal Sezen orcid.org/0000-0001-9054-851X

Abdul Cenap Cevheri orcid.org/0000-0002-3759-4645



1. Giriş

Bitki atıkları, kompost, solucan gübresi veya organik atıkların toprağa uygulanması sonucu toprağın organik madde içeriğinin arttığı yapılan çalışmalarda açıklanmıştır (Hata vd. 2021, Zucco vd. 2015). Bokashi, bitkilere besin sağlayarak büyüme ve verimi artırmak (Karimuna vd. 2016, Anhar vd. 2018), toprak yapısını iyileştirmek (Hernandez vd. 2014, Barajas-Aceves 2016) ve topraktaki su tutma kapasitesini yükseltmek (Djajadi vd. 2011) amacıyla kullanılmaktadır. Bokashi; organik maddenin mikroorganizmalar ile fermentasyonu sonucu elde edilen, kompostta benzer bir organik gübredir. Ayrıca, toprağa fungi, bakteri ve aktinomisetler dahil olmak üzere toprağın sağlığını iyileştirebilen farklı mikroorganizma türleri sağlar (Silva vd. 2014). Bu nedenle, bokashi'nin toprağa uygulanması organik madde içeriğini artırır ve özelliklerini iyileştirerek bitkilere besin sağlamaktadır (Murillo-Amador vd. 2015). Kompost uygulamalarında olduğu gibi bokashi kullanımı da sürdürülebilir tarım açısından önemlidir. Bitkilerin besin alımını destekleyerek toprak verimliliğini arttırmaktadır. Bu nedenle bokashi, kompost uygulamasına sürdürülebilir bir alternatif veya tamamlayıcı bir organik girdi olarak değerlendirilmektedir (Hata vd. 2021).

Bokashi kullanımı ile bitkilerin fosfor ve potasyum konsantrasyonunun arttığı, zencefilin (*Alpinia purpurata*) bitki boyu ve gövde çapının arttığı yapılan çalışmada tespit edilmiştir (Hernandez vd. 2014). Bokashi uygulaması, mısır ve soya fasulyesinde (Batubara 2015), mısır ve fıstıkta tohum ağırlığı ve verimini artırmış (Karimuna vd. 2016, Pangaribuan vd. 2011); kanola bitkisinde (*Brassica napus* L.) ise inorganik gübre ihtiyacını yaklaşık %50 oranında azaltmıştır (Kazemeini vd. 2010). Bokashi gübresi ayrıca bamya (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) tohumlarının büyümesini de desteklemiştir (Uka vd. 2013).

Bokashi'nin yukarıda belirtilen faydalarına rağmen, gelişim süreci ve toprak verimliliği üzerindeki etkisi kapsamlı bir şekilde incelenen kompost kadar ilgi görmemiştir (Tiquia 2002, Maeda vd. 2011, Ryals vd. 2014). Etkili mikroorganizmalarla hazırlanmış bokashi'nin (EM bokashi) toprağa uygulandığı ve bitkinin bazı fizyolojik özellikleri ve ürün veriminin arttığı yapılan çalışmalarla belirlenmiştir (Xu vd. 2000, Mayer vd. 2010, Batubara 2015). Bununla birlikte, özellikle toprak özelliklerini nasıl etkilediği gibi bazı yönlerini değerlendirmek gereklidir. Tıbbi bitkiler yüzyıllardır dünya genelinde yararlı özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Tıbbi bitkiler arasında yaygın kullanım

alanına sahip olan *Melissa officinalis* L. (melisa), antitümör, antiviral, antialerjik, antiinflamatuvar gibi çeşitli biyolojik aktiviteleriyle öne çıkmaktadır (Mathews vd. 2024). Melisa veya halk arasında oğul otu olarak da bilinen *Melissa officinalis*'in faydalı özellikleri, bitkide bulunan terpenoidler, alkoller, rosmarinik asit ve fenolik antioksidanlar gibi biyoaktif bileşiklerle ilişkilendirilmiştir (Mathews vd. 2024). Melisa bitkisinin gelişimi sırasında topraktan fazla miktarda besin maddesi alması nedeniyle yetiştirilen toprağın besin maddesince zengin olması gerektiği belirtilmiştir (Anonim 2022). Ülkemiz zengin bitki örtüsüne sahip olduğundan tıbbi ve aromatik bitki ticaretinde önemli yere sahiptir. Tıbbi ve aromatik bitkilerden olan melisa bitkisi de bu bitkiler arasındadır (Dumanoglu ve Çakmak 2017). Melisa bitkisi gıda sanayinde, eczacılık, kozmetik ve peyzaj alanında kullanıldığından, üretiminin karlı olup olmadığına ortaya konması amacıyla yapılan fizibilite çalışmaları ile karlı bir yatırıma sahip olduğu açıklanmıştır (Anonim 2022). Tarım ve Orman Bakanlığı Bitkisel Üretim Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan raporda, TÜİK verileri ile diğer kurumsal veriler değerlendirilmiş, melisa bitkisine ait üretim ve tüketim değerleri açıklanmıştır (Anonim 2022). Ülkemizde melisanın üretimi ile ilgili veriler 2012 yılından 2019 yılına kadar değerlendirmiş, 2019 yılında melisa üretiminin arttığı bildirilmiştir (Anonim 2022). Bu bağlamda, bitkisel üretimde kullanılan kimyasalların ve hayvansal atıkların çevreye olan zararını azaltmak için, Ülkemizde de ekonomik önemi ve kullanım alanı artan (Dumanoglu ve Çakmak 2017) melisa bitkisi fidelerinin temel gelişim özellikleri ile rizosferin biyolojik özellikleri üzerine bokashinin etkisini değerlendirmek amaçlanmıştır. Bu çalışmada; bokashinin toprağa farklı dozlarda (kontrol (%0), %2, %4, %8, %16 ve %32) uygulanmış, uygulamaların fide gelişimi üzerine ve toprağın bazı mikrobiyolojik özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir.

2. Gereç ve Yöntemler

2.1. Gereç

Denemede kullanılan bokashi gübresi, ticari olarak temin edilmiş olup Biorfe markasına aittir. Bokashi gübresi olarak kullanılan bokashi kepeği, konsantre bokashi sıvısı emdirilerek uygun koşullarda kurutulup paketlenmiş, pH'ı 4 ve EC değeri 4426 $\mu\text{S}/\text{cm}$ olan, ticari olarak satılan üründür. Melisa fideleri ise Uludağ Agro firmasından 1 viyolde 1 adet olacak şekilde 4-5 cm boyunda, 4 yapraklı fide şeklinde temin edilmiştir.

2.2. Yöntem

2.2.1. Bokashi'nin Melisa Fidelerine Uygulanması

Araştırma, tesadüf parselleri deneme desenine göre, sera koşullarında altı farklı uygulama ve üç tekrerrür ile yürütülmüştür. 2 kg'lık saksılar, nadasa bırakılan tarladan alınan toprak ile doldurulmuştur. Kullanılan toprağın pH'ı 8.2, organik madde (%) 1.21, EC 0.2 mmhos/cm, kireç (%) 2.37, 179.6 kg/da toplam K, 4.90 kg/da toplam P, azot içeriği ise %0.07 olup, killi bünyeye sahiptir. Bokashi gübrelerinin toprağa uygulanmasında; bokashi saksı toprağına yüzde 0 (kontrol), 2, 4, 8, 16 ve 32 oranında (w/w) karıştırmıştır. Tedarik edilen fideler, farklı dozlarda bokashi uygulanan saksılara ekilmiştir. Fidelerin gelişimleri dokuz hafta boyunca izlenmiş ve bu süre sonunda hasat edilmiştir.

2.2.2. Bitki Büyüme Ölçümleri

Bitki büyümesini belirlemede ölçülen parametreler ise; bitki boyu, kök uzunluğu, sürgün yaş ağırlığı, kök yaş ağırlığıdır. Her bir ölçüm, her bir uygulamanın üç tekrarının ortalaması olarak kaydedilmiştir.

2.2.2.1. Sürgün boyu (cm)

Hasat sırasında sürgün boyu; kök boğazından bitkinin en uç kısmına kadar cetvel ile ölçümü ile belirlenmiştir (Küçük ve Pek 2025).

2.2.2.2. Kök uzunluğu (cm)

Fide kökleri, topraktan ayrılmış ve kök uzunlukları cetvel ile ölçülerek kaydedilmiştir. (Küçük ve Pek 2025).

2.2.2.3. Sürgün yaş ağırlığı (g/bitki)

Fideler hasat zamanı kök boğazından kesilmiş, musluk suyu ile yıkandıktan sonra kurutma kağıdı üzerinde nemi alınmıştır. Her bir uygulamaya ait sürgünlerin yaş ağırlıkları hassas terazi ile tartılarak belirlenmiştir (Küçük ve Pek 2025).

2.2.2.4. Kök yaş ağırlığı (g/bitki)

Fide kökleri topraktan su ile yumuşatılarak çıkarılmış, musluk suyu altında yıkandıktan sonra kurutma kağıdı ile fazla suyu emdirilmiştir. Her bir uygulamaya ait kök örnekleri hassas terazide tartılmıştır (Küçük ve Pek 2025).

2.2.3. Yaprakların Klorofil İçeriği

Hasat zamanı yaş bitki yaprakları (0.5 g) %80 aseton ile homojenize edilmiş, 15 dk 9.000×g'de santrifüj edilmiştir. Santrifüj sonrası üst faz (süpernatant), 663 ve 645 nm dalga boylarında spektrofotometre (Shimadzu, Japonya) ile analiz

edilmiştir. Klorofil içerikleri Arnon (1949)'a göre hesaplanmıştır.

2.2.4. Rizosfer Enzim Analizleri

Rizosfer bölgesinden toprak örnekleri hasat sırasında alınmış, bekletilmeden hemen analizleri yapılmıştır.

2.2.4.1. Üreaz aktivite (EC 3.5.1.5)

Üreaz aktivitesi, Hoffmann ve Teicher (1961)'in önerdiği yönteme göre toprağın üre ve sitrat tamponu ile inkübasyonunun ardından 578 nm dalga boyunda spektrofotometrik olarak belirlenmiştir.

2.2.4.2. β -glukosidaz enzim aktivitesi (EC 3.2.1.21)

Hasat zamanında köke yapışan toprak (rizosfer bölgesi) örneklerine toluen, MUB tamponu (pH 6), p-nitrofenil β -D-glukopiranosid eklenerek 60 dk boyunca 37°C'de inkübe edilmiştir. İnkübasyon sonrasında CaCl_2 ve THAM solüsyonu ilave edilmiş, ardından 10.000×g'de 10 dakika santrifüjlenmiştir. Süpernatant 410 nm dalga boyunda spektrofotometrede ölçülmüş enzim miktarı hesaplanmıştır (Tabatabai 1982).

2.2.4.3. Dehidrogenaz aktivite

Rizosfer toprağının dehidrogenaz aktivitesi, inkübasyon zamanında trifenilformazana indirgenen bir substrat olarak 2,3,5-trifeniltetrazolium klorid kullanılarak kolorimetrik olarak Pepper vd. (1995)'e göre belirlenmiştir.

2.2.5. Toprak Solunumu (CO_2 içeriği)

Rizosfer toprak örneklerinde solunum Isermayer yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Her bir uygulamaya ait örnekler (50 g) hasat zamanı kök bölgesinden alınmış ve CO_2 'nin 1 l'lik kavanozlarda alkali çözeltide 25 °C'de 24 sa inkübe edilmiş, 1 M HCl ile fenolftaleyn indikatörünün kullanımıyla titre edilerek Anderson (1982)'e göre ölçümleri yapılmıştır.

2.2.6. Rizosferdeki Mikroorganizma Sayısı

Her bir uygulamadan alınan rizosfer toprak örneklerinden dilüsyonlar hazırlanmıştır. Rizosferdeki toplam bakteri sayısı Nutrient Agar, toplam küf+maya sayısı ise Sabouraud agar besiyeri kullanılarak Pepper vd. (1995)'e göre belirlenmiştir.

2.2.7. İstatistik Analiz

Ölçüm ve analizlerden elde edilen tüm değerler JMP 11 kullanılarak istatistiksel olarak analiz edilmiştir. İncelenen gruplar arasındaki istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları incelemek için Student's-t testi ile varyans analizi (ANOVA)

uygulanmıştır. Sonuçlar $p < 0.05$ olduğunda istatistiksel olarak anlamlıdır.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Bokashi Dozlarının Melisa Bitkisinin Büyüme Özelliklerine Etkisi

Melisa officinalis fidelerinin bitki boyu, kök uzunluğu, sürgün ve kök yaş ağırlığı bokashi uygulamaları sonucunda istatistiksel olarak anlamlı şekilde artış göstermiştir ($p < 0.05$). Bitki yapılarının, bitkinin topraktan aldığı besin maddeleriyle ilgili olduğu açıklanmıştır (Quiroz ve Cespedes 2019). Çalışmamızda melisa fidelerinin bokashi uygulaması yapılmayan kontrole göre artan dozlardaki bokashi uygulamasının özellikle metabolik süreçte bitki için gerekli olan N, P ve K gibi besin maddelerini sağlayabildiğinden bitki gelişiminin artan bokashi dozlarıyla pozitif yönde etkilendiği gözlemlenmiştir. Bokashinin benzer bir etkisi ıspanakta da tespit edilmiştir (Quiroz ve Cespedes 2019). Araştırmacılar, Bokashi uygulamalarının bitkiye daha istikrarlı ve uzun süreli temin edilebilir azot sağladığından bitki büyümesini teşvik ettiğini saptamışlardır (Quiroz ve Cespedes 2019). Çalışmamızda bokashi uygulamasının melisa fidelerinin bitkinin vejetatif büyümesini iyileştirmede etkili olduğu belirlenmiştir (Çizelge 1). Bokashi'nin domatesin vejetatif büyümesi için uygun olduğu, bokashi'nin besin içeriğinin bitkinin ihtiyaç duyduğu besinleri sağlayabildiği Xu vd. (2000) tarafından belirlenmiştir. Uygulamalar bitki boyunda etkili olmuş, bitki boyu 15-27 cm arasında değişmiş en düşük bitki boyu bokashi uygulaması yapılmayan melisa fidesinde ölçülmüştür. En yüksek bitki boyu ise %16 ve %32 bokashi uygulamasında elde edilmiştir (Tablo 1). Bokashi uygulaması ile mısır (*Zea mays*), soya fasulyesi (*Glycine max*) (Batubara 2015), domates (Anhar vd. 2018), soğan (*Allium cepa* L.), jalapeno

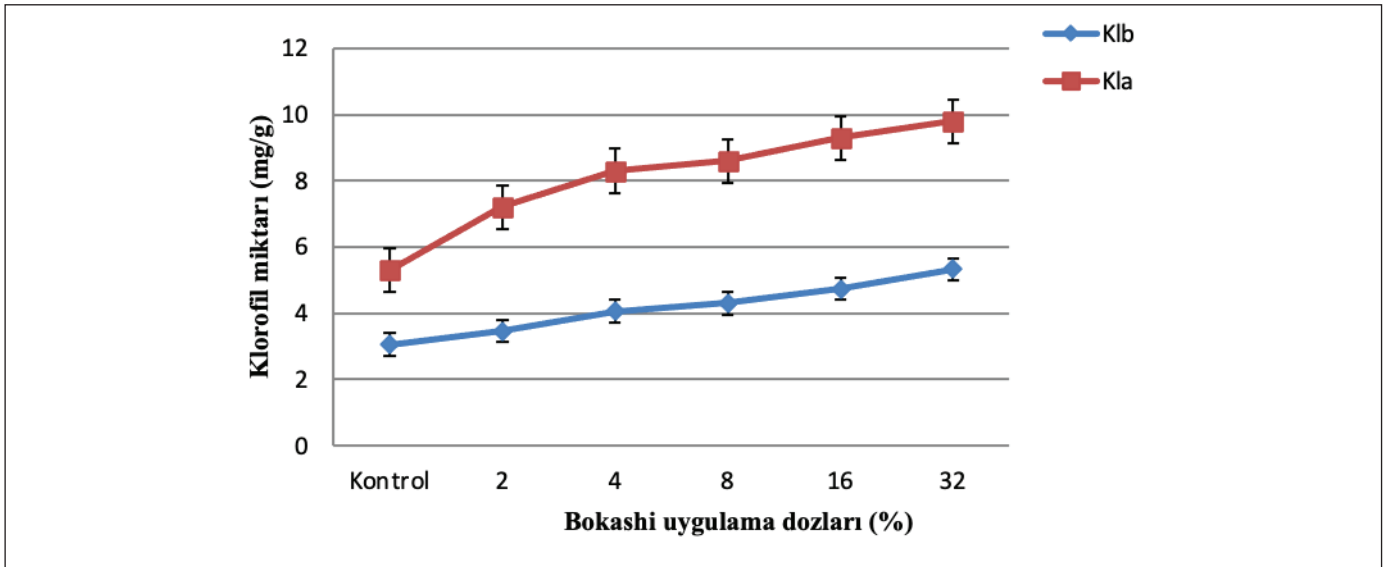
biberinin (*Capsicum annuum* L.) bitki boyunun arttığı rapor edilmiştir (Alvarez-Solis vd. 2016). Uygulama dozları sürgün yaş ağırlığını da etkilemiştir. En düşük ortalama sürgün yaş ağırlığı 1.66 g/bitki ile kontrolde, en yüksek sürgün yaş ağırlığı ise %32 bokashi uygulamasında 3.55 g olarak alınmıştır. Bunu sırası ile %16 ve %8 bokashi uygulaması izlemiştir. En yüksek kök uzunluğu %32 bokashi uygulamasında belirlenmiş, bunu sırası ile %16 ve %8 bokashi uygulaması izlemiştir. Uygulamalar fide kök yaş ağırlığı üzerinde de etkili bulunmuştur. Bokashi'nin %32, %16 ve %8'lik uygulamaları kök uzunluğunu kontrole göre istatistiki olarak önemli ölçüde artırmıştır ($p < 0.05$). Yapılan bir araştırmada da bokashinin (9 g/bitki) toprağa uygulanması ile roka ve turpta kök biyokütlesi ve hacmini artırarak verime olumlu katkı sağladığı açıklanmıştır (Hata vd. 2019).

Uygulamaların melisa fide yapraklarında klorofil içeriklerine etkileri de farklılık göstermiştir. En yüksek klorofil a ve b içeriği %32 bokashi uygulamasında belirlenirken, klorofil a ve b'nin en düşük miktarı kontrolde belirlenmiştir (Şekil 1). Bu bulgular, Santos ve ark. (2020)'nın klorofil artışları üzerine yaptığı çalışma ile de örtüşmektedir. Toprağa uygulanan bokashi uygulamasının bitkinin kök aktivitesini teşvik ederek, rizosferin mikroorganizma sayısı ile bitkinin makro (azot, fosfor ve potasyum) ve mikro (demir, mangan, çinko vb) besin içeriğinin arttığı bildirilmiştir (Abed El-Hamied 2014). Topraktaki yüksek miktardaki mikro besin içeriği varlığının, bitkilerin toplam klorofil miktarını artırdığı, bitkide daha fazla karbonhidrat biriktiği böylece bitkinin gelişimine katkı sağladığı açıklanmıştır (Erdal vd. 2024). *Kalanchoe blossfeldiana* üzerinde yapılan çalışmada da, bokashi uygulamasının fotosentez oranını artırdığı bildirilmiştir (Phooi vd. 2022).

Çizelge 1. Melisa fidelerinin 9 haftalık yetiştirilme dönemindeki bitki boyu (cm), sürgün yaş ağırlığı (g/bitki), kök yaş ağırlığı (g/bitki), kök uzunluğu (cm) üzerindeki Bokashi'nin farklı dozlarının etkisi.

Bokashi dozu (%)	Bitki boyu (cm)	Sürgün yaş ağırlığı (g/bitki)	Kök uzunluğu (cm)	Kök yaş ağırlığı (g/bitki)
Kontrol	15 c*	1.66 c	4.7 d	0.23 c
2	19.3 b	1.95 c	6 d	0.40 b
4	26 a	2.22 bc	6.7 d	0.40 b
8	26.8 a	2.83 abc	11.3 c	0.60 a
16	27 a	3.26 ab	15 b	0.59 a
32	27 a	3.55 a	19.7 a	0.67 a
LSD ($p < 0.05$)	3.2	1.2	2.8	0.1

*Farklı harfler birbirinden farklı olan değerleri göstermektedir.



Şekil 1. Farklı Bokashi uygulama dozlarının melisa fide yapraklarında klorofil miktarına etkileri.

Bokashi uygulaması, tropikal bir ağaç türü olan *Alibertia edulis*'in yapraklarının klorofil a ve b içeriğinin artmasını sağlamıştır (Santos vd. 2020). Bokashi uygulaması toprakların besin içeriğini özellikle magnezyum içeriğini etkileyebilmiştir (Santos vd. 2020). Bokashi ile iyileştirilmiş toprakta yüksek konsantrasyonda kalsiyum ve magnezyum tespit edilmiş, domates bitkisinin fotosentez ve meyve veriminde artış tespit edilmiştir (Xu vd. 2000). Kimyasal gübrelere karşılaştırıldığında, bokashi uygulaması fıstık ağacının fotosentez oranını artırmıştır (Pei-Sheng ve Hui-Lian 2002). Çalışmamızda elde edilen bulgular, bokashi uygulamasının klorofil a ve b içerikleri üzerinde pozitif yönde etkili olduğunu göstermiştir. En düşük klorofil seviyeleri kontrol grubunda belirlenirken, artan bokashi dozlarıyla birlikte yapraklardaki klorofil a ve b miktarlarında istatistiksel olarak anlamlı artışlar kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, daha önce farklı bitki türlerinde rapor edilen bulgularla (Santos vd. 2020; Xu vd. 2000; Pei-Sheng ve Hui-Lian 2002) uyumlu olup, bokashi uygulamasının fotosentez kapasitesi üzerinde olumlu etkiler sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Bokashi uygulaması içerdiği organik maddeler sayesinde toprağın humus içeriğini artırabilir (Hata vd. 2021). Humus, hidrofilik bir bileşik olması nedeniyle toprakta su emilimini ve suyun depolanmasını iyileştirmekte, bu sayede buharlaşma kayıplarını azaltmaktadır. Topraktaki organik madde miktarındaki artış, su tutma kapasitesini olumlu yönde etkileyerek toprakta meydana gelen buharlaşma oranını düşürmektedir. (Djajadi vd. 2011). Böylece toprakta depolanan su hacmi artmakta ve dolaylı olarak bitki dokularındaki su içeriği de yükselmektedir. Bokashi gübresinin ayrıca kök uzunluğu ve kök ağırlığını

artırarak bitki kök gelişimini teşvik ettiği belirlenmiştir (Xu vd. 2000). Organik madde, N, P, K ve diğer mikro elementlerin kaynağı olarak toprak yapısını iyileştirmek için bir granülör görevi göstermektedir. Bu sayede iyileştirilen toprak yapısı, daha sağlıklı bir kök gelişimi ile sonuçlanmakta ve bitkilerin daha geniş bir toprak hacminden besin maddesi almasını kolaylaştırmaktadır. Bu durum fotosentez sürecini optimum düzeyde desteklemektedir (Shaheen vd. 2007). Efthimiadou vd. (2010) tarafından bildirilen inek gübresi-nin tatlı mısırdaki fotosentez oranının inorganik gübrelere karşılaştırıldığında artırabileceği sonucu ile organik gübre olan bokashi uygulaması ile fotosentez pigmentlerinin artışı tutarlıdır. Fotosentez hızının artması, besin rezervlerinin artmasıyla sonuçlanan biyokütle üretiminin yükselmesine katkı sağlamaktadır (Liu vd. 2017, Munyahali vd. 2017). Bokashi uygulaması toplam N, P ve K besin içeriğini artırma eğiliminde olduğundan, inorganik gübrelere kullanımı-nı tavsiye edilen dozların altına düşürecektir. Artan dozların, özellikle toprakların organik maddenin emilimini artırabileceğini göstermiştir. Böylece, mikroorganizmalar tarafından mineralizasyon yoluyla açığa çıkan besin elementlerinin tutulması artacaktır. Bu durum, bitki köklerinin, bitkilerin büyümesi ve gelişmesi için ihtiyaç duyulan besinleri kolaylıkla almasına, bitkinin gelişimine yardımcı olacaktır.

3.2. Bokashi Uygulamasının Toprağın Biyolojik Özelliklerine Etkisi

Bokashi uygulaması topraktaki mikroorganizma sayısını etkilemiştir ($p < 0.05$) (Çizelge 2). Çalışmamızda bokashi-nin artan dozları, kontrol grubuna kıyasla topraktaki top-

lam fungi sayısını artırmıştır. Bununla birlikte, bokashinin %32'lik uygulama dozunda ise topraktaki toplam bakteri sayısında düşüş belirlenmiştir. Bu azalış, topraklardaki fungal popülasyondaki hızla artış nedeniyle bakteri popülasyonunu baskılamasından kaynaklanabilir. Bokashi gübresi gibi organik gübrelerin topraklara uygulanması ile topraklardaki azot fikse eden bakteriler ve fosfat çözücü bakteriler gibi yararlı mikroorganizmaların popülasyonunun arttığı, toprağa eklenen organik gübrenin toprak organizmaları için besin ve enerji kaynağı görevi gördüğü yapılan çalışmalarda açıklanmıştır (Zhang vd. 2017). Organik gübreler toprak organizmalarının çeşitliliğini ve popülasyonunu artırarak, artan mikrobiyal aktiviteyle karakterize edilen toprak verimliliğini artırarak toprağın biyolojik özelliklerini değiştirmede rol oynar (Lasmini vd. 2018, Zhang vd. 2017). Elde edilen bulgular, mikroorganizma yoğunluğundaki artışın bokashi uygulamasına bağlı olduğunu gösteren literatürle uyumludur. Kontrole göre artan dozlarda bokashi uygulaması, rizosferin üreaz, dehidrogenaz, glukosidaz enzim aktiviteleri ile CO₂ içeriğini artırmıştır (Çizelge 2). Toprakta mikrobiyal aktivitenin artması bitki büyümesi ve verimin artması için önemli roller oynayabilir. Bokashi; mikroorganizma sayısında, mikrobiyal karbon biyokütlesinde, bazal toprak solunumunda önemli bir artışa neden olan mikrobiyal aktiviteyi uyarır (Quiroz ve Cespedes 2019). Bazı heterotrofik ve fototrofik prokaryotlar, alg ve funginin oksin, gibberellin ve sitokinin gibi fitohormonları sentezleyebildiği (Quiroz ve Cespedes 2019) ve bu mikroorganizmaların, Bokashi nedeniyle kolonize olmaları durumunda bitkiler için büyüme hızlandırıcıları olarak hareket edebileceği bilinmektedir (Liu vd. 2017).

Toprakta %25, %50 ve %66 oranlarında kompost, solucan gübresi ve bokashi uygulandığında kahve (*Coffea arabica* L.

cv. 'Bourbon') ağacının gelişimi ve topraktaki mikorizal kolonizasyon ile asit ve alkali fosfataz, üreaz aktivitesi değerlendirilmiştir (Gomez-Velasco vd. 2014). Araştırmacılar %25 ve daha yüksek oranda bokashinin (%50 veya %66) kahve ağacının gelişiminde olumlu etkisini belirlemişler, sürgün yaş ağırlığının, organik gübre kullanılmayan kontrol bitkilerine kıyasla 5 kat, %50 uygulandığında 8 kat ve %66 uygulandığında 10 kat arttığını bildirmişlerdir. Ayrıca yüksek dozlardaki uygulamalar; kökün mikorizal kolonizasyonunu, toprağın asit ve alkalın fosfataz ile üreaz aktivitesini artırmıştır. Bokashi düşük maliyetli bir fertigasyon ürünü olduğundan ve hazırlanması nispeten kolay olduğundan, daha yüksek verim elde edilip edilemeyeceğini öğrenmek için %10'dan daha yüksek konsantrasyonlarda araştırılmasının daha uygun olacağı Hata vd. (2021) tarafından bildirilmiştir. Ayrıca, araştırmacılar bokashi uygulamalarının domates hastalıkları ve zararlıları üzerindeki etkilerini değerlendirmişler, bokashinin %10'luk doz uygulamasının hem hastalık şiddetini azalttığını hem de domates verimini artırdığını tespit etmişlerdir. Aynı zamanda artan dozlarda hastalık şiddetini tetikleyebileceğini de belirtmişlerdir (Alyokhin vd. 2020; Hata vd. 2021).

4. Sonuç ve Öneriler

Çalışmamız bokashi uygulamasının *Melissa officinalis* L. fiderlerinin vejetatif gelişimi ile rizosfer bölgesindeki biyolojik aktivite üzerine olumlu etkilerini ortaya koymuştur. Özellikle %16 ve %32 bokashi dozları, bitki boyu, kök uzunluğu, klorofil içeriği, kök yaş ağırlığı ve toprak enzim aktivitelerinde anlamlı artış sağlamıştır. Ayrıca, bokashi uygulaması toplam mikroorganizma sayısını artırırken, bazı dozlarda bakteri-fungi dengesi üzerinde etkili olduğu tespit edilmiş-

Çizelge 2. Bokashi uygulama dozlarının toprak enzim aktiviteleri ve mikroorganizma sayısı üzerindeki etkileri.

Uygulama dozu (%)	Üreaz (mg/100 g toprak)	Dehidrogenaz (µgTPF/g toprak)	β-glukosidaz (µg-p nitrofenol/g toprak)	CO ₂ üretimi (mg CO ₂ -C/50g toprak)	Küf+maya (x10 ⁴ cfu/g toprak)	Toplam bakteri (x10 ⁶ cfu/g toprak)
Kontrol	0.82 f	7.76 f	0.59 f	2.9 f	0.71 f	1.12 e
2	1.27 e	19.2 e	5.9 e	9.8 e	1.53 e	3.60 bc
4	1.59 d	26.8 d	10.8 d	13.1 d	2.23 d	3.10 c
8	2.80 d	38.9 c	13.4 c	14.1 c	5.03 c	4.17 b
16	4.14 b	48.2 b	17.07 b	15.8 b	6.27 b	6.27 a
32	6.07 a	67.6 a	25.6 a	17.3 a	8.33 a	2.33 d
LSD (p<0.05)	4.9	6.2	0.7	0.9	0.4	0.7

Farklı harfler birbirinden farklı olan değerleri göstermektedir.

tir. Bu sonuçlar, bokashi'nin sürdürülebilir tarım uygulamaları kapsamında ekolojik gübre alternatifi olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Aşırı sentetik gübre kullanımının ekosistem sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri göz önünde bulundurulduğunda, bokashi gibi organik gübrelerin kullanımı, çevre dostu üretim sistemleri açısından önem arz etmektedir. Bokashi uygulamasının uzun vadeli toprak sağlığına etkileri ile diğer tıbbi aromatik bitkiler üzerindeki potansiyel faydalarının da değerlendirilmesi önerilmektedir.

Yazar katkısı: Çiğdem Küçük, Göksal Sezen, Abdul Cenap Cevheri: çalışmayı planlamış ve tasarlamıştır, Çiğdem Küçük, Göksal Sezen, Abdul Cenap Cevheri: Çalışma hakkında verileri toplamış ve analiz etmiştir, Çiğdem Küçük, Göksal Sezen, Abdul Cenap Cevheri: Çalışmanın analizlerini yaparak makaleyi yazmıştır.

Etik kurul onayı: Bu çalışma için etik kurul onayı alınmasına gerek yoktur.

5. Kaynaklar

- Abed El-Hamied, SA. 2014.** Effect of multi-ingredient of Bokashi on productivity of mandarin trees and soil properties under saline water irrigation. *IOSR J. Agric. Vet. Sci.*, 7: 79–87. Doi:10.9790/2380-071127987
- Alvarez-Solis, JD., Mendoza-Nunez, JA., Leon-Martinez, NS., Castellanos-Albores J., Gutierrez-Miceli, FA. 2016.** Effect of bokashi and vermicompost leachate on yield and quality of pepper (*Capsicum annuum*) and onion (*Allium cepa*) under monoculture and intercropping cultures. *Cienc. e Investig. Agrar.*, 43:243–252. Doi:10.4067/S0718-16202016000200007
- Alyokhin, A., Nault, B., Brown, B. 2020.** Soil conservation practices for insect pest management in highly disturbed agroecosystems—a review. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 168:7–27. Doi:10.1111/eea.12863
- Anderson, JPE. 1982.** Soil respiration. In: methods of soil analysis, part 2, chemical and microbiological properties (Ed. A.L. Page). ASA-SSSA, Madison, Wiscinsin. pp. 831–871.
- Anhar, A., Junialdi, R., Zein, A., Advinda, L., Leilani, I. 2018.** Growth and tomato nutrition content with Bandotan (*Ageratum Conyzoides* L) bokashi applied. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng.* 335:1–9. Doi: 10.1088/1757-899X/335/1/012017
- Anonim, 2022.** Melisa tarımı ve endüstrisi. Fizibilite raporu. Batı Akdeniz Kalkınma Ajansı s.58 <https://baka.gov.tr/assets/upload/dosyalar/melisa-tarimi-ve-endustrisi-fizibilite-raporu.pdf>
- Arnon, D.T. 1949.** Copper enzymes in isolated chloroplast polyphenol oxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiol.*, 24:1–15. Doi:10.1104/pp.24.1.1
- Batubara, S. 2015.** Growth response and yield of maize and soybean in intercropping to the urban waste compost and rock phosphate. *Int. J. Sci. Res.*, 6:2319–7064.
- Barajas-Aceves, M. 2016.** Organic waste as fertilizier in semiarid soils and restoration in mine sites. Marcelo L. Larramendy and Sonia Soloneski [eds.], *Organic fertilizers—from basic concepts to applied outcomes*. InTech., 243–271 p. Doi: 10.5772/62665
- Djajadi, J., Heliyanto, B., Hidayah, N. 2011.** Changes of physical properties of sandy soil and growth of physic nut (*Jatropha curcas* L.) due to addition of clay and organic matter. *Agrivita*, 33:245–250. Doi:10.17503/agrivita.v33i3.75
- Dumanoğlu, E., Çakmak, B. 2017.** Oğulotu (*Melissa officinalis* L.) tohumunun kaplanması ve pelletlenmesinin tohum kalitesi üzerine etkileri. *Tarım Mak. Bil. Dergisi*, 13:87–92.
- Efthimiadou, A., Bilalis, D., Karkanis, A., Froud-Williams, B. 2010.** Combined organic/inorganic fertilization enhance soil quality and increased yield, photosynthesis, and sustainability of sweet maize crop. *Aust. J Crop Sci.*, 4:722– 729.
- Erdal, İ., Yaylacı, C., Türkan, Ş.A., Merji, R. 2024.** Sığır Gübresi ve Sığır Gübresi Kaynaklı Bokashi Kompostlarının Marulun Gelişimi ve Yaprak SPAD Değerlerine Etkisi. *Isparta. Üniv. Ziraat Fak. Der.*, 19:85–93. Doi:10.54975/sduzfd.1591463
- Gomez-Velasco, DA., Alvarez-Solis, JD., Ruiz-Valdiviezo, VM., Abud-Archilla, M., Montes-Molina, JA., Dendooven, L., Gutierrez-Miceli, FA. 2014.** Enzymatic activities in soil cultivated with coffee (*Coffea arabica* L. cv. 'Bourbon') and amended with organic material. *Comm. Soil Sci Plant Anal.*, 45:2529–2538 Doi:10.1080/00103624.2014.932375
- Hata, FT., Ventura, MU., de Freitas Fregonezi, GA., de Lima, RF. 2021.** Bokashi, boiled manure and penergetic applications increased agronomic production variables and may enhance powdery mildew severity of organic tomato plants. *Horticulturae*, 7(2):27. Doi:10.3390/horticulturae7020027
- Hata, FT., Ventura, MU., Sousa, V., Fregonezi, GAF. 2019.** Low-cost organic fertilizations and bioactivator for arugula-radish intercropping. *Emirates Journal of Food & Agri.*, 31: 773–778. Doi:10.9755/ejfa.2019.v31.i10.2018
- Hernandez, MIS., Gómez-Álvarez, R., Rivera-Cruz, M., del Cruz, R., Álvarez-Solis, JD., Pat-Fernández, JM., Ortiz-García, CF. 2014.** The influence of organic fertilizers on the chemical properties of soil and the production of *Alpinia purpurata*. *Cienc e Investig Agrar.* 41:215–224 Doi:10.4067/S0718-16202014000200008
- Hoffmann, G., Teicher, K. 1961.** Colorimetric method for the determination of the urease activity in soil. *Zeit. Pflanzenernachr. Dung. Bodenkunde.* 95:55–63.
- Karimuna, L., Rahni, NM., Boer, D. 2016.** The use of bokashi to enhance agricultural productivity of marginal soils in Southeast Sulawesi, Indonesia. *J. Trop Crop Sci.*, 3: 1–6 Doi: 10.29244/jtcs.3.1.1–6

- Kazemeini, SA., Hamzehzarghani, H., Edalat, M. 2010.** The impact of nitrogen and organic matter on winter canola seed yield and yield components. *Aust J Crop Sci.* 4: 335- 342
- Küçük, Ç., Pek, S. 2025.** Vermikompost ve sıvı deniz yosunu ekstraktı uygulamalarının arpa (*Hordeum vulgare* L.) rizosferinde mikrobiyal solunum ve β -glukosidaz aktiviteye etkisi. *Manas J. of Agri. Vet. Life Sci.* 14 (2):125-133. Doi:10.53518/mjavl.1463512
- Lasmini, SA., Nasir, B., Hayati, N., Edy, N. 2018.** Improvement of soil quality using bokashi composting and NPK fertilizer to increase shallot yield on dry land. *Australian Journal of Crop Science.* 12:1743-1749. Doi: 10.21475/ajcs.18.12.11.p1435
- Liu, X., van Groenigen, K., Dijkstra, P., Hungate, B. 2017.** Increased plant uptake of native soil nitrogen following fertilizer addition – not a priming effect? *Appl Soil Ecol.* 114: 105–110. Doi: 10.1016/j.apsoil.2017.03.011
- Maeda, K., Hanajima, D., Toyoda, S., Yoshida, N., Morioka, R., Osada, T. 2011.** Microbiology of nitrogen cycle in animal manure compost. *Minireview Microbial Biotechnol* 6:700–709. Doi: 10.1111/j.1751-7915.2010.00236.x
- Mathews, IM., Eastwood, J., Lamport, DJ., Cozannet, RL., Fanca-Berthon, P., Williams, CM. 2024.** Clinical Efficacy and Tolerability of Lemon Balm (*Melissa officinalis* L.) in Psychological Well-Being: A Review. *Nutrients*, 16: 3545. Doi:10.3390/nu16203545
- Mayer, J., Scheid, S., Widmer, F., Fließbach, A., Oberholzer, HR. 2010.** How effective are 'effective microorganisms® (EM)'? Results from a field study in temperate climate. *Appl Soil Ecol.*, 46:230–239. Doi:10.1016/j.apsoil.2010.08.007
- Munyahali, W., Pypers, P., Swennen, R., Walangululu, J., Vanlauwe, B., Merckx, R. 2017.** Responses of cassava growth and yield to leaf harvesting frequency and NPK fertilizer in South Kivu, Democratic Republic of Congo. *Field Crops Res.*, 214:194–201. Doi:10.1016/j.fcr.2017.09.018
- Murillo-Amador, B., Morales-Prado, LE., Troyo-Diéguez, E., Córdoba-Matson, MV., HernándezMontiel, LG., RuedaPuentes, EO., Nieto-Garibay, A. 2015.** Changing environmental conditions and applying organic fertilizers in *Origanum vulgare* L. *Front Plant Sci.* 6:549. Doi:10.3389/fpls.2015.00549
- Pangaribuan, D., Pratiwi, H., Lismawanti, OL. 2011.** Pengurangan pemakaian pupuk anorganik dengan penambahan bokashi serasah tanaman pada budidaya tanaman tomat (the reduction of inorganic fertilizers using the addition of plant bokashi in the tomato cultivation. *J Agron Ind.* 39: 173– 179. Doi: 10.24831/jai.v39i3.14960
- Pei-Sheng, Y., Hui-Lian, X. 2002.** Influence of EM bokashi on nodulation, physiological characters and yield of peanut in nature farming fields. *J. Sustain. Agric.*, 19:105–112. Doi:10.1300/J064v19n04_10
- Pepper, IL., Gerba, CP., Brendecke, JW. 1995.** Environmental microbiology: a laboratory manual. Academic Press Inc. New York, USA
- Phooi, CL., Azman, EA., Ismail, R. 2022.** Role of organic manure bokashi improving plant growth and nutrition: A Review. *Sarhad J. of Agri.*, 38:1160-1546. Doi:10.17582/journal.sja/2022/38.4.1478.1484
- Quiroz, M., Cespedes, C. 2019.** Bokashi as an Amendment and Source of Nitrogen in Sustainable Agricultural Systems: a Review. *J Soil Sci Plant Nutr* 19:237–248. Doi:10.1007/s42729-019-0009-9
- Ryals, R., Kaiser, M., Torn, MS., Berhe, AA., Silver, WL. 2014.** Impacts of organic matter amendments on carbon and nitrogen dynamics in grassland soils. *Soil Biol Biochem* 68:52–61. Doi: 10.1016/j.soilbio.2013.09.011
- Santos, CC., Veira, MC., Zarate, NAH., Carnevali, TO., Gonçalves, WV. 2020.** Organic Residues and Bokashi Influence in the Growth of *Alibertia edulis*. *Floresta e Ambiente* 27(1): e20171034 Doi:10.1590/2179-8087.103417
- Shaheen, A., Fatma, M., Rizk, A., Singer, SM. 2007.** Growing onion plants without chemical fertilization. *Res J Agr Biol Sci.* 3:95-104.
- Silva, MA., Santos, CM., Vitorino, HS., Rhein, AF. 2014.** Pigmentos fotossintéticos e índice SPAD como descritores de intensidade do estresse por deficiência hídrica em cana-de-açúcar. *Bioscience Journal*, Uberlândia, 30:173-181
- Tabatabai, MA. 1982.** Soil Enzymes. In: Page, A.L., Miller, R.H. and Keeney, D.R., Eds., *Methods of Soil Analysis*, ASA, SSSA, Publisher, Madison, WI, 903-947.
- Tiquia, SM. 2002.** Microbial transformation of nitrogen during composting. In: Insam H, Riddech N, Klammer S (eds) *Microbiology of composting*. Springer, New York (NY), pp 237–246
- Uka, UN., Chukwuka, KS., Iwuagwu, M. 2013.** Relative effect of organic and inorganic fertilizers on the growth of Okra *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench. *J Agri Sci.*, 58 :159- 166. Doi: 10.2298/JAS1303159U
- Xu, HL., Wang, R., Mridha, MAU. 2000.** Effects of organic fertilizers and a microbial inoculant on leaf photosynthesis and fruit yield and quality of tomato plants. *J. Crop Prod.*, 3:173– 182. Doi:10.1300/J144v03n01_15
- Zhang, K., Chen, L., Li, Y., Brookes, P., Xu, J., Luo, Y. 2017.** The effects of combinations of biochar, lime, and organic fertilizer on nitrification and nitrifiers. *Biol Fertil Soils*, 53: 77-87. Doi: 10.1007/s00374-016-1154-0
- Zucco, MA., Walters, SA., Chong, SK., Klubek, BP., Masabni, JG. 2015.** Effect of soil type and vermicompost applications on tomato growth. *Int J Recyc Org Waste Agric.*, 4:135–141 Doi: 10.1007/s40093-015-0093-3



Microwave-Cured Pervious Geopolymer Concrete: Role of Aggregate Gradation

Mikroalga Kürü ile Üretilen Geçirimli Geopolimer Beton: Agrega Gradasyonunun Rolü

Adil Gultekin* 

Duzce University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Duzce, Türkiye

Abstract

In this study, microwave technology was used as an alternative curing method, and the effect of aggregate gradation on the properties of fly ash-based pervious geopolymer concrete (PGC) were examined. Microwave-cured PGCs were produced, with one mixture containing only coarse aggregates in the 8-16 mm size range, while the others incorporated partial aggregate replacements-25% of the total aggregate content with finer aggregates in the 4-8 mm and 0.5-4 mm size ranges. For the sake of comparison, oven-cured PGC was also produced. It was determined that the compressive strength of 5 minutes microwave-cured concretes at 700-watt power level varied between 9.7 MPa-12.2 MPa, depending on the aggregate gradation, and these values were higher than the compressive strength (8.2 MPa) of the oven-cured concrete produced at 90°C for 24 hours. The water permeability of microwave-cured concretes decreased with the substitution of smaller-sized aggregate, and the mixture with the highest permeability was the oven-cured one due to the difference in paste structure between oven and microwave curing proven by scanning electron microscope (SEM) investigations. When the effect of aggregate gradation was examined in concretes produced with microwave curing, it was observed that a reduction in aggregate gradation resulted in decreased compressive strength and water permeability, accompanied by an increase in Cantabro abrasion losses. The results revealed that microwave technology has the potential for the production of pervious geopolymer building materials. Microwave technology reduced energy consumption and curing time by 91.4% and 99.7%, respectively.

Keywords: Aggregate gradation, energy saving, microwave curing, pervious geopolymer.

Öz

Bu çalışmada, mikroalga teknolojisi alternatif bir kür yöntemi olarak kullanılmış ve agrega gradasyonunun uçucu kül esaslı geçirimsiz geopolimer beton özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bir tanesinde sadece 8-16 mm elek aralığındaki agrega kullanılırken, diğerlerinde toplam agrega miktarının %25'i, 4-8 mm ve 0.5-4 mm elek aralıklarındaki agregalarla ağırlıkça yer değiştirilerek farklı betonlar üretilmiştir. Karşılaştırma amacıyla, etüv kürüne tabi tutularak üretilen geçirimsiz geopolimer beton kullanılmıştır. Mikroalga kürüyle, 700 watt güç seviyesinde 5 dakika kürlemeyle üretilen betonların basınç dayanımlarının, agrega gradasyonuna bağlı olarak 9.7 MPa-12.2 MPa arasında değiştiği ve bu değerlerin, 90°C'de 24 saat etüvde kürlenen serinin basınç dayanımından (8.2 MPa) daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Agrega gradasyonunun küçülmesi, betonların su geçirimsizliğini azaltırken; en yüksek su geçirimsizliğinin etüv kürü ile üretilen seride elde edildiği belirlenmiştir. Elektron mikroskobu incelemeleri bu durumun iki kür yöntemi ile üretilen betonların hamur yapısındaki farklılıktan kaynaklandığını ortaya koymuştur. Agrega gradasyonunun mikroalga kürü betonlar üzerindeki etkisi incelendiğinde, agrega gradasyonunun küçülmesi ile basınç dayanımı ve su geçirimsizliğinin azaldığı, Cantabro aşınma kayıplarının ise arttığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, mikroalga teknolojinin geçirimsiz geopolimer yapı malzemesi üretimi için potansiyel taşıdığını göstermiştir. Mikroalga kürleme yöntemi, enerji tüketimini %91.4 ve kür süresini %99.7 oranında azaltmıştır.

Anahtar Kelimeler: Agrega gradasyonu, enerji tasarrufu, geçirimsiz geopolimer, mikroalga kürü.

*Corresponding author: adilgultekin@duzce.edu.tr

Adil Gultekin  orcid.org/0000-0002-5267-5312



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

1. Introduction

Pervious concrete is a special building material that can be used in numerous areas for different purposes, such as transmitting water quickly to the lower layers, reducing the runoff water, providing acoustic advantages and thermal insulation (Khalil et al. 2019). Porosity, permeability and compressive strength are the leading properties of pervious concrete and must be balanced with an appropriate mix design. There are also additional performance targets depending on the intended use of the pervious concrete. For example, the abrasion resistance of pervious concrete to be used for concrete pavements is required to be high (AlShareedah and Nassiri 2021). Pervious concretes' porosity and compressive strength generally vary between 15%-35% and 5 MPa-25 MPa, respectively (Sun et al. 2018). The strength and permeability properties of pervious concrete are affected by various factors such as the amount of voids, void size and aggregate gradation (Luo et al. 2023). There are some recommendations for Portland cement-based pervious concrete in the literature such as adjusting the water/cement ratio in the range of 0.26-0.45 to provide aggregate covering and stability, using single-sized coarse aggregate between 9.5-19 mm to obtain a proper void ratio (Elango et al. 2021), and limiting the maximum amount of fine aggregate to 10% (Khalil et al. 2021).

Concrete produced with Portland cement is most widely used building material in the world. In addition to consuming high amounts of energy during cement production, approximately 1 ton of CO₂ is released for each ton of cement. In order to reduce these drawbacks, the use of alternative binders to cement should be encouraged (Arafa et al. 2017). One of these alternatives is geopolymer (Zhang et al. 2024). Geopolymer binders are prepared using aluminosilicate powder materials such as fly ash and blast furnace slag and alkali materials like sodium silicate and sodium hydroxide (Nanda and Priya 2024). Geopolymers have advantages such as excellent mechanical properties, significantly reducing CO₂ emission, rapid strength gain, waste recycling (Azad et al. 2022), good high-temperature and corrosion resistance (Ayawanna and Poowancum 2024). Geopolymers can be used in numerous areas such as waste disposal, coating and repair work due to their excellent properties (Ziada et al. 2024).

The curing process of geopolymers is different from conventional concrete. Various temperatures, ranging from room temperature to around 100°C, are used in the curing of geopolymers, and the optimum curing temperature varies

depending on the materials used. It is generally known that strength increases and setting times shorten with increasing curing temperature (Tempest et al. 2009). There are several studies about the geopolymers produced with different curing types such as heat curing, curing at ambient temperature and steam curing. It has been proven that the duration and temperature of curing significantly affect geopolymer properties (Nurruddin et al. 2018). However, geopolymer production consumes energy, during heat curing (Suwan and Fan 2014). Studies have revealed that using microwave technology as an alternative curing method in geopolymer production provides serious energy savings (Shi et al. 2016, Gultekin and Ramyar 2022). Moreover, microwave curing reduces the curing time and provides a more homogeneous heating effect (Dong et al. 2022). In microwave technology, electromagnetic energy turns into thermal energy. Thus, microwave curing has a different heating mechanism than traditional oven curing. This provides lower heat losses and a more effective heating effect (Aschoff et al. 2024).

Although Portland cement is generally used in the production of pervious concrete, recently, the use the geopolymer binders to produce PGC has been examined (Chen et al. 2019). Sata et al. (2013) examined the properties of PGCs produced using high calcium fly ash as aluminosilicate, sodium silicate and sodium hydroxide as activators, and recycled concrete and brick aggregate. Researchers stated that the compressive strengths of PGCs produced with recycled concrete aggregate and recycled brick aggregate varied between 7.0-10.3 MPa and 2.9-6.6 MPa, respectively. Tho-in et al. (2012) reported that the void ratio and compressive strength of oven-cured fly ash-based PGCs cured at 60°C for 48 hours varied between 28.7-34.4% and 5.4-11.4 MPa, respectively. Huang and Wang (2021) investigated the mechanical properties of PGCs based on fly ash and metakaolin, partially substituted with ground granulated blast furnace steel slag, and cured at room temperature. A total of eight PGC series were produced, both with and without slag replacement. The researchers reported that the compressive strength of the 7-day cured concretes ranged approximately from 10 to 20 MPa, and it was noted that slag substitution could enhance compressive strength. Maguesvari et al. (2020) examined the effects of the alkali solution-to-binder ratio (0.40, 0.45, 0.50) and alkali solution molarity (10, 15, and 20 M) on PGCs cured at room temperature. A combination of fly ash and ground granulated blast furnace slag was used as the aluminosilicate, while a mixture of sodium silicate and sodium hydroxide was utilized as an alkali acti-

vator. It was stated that the compressive strength of the concretes (28-day cured) ranged approximately from 12 to 13 MPa; increasing the alkali solution-to-binder ratio and molarity had a positive effect on compressive strength, whereas an inverse trend was observed in the permeability values. Khalil et al. (2019) investigated the effects of the alkaline solution-to-metakaolin ratio, metakaolin-to-coarse aggregate ratio, and superplasticizer dosage on the properties of metakaolin-based geopolymer concretes using 20 different mixtures. The researchers reported that both the metakaolin-to-coarse aggregate ratio and the solution-to-metakaolin ratio had a significant effect on compressive strength. The minimum and maximum compressive strengths were reported as 4 and 14 MPa, respectively, and the void ratio ranged between 18% and 30%. In similar studies, the properties of fly ash- (Zaetang et al. 2015, Chindaprasirt et al. 2021), ground granulated blast furnace slag- (Ganesh et al. 2021) and metakaolin- (Luo et al. 2023, Zhou et al. 2023) based PGCs were investigated by different researchers. These studies revealed that it is possible to produce geopolymer-based pervious concrete with appropriate compressive strength and permeability properties. As can be seen, although numerous studies were conducted on the pervious geopolymer/alkali-activated concretes, curing has generally been carried out under ambient conditions or in an oven, and there is a need for studies on pervious concretes produced using microwave curing.

In most of the studies on the PGCs, oven or ambient curing was applied. However, PGCs produced with these curing types have some disadvantages, like energy consumption for oven curing and long curing durations (generally between 7-28 days) for ambient curing. To address these disadvantages, this study employed microwave curing, an alternative curing method that has been largely overlooked in the production of PGCs. The use of microwave curing in the production of PGC has the potential to significantly reduce both the energy consumption required for curing and the overall curing duration compared to oven curing. Furthermore, this alternative curing method may enable the desired strength to be achieved in shorter curing durations than those required by ambient curing. This outcome is expected to further enhance the environmental advantages associated with PGCs. For these reasons, this study has two main objectives: to compare the properties of PGCs produced with microwave curing and oven curing, and to determine the effect of aggregate gradation on the properties of microwave-cured PGCs. In this context, compressive strength,

splitting tensile strength, Cantabro abrasion resistance and water permeability tests were conducted. Additionally, the microstructure of the binder was examined using SEM, and the electrical energy consumed during curing was measured and compared.

2. Material and Methods

2.1. Materials

Class F fly ash, crushed limestone fine and coarse aggregate, sodium silicate solution, sodium hydroxide and tap water were used in the experimental study. Fly ash and aggregates were provided by a ready-mix concrete plant. The chemical composition and some physical properties of fly ash are presented in Table 1.

Table 1. Chemical composition and some physical properties of fly ash.

Oxide	% (by weight)	Oxide	% (by weight)
SiO ₂	55.9	TiO ₂	1.0
Al ₂ O ₃	23.3	P ₂ O ₅	0.8
Fe ₂ O ₃	6.3	Loss on ignition	2.0
CaO	5.3	Physical properties	
Na ₂ O	0.6	Specific gravity	2.21
K ₂ O	2.3	% Retained on 32 µm	26.7
SO ₃	0.2	% Retained on 45 µm	20.0
MgO	2.1	% Retained on 90 µm	6.4

An 8-16 mm size-fraction crushed limestone aggregate was used to produce pervious concretes. The saturated-surface-dry (SSD) specific gravity and water absorption capacity of the aggregate were 2.60 and 0.8%, respectively. In addition, in order to examine the effect of aggregate gradation on concrete properties, a definite fraction (25 w.%) of 8-16 mm aggregate was replaced with either 0.5-4 mm or 4-8 mm size fractions of the same aggregate. 8-16 mm, 4-8 mm and 0.5-4 mm aggregate size fractions are shown in Figure 1. The 8-16 mm and 4-8 mm aggregates were washed beforehand to make them free from stone dust. The aggregates were allowed to dry in the laboratory and during preparation of the concrete mixtures sufficient water required to bring them into saturated-surface-dry condition was added to the mixture.

A sodium silicate and sodium hydroxide mixture was employed as an alkali solution. For this purpose, sodium hy-



Figure 1. Aggregate size fractions.

dioxide beads with 99% purity and sodium silicate solution consisting of 9.1% Na_2O , 28.6% SiO_2 and 62.3% water were used. Sodium hydroxide beads were solved in sodium silicate solution to obtain a 1.5 Ms ratio (the ratio of SiO_2 to Na_2O in the alkali solution by weight), and the obtained solution was rested for 24 hours before using in concrete mixture.

2.2. Mixtures

During the preparation of the mixtures, 645 g fly ash, 243 g alkaline solution, 7.5 g water and 3150 g aggregate were added to the mixer for each batch. Aggregate substitution was made at 25% of the total aggregate weight. Theoretical unit weights, fresh unit weights and fresh void contents were determined using ASTM C1688 Standard (2014) with some modifications as shown in Table 2. 71 mm cube specimens were used to determine these properties and the compaction was applied as mentioned in Section 2.4. The mixture prepared to determine the effect of microwave power level and curing duration on compressive strength was abbreviated as Mw-Op, referring to the “optimum microwave” curing. Using this mixture, nine different series of PGC were produced by curing fresh concretes at microwave power levels of 460, 600, and 700 watts for durations of 5, 10, and 15

minutes. The mixture containing merely 8-16 mm aggregate and subjected to oven or microwave curing are designated as Ov and Mw-1, respectively. Mw-2 and Mw-3 denote PGC mixtures subjected to microwave curing and containing 4-8 mm and 0.5-4 mm aggregates in addition to 8-16 mm aggregate, respectively.

2.3. Scope of the Experimental Study

Firstly, the effect of different power levels and curing durations on the compressive strength of microwave-cured PGCs was determined, and the curing regime that resulted in the highest compressive strength was identified. For this purpose, a mixture containing only limestone aggregates in the 8-16 mm size fraction (denoted as Mw-Op) was used, and based on the obtained results, a power level and curing time were selected. Subsequently the effect of aggregate gradation on the properties of microwave-cured PGCs was examined. For this purpose, three mixtures were produced: one containing only aggregates in the 8-16 mm size fraction (Mw-1), and two others (Mw-2 and Mw-3) containing 25% by weight of the total aggregate in the 4-8 mm and 0.5-4 mm sieve ranges, respectively. Additionally, in order to compare the effects of microwave curing and oven curing, an oven-cured PGC (denoted as Ov) with the same composition as the Mw-1 mixture, cured at 90°C for 24 hours, was used. A graphical summary of these processes is presented in Figure 2.

2.4. Mixing and Casting

A laboratory-type tilting concrete mixer was used to prepare concrete mixtures. First, aggregate and fly ash were dry mixed for 30 seconds. Afterward, the alkali solution was added to the mixture within about 30 seconds while the mixer continued to operate. Then, the water was added to the mixer within about 10 seconds. The mixer was operated

Table 2. Proportions and fresh properties of pervious concrete mixtures.

Code	Ingredients (kg/m³)						Fresh unit weight (kg/m³)	Fresh void content (%)
	Fly ash	Alkali solution	Water	Aggregate (SSD)				
				8-16 mm	4-8 mm	0.5-4 mm		
Theoretical	384.5	144.9	4.5	1878	-	-	2412	-
Ov	274.5	103.4	3.2	1340.8	-	-	1722	28.6
Mw-Op	274.5	103.4	3.2	1340.8	-	-	1722	28.6
Mw-1	274.5	103.4	3.2	1340.8	-	-	1722	28.6
Mw-2	287.3	108.2	3.3	1052.3	350.8	-	1802	25.3
Mw-3	296.9	111.8	3.5	1052.3	-	350.8	1815	24.5

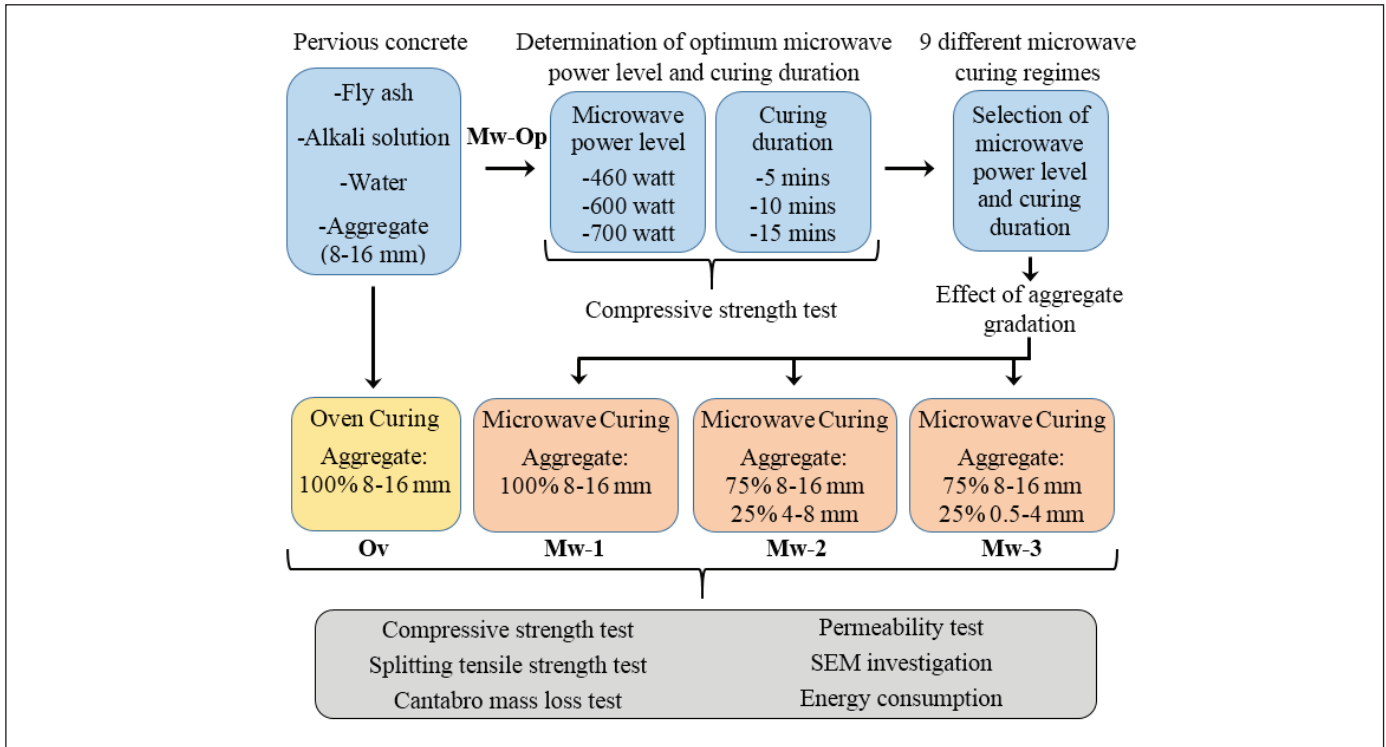


Figure 2. Graphical summary of study.

Table 3. Curing details.

Code	Curing type	Oven curing		Microwave curing	
		Temperature	Duration (Hours)	Power level (W)	Duration (min)
Ov	Oven	90°C	24	-	-
Mw-Op	Microwave	-	-	460, 600, 700	5, 10, 15
Mw-1	Microwave	-	-	700	5
Mw-2	Microwave	-	-	700	5
Mw-3	Microwave	-	-	700	5

for 2 minutes after water addition. At the end of the mixing, the mixtures were cast in either 71 mm plastic cube molds or polyvinyl chloride (PVC) cylinder molds of 105 mm in diameter. 71 mm cube specimens were used to determine unit weight, compressive strength and splitting tensile strength. The water permeability and abrasion resistance of the mixtures were evaluated using cylinder samples with 105 mm in diameter and 50 mm in height. The samples were compacted in the molds in one layer, using a steel tamping rod with 25 tappings. Subsequently, the upper part of specimens leveled with a trowel.

2.5. Curing

The curing was applied right after the compacting process without any waiting period. Mixtures were cured along with

their molds in either a household microwave oven or a laboratory-type conventional oven. Due to the restrictions of the microwave oven (size and weight of specimens, which were crucial for the rotating capacity of the turntable), 71 mm cube specimens were produced. In order to compare the effect of microwave curing time and power level on the mechanical properties of pervious concretes, three different curing durations (i.e., 5, 10 and 15 minutes) and three different power levels (460, 600 and 700 W) were employed. For the sake of comparison, oven-cured pervious concrete specimens were cured at 90°C for 24 hours. At the end of the curing duration, the specimens, taken from the conventional oven or microwave oven, were kept in the laboratory to cool to room temperature before testing. The curing details of concretes are given in Table 3.

2.6. Tests

The compressive strength (as shown in Figure 3) and splitting tensile strengths were determined using a cement mortar strength testing device with 71 mm cube samples. Each test result represented the mean of three 71 mm cube specimens. The loading rate was set as 0.9 kN/s and 0.1 kN/s for compressive and splitting tensile strength, respectively. Samples cured in conventional oven or microwave oven were kept under ambient conditions until the temperature of samples reached ambient temperature. Subsequently, mechanical tests were conducted. Cantabro mass loss tests based on the ASTM C1747 Standard (2013) was conducted with some modifications. Cylinder samples with 105 mm in diameter and 50 mm height were used. Three samples from each mixture were weighed before the test and placed into the Los Angeles testing apparatus (without steel balls). The speed of rotation of the device was 30 revolutions per minute. The weight of specimens was determined after 500 revolutions, and the weight loss was calculated.

A test setup, as shown in Figure 3, was used to determine the water permeability of the PGCs. From each mixture, three 105 mm diameter and 50 mm height cylinder samples were used for the water permeability test. The lateral surface of the samples was covered with a polymeric water insulation material. A PVC pipe was fixed on the top base of the specimen, and the perimeter of the tube as well as top base of the specimen was sealed with a silicone sealant,

then the specimen was placed above a wire rack. A plastic container and a balance were placed under the wire rack to collect and weigh the water passing through the sample. After the test setup was prepared, 2 liters of water was poured from the upper side of the pipe. The water accumulated on the container was recorded at five-second intervals between the time the water touched the sample surface and the time when there was no water left on the sample (a video recorder was used for this purpose). In these measurements, three samples were used for each series, and each sample was tested twice. The average of the six measurements was used as the test result. Before taking these measurements, conditioning was done by flowing two liters of water through the samples twice.

SEM investigations were conducted on selected specimens after splitting tensile strength test with an “FEI-Quanta FEG 250” device at 20 kV. The fractured surfaces of specimens were examined to investigate the morphology of the reaction products and pore structure. Samples were coated with a gold-palladium thin film (~10 nm) to increase the conductivity before analysis.

3. Results and Discussion

3.1. Effect of Microwave Power Level and Curing Duration on Compressive Strength

In order to determine the reference mixture, nine series of microwave-cured PGCs were tested based on same mixture

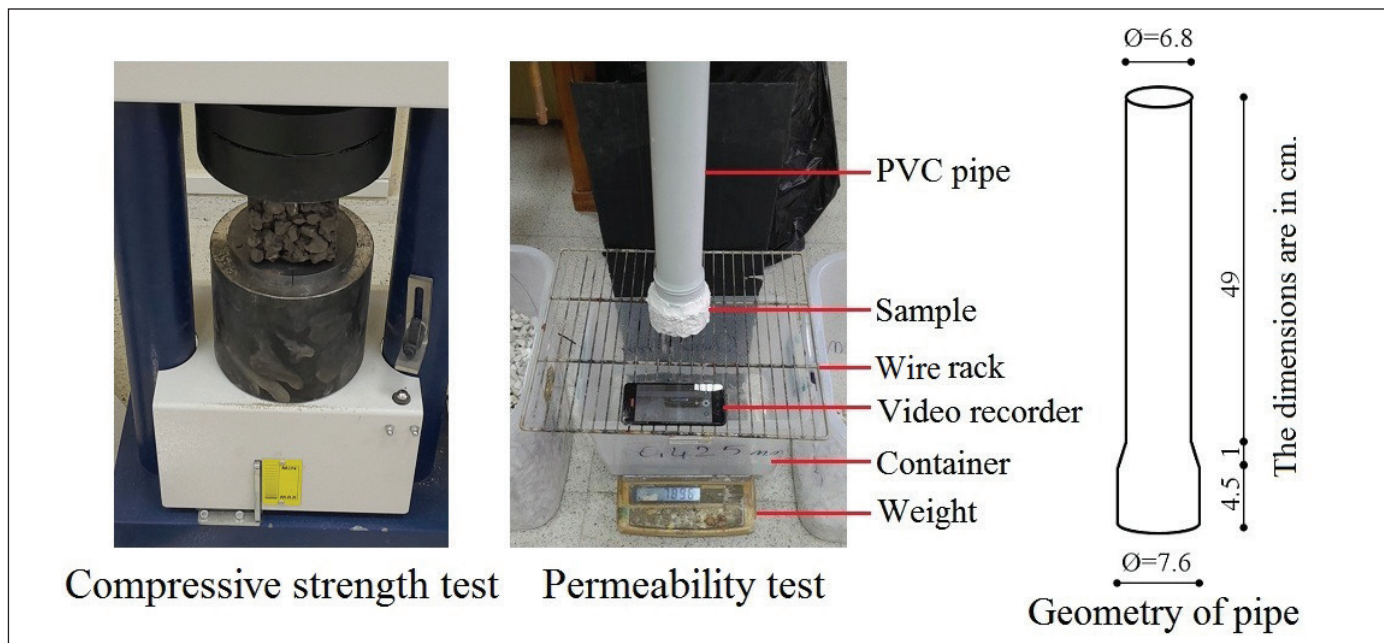


Figure 3. Compressive strength test, permeability test and geometry of PVC pipe.

(Mw-Op). The examined parameters were microwave power level (460, 600 and 700 W) and curing duration (5, 10 and 15 minutes). Figure 4 illustrates the compressive strength values of these samples. Upon examination of the compressive strength test results, two distinct trends emerge regarding the relationship between compressive strength and curing regime. At the 460-watt power level, compressive strength enhanced with longer curing durations. Specifically, the strength increased from 8.7 MPa after 5 minutes of curing to 10 MPa after 15 minutes, representing a 15% enhance. In contrast, at 600 and 700-watt power levels, an inverse relationship is observed: compressive strengths of 10.5 MPa and 12.2 MPa, respectively, decrease by 12% and 21% when the curing time is extended to 15 minutes. Nevertheless, the observed strength range of 8.7–12.2 MPa suggests that microwave technology is a viable fast-curing method for PGC production. It has been reported that the compressive strength of pervious concrete produced with Portland cement is generally in the range of 5–25 MPa (Sun et al. 2018). Chen et al. (2021) produced seven different PGCs using sodium silicate and sodium hydroxide as activator. Following an initial curing process at 60°C for 24 hours, the samples were stored at 20°C, and the compressive strengths were determined at different ages. The researchers reported that the 7-day compressive strengths ranged from approximately 10 to 17 MPa, increasing up to 20 MPa at 28 days. However, it is important to note that the curing durations in Chen et al.'s study were significantly longer than the 5-minute period that yielded optimum strength in this study. Tho-in et al. (2012) conducted a study on oven-cured fly ash-based PGCs and reported that the compressive strength of samples ranged between 5.4 MPa and 11.4 MPa. Zaetang et al. (2015) determined that sodium hydroxide concentration was effective on the compressive strength of oven-cured fly ash-based geopolymer pervious concrete and stated that the compressive strengths of concretes produced with 10 and 15 M NaOH concentration were 5.9 and 7.6 MPa, respectively. In a similar study, Chindaprasirt et al. (2021) stated that the highest compressive strength of pervious concrete produced with different aggregate/fly ash ratios was 8.4 MPa in the scope of their study. Considering other studies in the literature about PGC, the compressive strengths of this study (8.7–12.2 MPa) were found to be at acceptable levels, however, unlike other studies where the tests were conducted on 100 mm cube or cylindrical samples with 100 mm diameter and 200 mm height, the results of the present study were obtained with 71 mm cubes. Another significant aspect of the PGCs produced within the scope of this study is that

the mentioned compressive strengths were obtained with a curing duration of 5–15 minutes. In the majority of previous studies, the duration of oven curing of PGC specimens was at least 24 hours or even more. Tho-in et al. (2012) used a curing regime of 60°C for 48 hours, Zaetang et al. (2015) cured the specimens at 60, 90 and 120°C for 48 hours, and 65°C for 24 hours was the curing regime of Chindaprasirt et al. (2021). Therefore, microwave curing is advantageous both in terms of saving time and energy. Short curing times are also thought to increase production speed and, accelerate and facilitate quality control processes.

Curing regime variables (i.e., curing type, duration and temperature) influence the compressive strength significantly. At the same power level, two different outcomes were observed as the curing time increased. While an increase in curing time at 460 watts leads to an improvement in compressive strength, extended curing durations at 600 and 700 watts adversely affect the compressive strength. Guan et al. (2023) found that increasing the curing time at a constant power level, or increasing the power level at a constant curing duration, enhanced the compressive strength due to accelerated geopolymeric reactions. When the effect of the increase in power level on the compressive strength at a constant curing time was examined, it was seen that the increase in the power level in the 5-minute curing duration positively affected the strength. The sample's compressive strength, which was 8.7 MPa when cured for 5 minutes at 460 watts, increased by 21% and 40%, respectively, at 600 and 700 watts. Yilmazer Polat (2023) examined the effect of microwave power level on the compressive strength of fly ash-based geopolymer mortars at a fixed curing time (10 minutes). The researcher reported that the compressive strength increased by 71% as the power level increased from 200 W to 300 W. However, the strength gradually decreased at higher power levels due to crack formation caused by rapid water evaporation from the sample. Graytee et al. (2018) also reached a similar result.

At the end of this stage, 700 watts–5 minutes curing regime was selected for next stages. So the microwave-cured PGCs, coded as Mw-1, Mw-2, and Mw-3, were produced using this power level and curing duration in the remaining part of the study.

3.2. Effect of Curing Type and Aggregate Gradation on Mechanical Properties

The effect of curing type and aggregate gradation on the compressive strength of PGCs is presented in Figure 5. The

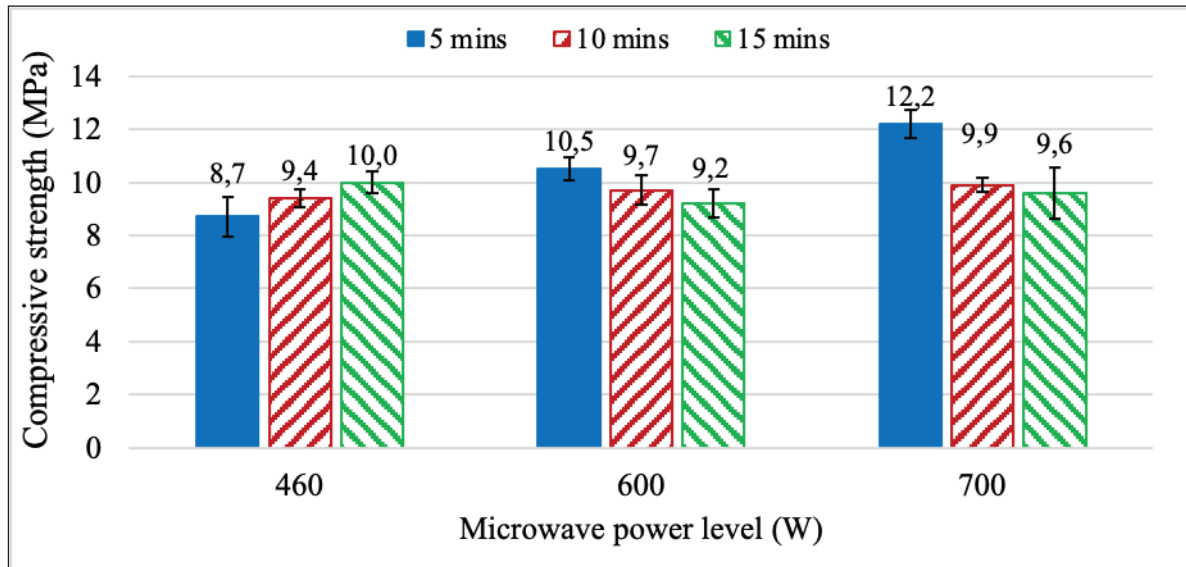


Figure 4. Compressive strengths of the Mw-Op series at different microwave power levels and durations.

compressive strengths of oven- and microwave-cured GPCs prepared with the same material and aggregate gradation were 8.2 and 12.2 MPa, respectively. Using microwave curing increased the compressive strength by 49% compared to that of the oven curing. Notably, 5-minute curing in the microwave oven provided higher compressive strength than curing in the oven at 90°C for 24 hours. Studies on microwave curing have reported that with microwave curing, attaining compressive strength close to or higher than oven curing in a very short time is possible. Yilmazer Polat (2023) determined that the compressive strength of geopolymer mortar obtained by curing at 300 watts for 10 minutes is very close to that produced by curing in the oven at 60°C for 24 hours. In similar studies, Shi et al. (2016) and Gultekin and Ramyar (2022) proved that the compressive strength of microwave-cured geopolymer mortars could be higher than those produced by oven curing. Somaratna et al. (2010) reported that microwave curing creates a more homogeneous heating effect, and this homogeneous internal structure resulting in enhanced strength.

Aggregate gradation has significant effects on pervious concrete properties. Within the scope of this study, partial replacing of 8-16 mm coarse aggregate with smaller particles reduced the compressive strength. The effect of inclusion of the 4-8 mm size fraction aggregate on compressive strength was negligible. However, incorporation of 0.5-4 mm size fraction aggregate caused a meaningful decrease in strength (20.5%) compared to that of the control mix. Considering previous knowledge (Sanjaya et al. 2021, Magesvari and

Narasimha 2013) on the pervious concrete, using of the smaller aggregate particles was expected to increase the compressive strength. However, in contrast, in this study partial replacing of coarse particles with smaller aggregate particles reduced the compressive strength. The decrease in aggregate size increased the surface area that had to be covered by the geopolymer paste. Since the theoretical paste volume was fixed, it became difficult for the aggregate particles to be entirely covered by the paste, so that it was visually observed that some aggregates could not be covered by the paste. The fact reduced the compressive strength. There are many studies in the literature on the effect of aggregate gradation on the mechanical properties of pervious concrete. Luo et al. (2023) investigated the properties of metakaolin-based PGCs and reported that partial replacement of coarse aggregate with smaller particles positively affected the compressive strength of 7-day cured PGCs produced with three different aggregate size fractions. A similar situation exists in conventional pervious concrete produced with Portland cement. Sanjaya et al. (2021) reported that increasing the sand inclusion level in the Portland cement-based pervious concrete increased the compressive strength. Magesvari and Narasimha (2013) studied the properties of pervious concrete for pavement applications and obtained a similar result.

Photographs of the broken cross-sections of the samples after the splitting tensile test and details of the paste structure in these mixtures are shown in Figure 6. At the macro level, the internal structure consisted of paste, aggregate

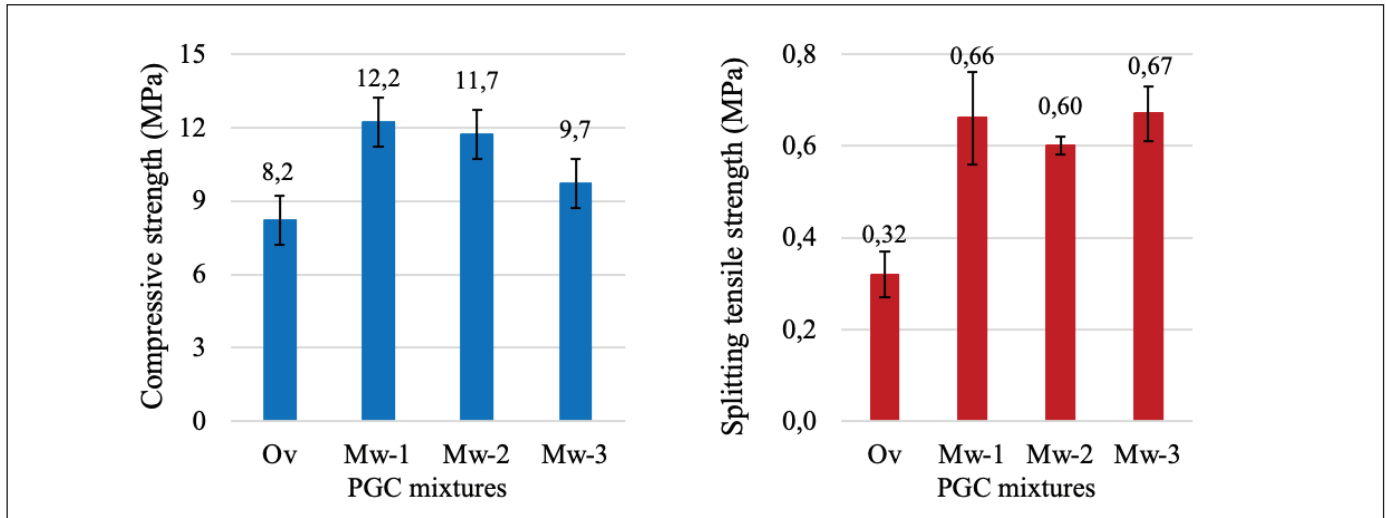


Figure 5. Compressive and splitting tensile strength.

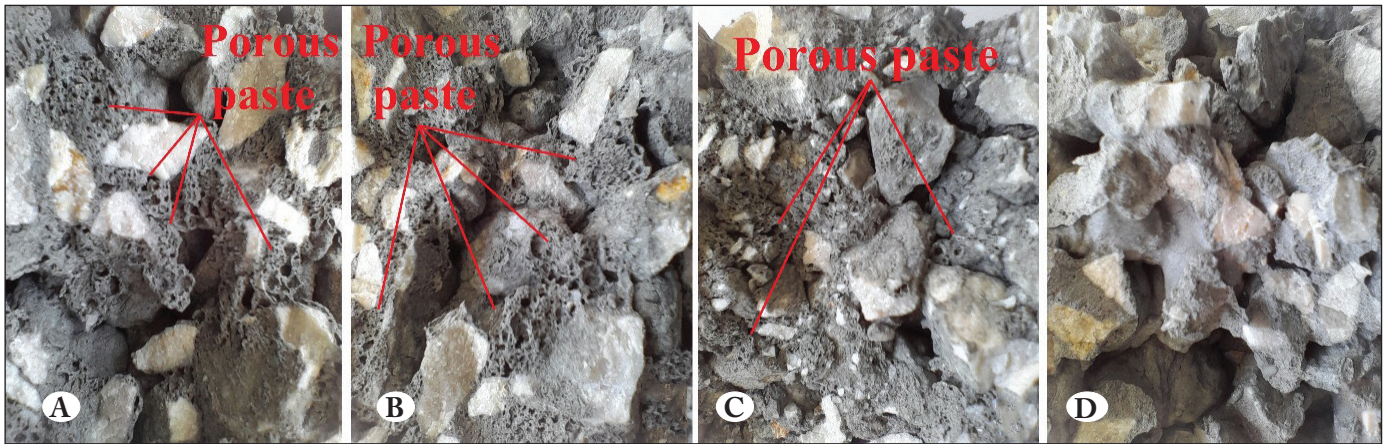


Figure 6. Cross-sections of samples (A) Mw-1, (B) Mw-2, (C) Mw-3, (D) Ov).

and voids of various sizes between the aggregates. However, the paste structure of microwave-cured sample was different from that of the oven-cured sample. The paste of these samples contain pores of different sizes, up to approximately 2-3 mm. The appearance of the paste is as if a foaming agent was used in the paste. However, these pores are not distributed homogeneously. Interestingly, there was no visible pore on the surface of unbroken paste around the aggregate particles. This creates the impression that most of the pores in the paste are in closed form. These pores, formed during curing, increased the volume of the paste and caused the voids between the aggregate particles to decrease. This situation is clearly seen in the Mw-1 sample which has the same proportions as Ov sample. In spite of containing a porous paste, the compressive and splitting tensile strengths of samples subjected to microwave curing were higher than

that of samples subjected to oven curing. This is because, owing to its higher volume, porous paste covers more aggregate surfaces, fills greater interparticle spaces and probably establishes better aggregate-paste bond than the paste cured in the oven. However, it should be remembered that the curing temperature also affect strength considerably.

3.3. Cantabro mass loss

The weight loss and photographs of the specimens before and after the test are illustrated in Figure 7. From two concrete series produced with the same aggregate gradation and the same materials (Mw-1 and Ov), microwave-cured GPC lost 47% weight after test. On the contrary, the oven-cured GPC crumbled, as shown in figure. The low strength of this concrete probably is the reason for its complete loss of structural integrity. The weight loss of microwave-cured GPCs

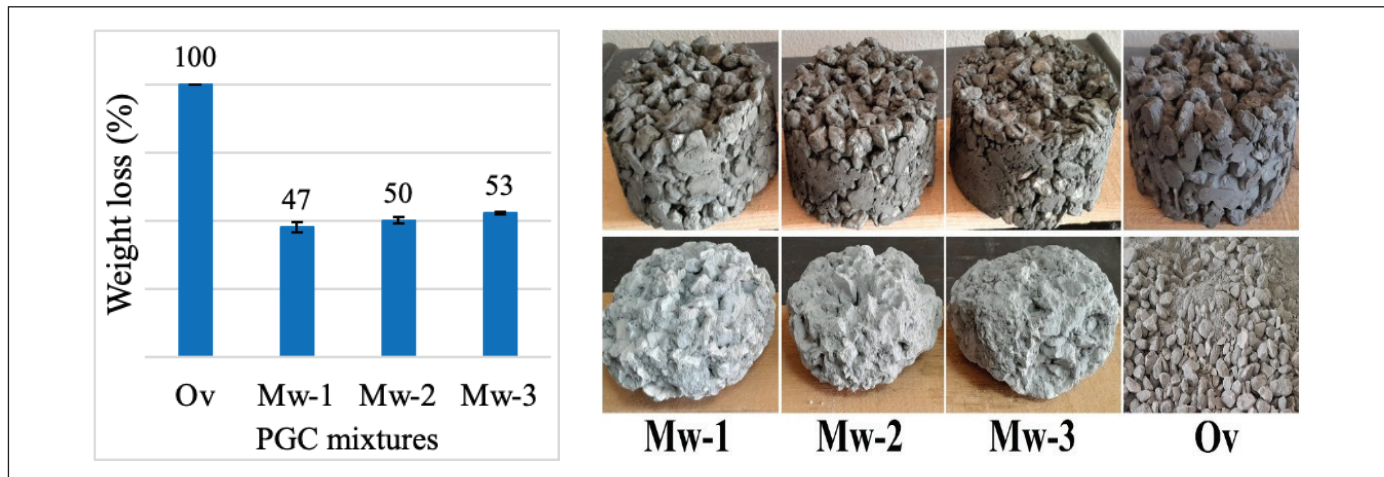


Figure 7. The weight losses and the photographs of specimens before/after Cantabro test.

was in the range of 47-53%. In a similar study, Huang and Wang (2022) examined the Cantabro mass loss resistance of blast furnace slag substituted metakaolin- and fly ash-based PGCs. Researchers reported that the loss in mass of metakaolin- and fly ash-based concrete, which have approximately 23%-25% porosity, were around 80% and 50%, respectively. In a similar study, Jivani et al. (2018) examined the effects of the binder/alkali solution ratio and sodium silicate/sodium hydroxide ratio on the properties of PGC and reported that the mass losses after the Cantabro test varied between 33% and 51%. When the effect of aggregate gradation is examined, it is seen that small-sized particles (0.5-4 mm and 4-8 mm) have a negative effect on Cantabro resistance. This result is different from some studies in the literature. Raghvani et al. (2016) investigated the Cantabro mass loss resistance of conventional pervious concrete containing 5, 8 and 10% fine aggregate and reported that the mass loss decreased with increasing fine aggregate content. The researchers stated that the interlocking effect of sand particles caused this situation. In this study, it is thought that the main reason for the opposite results was the insufficiency of paste to cover the aggregate particles. Partial substitution of large particles with smaller aggregate (0.5-4 mm and 4-8 mm) increased the aggregate surface area, therefore, some of the aggregate particles could not be covered by the paste, resulting in reduced bond.

3.4. Permeability

Permeability test results and photographs taken during the water flow through the samples are presented in Figure 8 and Figure 9, respectively. In order to make a meaningful comparison, all photos were taken when the height of water in the pipe dropped approximately to the half of its origi-

nal height. When the effect of aggregate gradation on water permeability was examined, as expected, finer grading resulted in increasing flow times consistent with previous studies. The water flow time, 45 seconds in the Mw-1 mixture, increased by 67% and 278%, respectively, in the Mw-2 and Mw-3 mixtures containing substituted aggregates of 4-8 mm and 0.5-4 mm sizes. The main reason for this is that small aggregates reduced the interconnected voids and void size. In a similar study, Zhang et al. (2023) examined the effect of aggregate size fraction on Portland cement-based pervious concretes and stated that the aggregate particle size has a significant impact on the water permeability and increasing the particle size resulted in enhanced water permeability. These researchers reported that using 50% aggregate with a 19-31.5 mm size fraction, instead of 4.75-19 mm sized aggregate, led to a 116% increase in the permeability coefficient, from 0.61 cm/s to 1.32 cm/s. The main reason for this situation was attributed to the increase in total void volume and larger void size. Yavuz and Yazici (2023) reported that in Portland cement-based pervious concretes produced with three different gradations (5-15, 10-15, and 15-25 mm) and three different aggregate types (limestone, river and recycled aggregate), water permeability decreased as the aggregate size decreased. It was stated that smaller voids were formed in concretes produced with smaller-sized aggregates, and the connection between the voids was reduced. Luo et al. (2023) stated that lower permeability coefficients were obtained with decreasing aggregate gradation in PGCs compared to the reference sample having aggregate with coarser grading. Ganesh et al. (2021) reported that in PGCs, permeability decreases as the aluminosilicate dosage increases due to reduced void content.

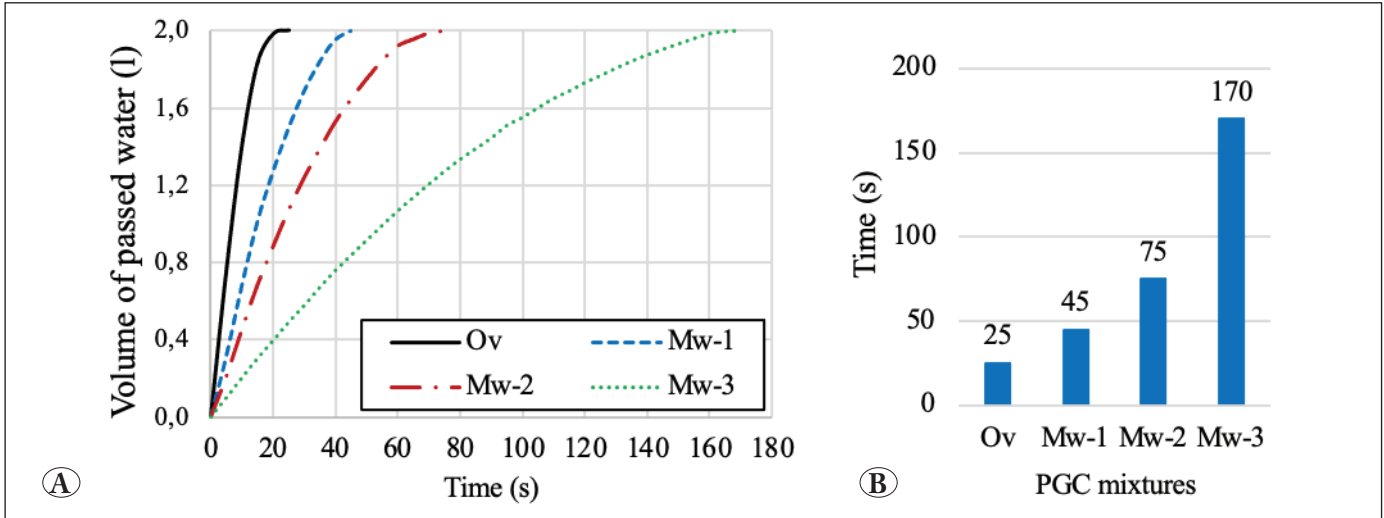


Figure 8. Permeability test results (A) volume of passed water, (B) flow time).

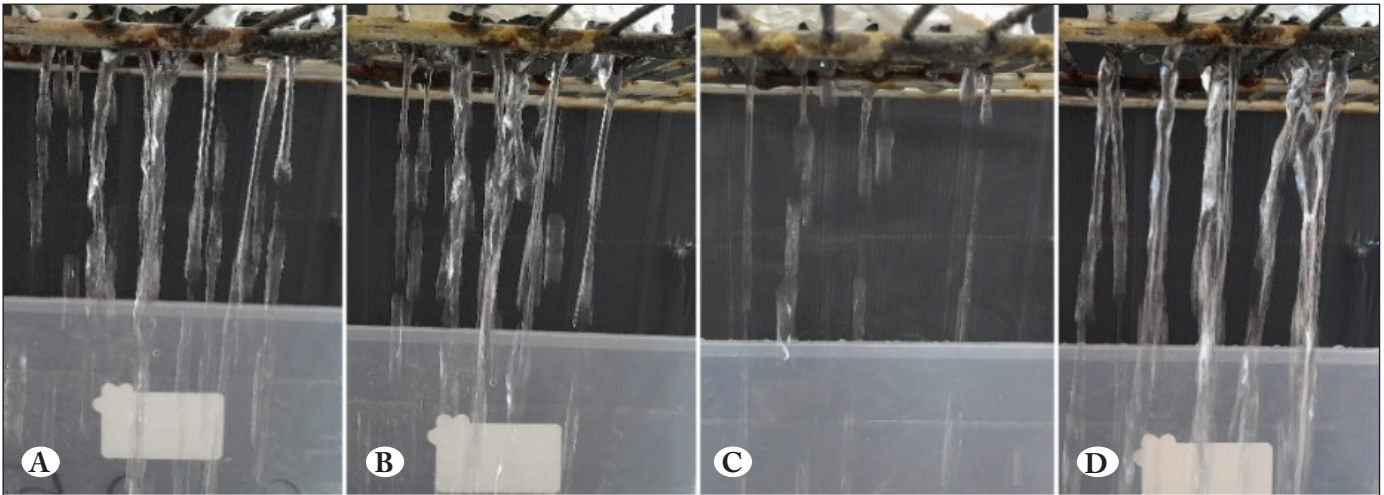


Figure 9. Images of water flow during permeability test (A) Mw-1, (B) Mw-2, (C) Mw-3, (D) Ov).

When the effect of the curing type is examined, it is seen that water flowed faster from the oven-cured sample. The flow time, which was 25 seconds in the oven-cured sample, increased by 80% to 45 seconds in the microwave-cured counterpart sample. Although there has been no previous study on this situation, it is thought that the fact is related to the reasons explained in Section 3.2. The effect of closed pores formed in the paste during curing in the Mw-1 increased the volume of the paste. This situation reduced the amount and size of the interconnected voids.

3.5. SEM Investigations

The SEM images of Ov and Mw-1 coded samples are shown in Figure 10 and Figure 11, respectively. The paste samples were obtained from the fractured parts of the split-

ting tensile test specimens. While the yellow and light green arrows show the pores and cracks, unreacted and partially reacted fly ash particles are shown with yellow and orange circles, respectively.

There are geopolymer gel, partially reacted and unreacted fly ash particles, pores and cracks in the oven-cured paste structure. Cracks of different sizes existed both in the geopolymer gel structure and at the interface between unreacted fly ash particles and the gel. Although some of these cracks may be occurred during the preparation of the sample, the presence of many cracks explains the reason of lower compressive strength of the oven-cured sample than that of the microwave-cured one.

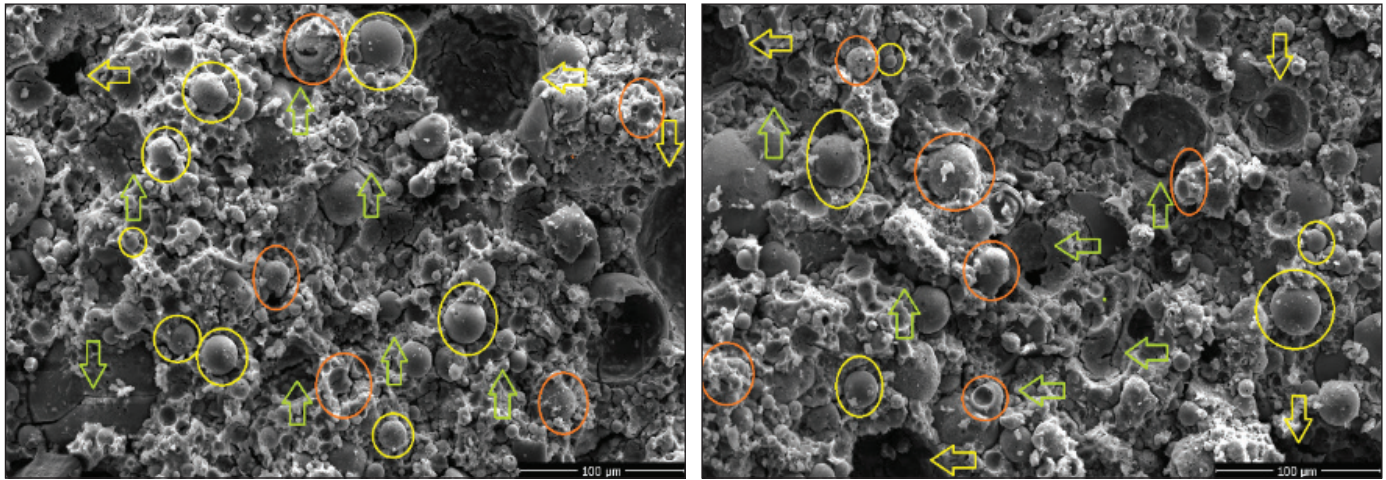


Figure 10. SEM images of oven-cured specimen's paste (Ov).

Table 4. Energy consumptions of mortars.

Code	Curing time (min.)	Compressive strength (MPa)	Energy consumption for curing (kWh)	Interior volume of the oven (dm ³)	Energy consumption for unit oven volume (kWh)	Saving (%)	
						Energy	Curing time
Ov	1440	8.2	6.91	123.8	0.0558	91.4	99.7
Mw-1	5	12.2	0.06	12.5	0.0048		

When the microwave-cured paste is examined, the existence of two different parts with different morphologies takes attention. These parts also explain the morphology of the porosity in the paste mentioned in Figure 6. Accordingly, some areas in the paste are called “fractured areas” responsible for compressive strength and where geopolymerization also occurs. In these areas, there are geopolymer gel, partially reacted and unreacted fly ash particles and pores, similar to the oven-cured sample. However, unlike the oven curing, no structure that could be described as a crack was found in the fractured areas. In these regions, pores of different sizes existed, and these pores were distributed throughout the paste. However, the mentioned pores were relatively smaller in size and more homogeneously distributed compared to these observed in the oven-cured paste. The fractured areas contained less amount of unreacted and partially reacted particles and this fact indicated a better degree of geopolymerization. When fracture areas are compared with the that of the oven-cured paste, it can be said that these sections are more homogeneous, do not contain cracks, and the pore sizes are smaller. It has been reported in previous studies about microwave-cured geopolymer paste that a more homogeneous heating effect occurs in microwave-cured geo-

polymers, which contributes to the formation of a more uniform microstructure and increased mechanical properties (Somaratna et al. 2010).

The second area in the microwave-cured sample are the large-sized pore areas in the paste (seen in Figure 6 in the macro dimension). Figure 11 shows no geopolymer gel in these areas, and the structure consists almost entirely of unreacted fly ash particles. It is thought that these pores are formed due to the rapid evaporation of water, and ion transfer and geopolymerization cannot occur due to the absence of water. In Figure 11, these parts are shown with orange markings, and the difference between the two parts is obvious.

3.5. Energy and Time Saving

The total energy consumption of the microwave oven and conventional laboratory oven during the curing process of samples coded as MW-1 and Ov, produced from the same mixture, was measured using a digital wattmeter. The total energy consumption for curing, energy consumption per unit oven volume, as well as the time and energy savings, were compared in Table 4. To provide a meaningful comparison, the total energy consumptions were divided by the

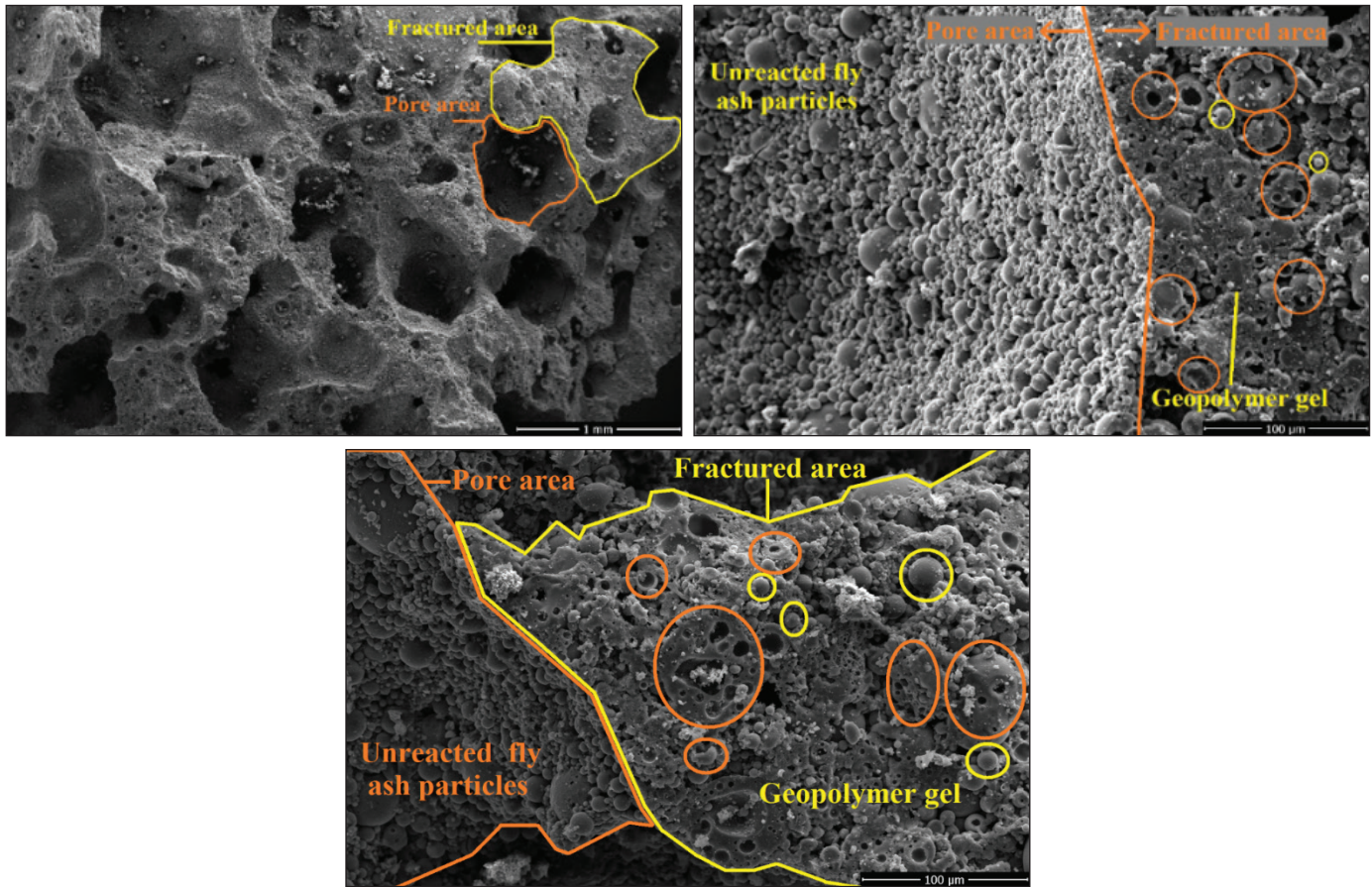


Figure 11. SEM images of microwave-cured specimen's paste (Mw-1).

interior volume of the oven which was different from each other. The total curing time for the conventional oven and microwave oven was 1440 and 5 minutes, respectively, despite the fact that the compressive strength of the microwave-cured sample was higher than that of the oven-cured one. In this regard, the microwave oven provided a 99.7% reduction in curing time. Moreover, the energy consumption of microwave curing was 91.4% lower than that of the oven curing, highlighting the importance of energy savings.

4. Conclusion and Suggestions

In this study, properties of the microwave-cured pervious geopolymer concretes were investigated. For the materials used and tests applied the following conclusions may be drawn:

- The highest pervious geopolymer concrete compressive strength (12.2 MPa) was obtained upon microwave curing at 700 watts for only 5-minutes.
- The compressive strengths of oven- and microwave-cured

counterpart pervious geopolymer concretes were 8.2 and 12.2 MPa, respectively. It seems that the temperature in microwave curing reaches higher values in a very short time than that of the oven curing. This causes rapid evaporation of water resulting in formation of pores in the paste. The increase in paste volume upon pore formation enhances the strength of pervious concrete.

- The strength of pervious geopolymer concrete reduced by finer aggregate grading. The fact was attributed to the insufficiency of the paste with a given volume to cover the surface of aggregate particles.
- Partial replacement of 8-16 mm aggregate particles with smaller particles reduced water permeability and prolonged the time required for the same volume of water to pass through the sample. Oven curing was more advantageous in terms of water permeability so that the time required for a given volume of water to pass through the oven-cured sample was 44.4% lower than that of the microwave-cured counterpart sample.

- Cantabro mass losses of microwave-cured samples varied between 47% and 53%. On the other hand, the oven-cured sample completely lost its structural integrity and crushed completely during the test.
- By using a microwave oven instead of a conventional oven for curing, the time required for curing decreased by 99.7% and energy consumption per unit oven volume decreased by 91.4%.

Although it is not possible to apply microwave curing to produce pervious geopolymer concrete in in-situ applications, it has the potential to produce different pervious geopolymer building materials like block, paving stone and prefabricated elements. Researching the effect of activator type and parameters, and aluminosilicate and aggregate type in the future studies will provide enlightening information on the subject.

5. References

- AlShareedah, O., Nassiri, S. 2021.** Pervious concrete mixture optimization, physical, and mechanical properties and pavement design: A review. *J. Clean. Prod.*, 288: 125095. Doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125095
- Arafa, AS., Mohd Ali, AZ., Rahmat, SN., Lee, YL. 2017.** Optimum mix for pervious geopolymer concrete (GEOCRETE) based on water permeability and compressive strength. *MATEC Web Conf.*, 103: 01024. Doi: 10.1051/mateconf/201710301024
- Aschoff, J., Partschfeld, S., Schneider, J., Osburg, A. 2024.** Effect of microwaves on the rapid curing of metakaolin- and aluminum orthophosphate-based geopolymers. *Materials*, 17(2): 463. Doi: 10.3390/ma17020463
- ASTM. 2013.** Standard Test Method for Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion (ASTM C1747), USA.
- ASTM. 2014.** Standard Test Method for Density and Void Content of Freshly Mixed Pervious Concrete (ASTM C1688), USA.
- Ayawanna, J., Poowancum, A. 2024.** Enhancing flexural strength of metakaolin-based geopolymer reinforced with different types of fibers. *Sustain. Chem. Pharm.*, 37: 101439. Doi: 10.1016/j.scp.2024.101439
- Azad, AM., Anshul, A., Azad, N., Samarakoon, SMSMK., Yadav, R., Bherwani, H., Gupta, A., Gebremariam, KF. 2022.** Pervious geopolymer concrete as sustainable material for environmental application. *Mater. Lett.*, 318: 132176. Doi: 10.1016/j.matlet.2022.132176
- Chen, X., Guo, Y., Ding, S., Zhang, H., Xia, F., Wang, J., Zhou, M. 2019.** Utilization of red mud in geopolymer-based pervious concrete with function of adsorption of heavy metal ions. *J. Clean. Prod.*, 207: 789–800. Doi: 10.1016/j.jclepro.2018.09.263
- Chen, X., Niu, Z., Zhang, H., Guo, Y., Liu, M., Zhou, M. 2021.** Study on the metakaolin-based geopolymer pervious concrete (MKGPC) and its removal capability of heavy metal ions. *Int. J. Pavement Eng.*, 22(9): 1181–1192. Doi: 10.1080/10298436.2019.1667499
- Chindaprasirt, P., Jitsangiam, P., Chalee, W., Rattanasak, U. 2021.** Case study of the application of pervious fly ash geopolymer concrete for neutralization of acidic wastewater. *Case Stud. Constr. Mater.*, 15: e00770. Doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00770
- Dong, Z., Ma, H., Feng, W., Nie, Y., Shi, H. 2022.** Achieving superior high-strength geopolymer via the synergistic effect of traditional oven curing and microwave curing. *Constr. Build. Mater.*, 357: 129406. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129406
- Elango, KS., Gopi, R., Saravanakumar, R., Rajeshkumar, V., Vivek, D., Raman, SV. 2021.** Properties of pervious concrete – A state of the art review. *Mat. Today Proc.*, 45: 2422–2425. Doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.839
- Ganesh, CA., Vinod Kumar, M., Kanniga Devi, R., Srikar, P., Prasad, S., Manoj Kumar, M., Sarath, RP. 2021.** Pervious geopolymer concrete under ambient curing. *Mat. Today Proc.*, 46: 2737–2741. Doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.425
- Graytee, A., Sanjayan, JG., Nazari, A. 2018.** development of a high strength fly ash-based geopolymer in short time by using microwave curing. *Ceram. Int.*, 44(7): 8216–8222. Doi: 10.1016/j.ceramint.2018.02.001
- Guan, X., Luo, W., Liu, S., Hernandez, AG., Do, H., Li, B. 2023.** Ultra-high early strength fly ash-based geopolymer paste cured by microwave radiation. *Dev. Built Environ.*, 14: 100139. Doi: 10.1016/j.dibe.2023.100139
- Gultekin, A., Ramyar, K. 2022.** Effect of curing type on microstructure and compressive strength of geopolymer mortars. *Ceram. Int.*, 48(11): 16156–16172. Doi: 10.1016/j.ceramint.2022.02.163
- Huang, W., Wang, H. 2022.** Multi-aspect engineering properties and sustainability impacts of geopolymer pervious concrete. *Compos. B Eng.*, 242: 110035. Doi: 10.1016/j.compositesb.2022.110035
- Huang, W., Wang, H. 2021.** Geopolymer pervious concrete modified with granulated blast furnace slag: Microscale characterization and mechanical strength. *J. Clean. Prod.*, 328: 129469. Doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129469

- Jivani, R., Panchal, VR., Bhavsar, JK. 2018.** Performance assessment of pervious geopolymer concrete using metakaolin. *Int. J. Sci. Res. Sci. Eng. Technol.*, 4(5): 227-233.
- Khalil, WI., Frayyeh, QJ., Abed, HT. 2019.** Properties of metakaolin based pervious geopolymer concrete. *IOP Conf. Series: Mat. Sci. Eng.*, 518(2): 022056. Doi: 10.1088/1757-899X/518/2/022056
- Khalil, WJ., Frayyeh, QT., Abed, H. 2021.** Effect of ordinary Portland cement on some properties of pervious geopolymer concrete. *Eng. Tech. J.*, 39(4A): 668-674. Doi: 10.30684/etj.v39i4A.1793
- Luo, Y., Lv, Y., Wang, D., Jiang, Z., Xue, G. 2023.** The Influence of coarse aggregate gradation on the mechanical properties, durability, and plantability of geopolymer pervious concrete. *Constr. Build. Mater.*, 382: 131246. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131246
- Maguesvari, MU., Muthaiyan, P., Yugasini, S., Ammaiappan M. 2020.** Experimental studies on pervious geopolymer concrete. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 989: 012032. Doi: 10.1088/1757-899X/989/1/012032
- Maguesvari, MU., Narasimha, VL. 2013.** Studies on characterization of pervious concrete for pavement applications. *Procedia Soc. Behav. Sci.*, 104: 198-207. Doi: 10.1016/j.sbspro.2013.11.112
- Nanda, RP., Priya, N. 2024.** Geopolymer as stabilizing materials in pavement constructions: A review. *Clean. Waste Syst.*, 7: 100134. Doi: 10.1016/j.clwas.2024.100134
- Nurruddin, MF., Haruna, S., Mohammed, BS., Shaaban, IG. 2018.** Methods of curing geopolymer concrete: A review. *Int. J. Adv. Appl. Sci.*, 5(1): 31-36. Doi: 10.21833/ijaas.2018.01.005
- Raghwani, JR., Shah, D., Bhavsar, JK. 2016.** Performance assessment of pervious concrete by using silica fume." *J. Civ. Eng. Environ. Technol.*, 3(4): 269-273.
- Sanjaya, N., Saloma H., Juliantina, I., Nurjannah, SA. 2021.** Compressive strength, permeability and porosity analysis of pervious concrete by variation of aggregate and compacting method. *J. Phys. Conf. Ser.*, 1783(1): 012073. Doi: 10.1088/1742-6596/1783/1/012073
- Sata, V., Wongsa, A., Chindaprasirt, P. 2013.** Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates. *Constr. Build. Mater.*, 42: 33-39. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.046
- Shi, S., Li, H., Fabian, M., Sun, T., Grattan, KTV., Xu, D., Basheer, PAM., Bai, Y. 2016.** Alkali-activated fly ash manufactured with multi-stage microwave curing. Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Las Vegas, USA.
- Somaratna, J., Ravikumar, D., Neithalath, N. 2010.** Response of alkali activated fly ash mortars to microwave curing. *Cem. Concr. Res.*, 40(12): 1688-1696. Doi: 10.1016/j.cemconres.2010.08.010
- Sun, Z., Lin, X., Vollpracht, A. 2018.** Pervious concrete made of alkali activated slag and geopolymers. *Constr. Build. Mater.*, 189: 797-803. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.067
- Suwan, T., Fan, M. 2014.** "Influence of OPC replacement and manufacturing procedures on the properties of self-cured geopolymer." *Constr. Build. Mater.*, 73: 551-561. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.065
- Tempest, B., Sanusi, O., Gergely, J., Ogunro, V., Weggel, D. 2009.** Compressive strength and embodied energy optimization of fly ash based geopolymer concrete. 2009 World of Coal Ash (WOCA) Conference, USA.
- Tho-in, T., Sata, V., Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C. 2012.** Pervious high-calcium fly ash geopolymer concrete. *Constr. Build. Mater.*, 30: 366-371. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.028
- Yavuz, D., Yazici, S. 2023.** Experimental study of aggregate size and gradation on pervious concretes' mechanic, hydraulic, and surface properties. *Struct. Concr.*, 24:5451-5464. Doi: 10.1002/suco.202200234
- Yilmazer Polat, B. 2023.** The Influence of microwave curing on the strength of silica fume-added fly ash-based geopolymer mortars. *J. Sustain. Constr. Mater. Technol.*, 8(3): 207-215. Doi: 10.47481/jscmt.1315096
- Zaetang, Y., Wongsa, A., Sata, V., Chindaprasirt, P. 2015.** Use of coal ash as geopolymer binder and coarse aggregate in pervious concrete. *Constr. Build. Mater.*, 96: 289-295. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.076
- Zhang, B., Liu, Y., Pan, Z., Li, L., Huang, Y., Wang, Z., Chen, J., Lao, W., Liu, F., Zhu, H., Xiong, Z. 2024.** The microstructure and mechanical properties of recycled metakaolinite-based geopolymer: Dependence of recycled powder replacement ratio. *J. Build. Eng.*, 85: 108730. Doi: 10.1016/j.job.2024.108730
- Zhang, J., Sun, H., Shui, X., Chen, W. 2023.** Experimental investigation on the properties of sustainable pervious concrete with different aggregate gradation. *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, 17:64. Doi: 10.1186/s40069-023-00625-0
- Zhou, G., Luo, Y., Xue, G. 2023.** Study on mechanical properties of metakaolin based geopolymer pervious concrete. *E3S Web Conf.*, 439:02006. Doi: 10.1051/e3sconf/202343902006
- Ziada, M., Tanyildizi, H., Uysal, M. 2024.** The influence of carbon nanotube on underwater geopolymer paste based on metakaolin and slag. *Constr. Build. Mater.*, 414: 135047. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135047



Yüksek Plastisiteli Killerin Konsolidasyon Katsayısının Hesaplanması İçin Mevcut Yöntemlerin Karşılaştırılması

Comparison of Existing Methods for Calculating the Coefficient of Consolidation of High Plasticity Clays

Dilek Cansu Bozacıoğlu^{1*}, Ömer Faruk Çapar², Ertan Bol³

¹Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

²Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye

³Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

Öz

İnce daneli, suya doymuş zeminler üzerine inşa edilen yapıların tasarımında konsolidasyon oturma süresinin tahmin edilmesi, hayati bir öneme sahiptir. Konsolidasyon oturma süresi tek boyutlu konsolidasyon deneylerinden elde edilen konsolidasyon katsayısı (cv) ile hesaplanmaktadır. Araziye yapılan zemin etüt uygulamalarında ise, zemindeki oturma hızı ve aşırı boşluk suyu basıncının değişim süresi cv yardımı ile hesaplanmaktadır. Son yıllarda, laboratuvar ortamında yapılan tek boyutlu konsolidasyon testlerinden cv değerlerini belirlemek amacıyla birçok sayısal ve grafiksel yöntemler geliştirilmiştir. Bu çalışmada, yüksek plastisiteli killi bir zeminin yeniden oluşturulmuş örnekleri üzerinde tek boyutlu konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Konsolidasyon deneyleri sonucunda cv'yi tespit etmek için grafiksel ve sayısal olmak üzere toplam altı farklı yöntem kullanılmıştır. Kullanılan yöntemler arasında ASTM D 2435 ve TS 1900-2 standartlarının önerdiği Casagrande Yöntemi ve Taylor Yöntemi ile birlikte Maksimum Eğim Yöntemi, Dikdörtgen Hiperbol Yöntemi, Erken Kademe Log-t Yöntemi ve Hesaplamalı Yöntemleri yer almaktadır. 6 farklı yöntem ile hesaplanan cv değerleri ve ortalama konsolidasyon yüzdeleri kullanılarak elde edilen deformasyon-zaman ilişkileri ile deneylerden elde edilen deformasyon-zaman ilişkileri karşılaştırılarak en iyi tahmin yöntemi belirlenmeye çalışılmıştır. Bu yöntemler arasında klasik yöntem olan Casagrande Yöntemi ile elde edilen cv değerleri, en düşük %2.51 ve en yüksek %18.88 hata oranları ile deney verilerine en yakın sonuçları vermiştir. Bu sonuçlara göre Casagrande Yöntemi cv'yi tahmin etmek için en etkili yöntemdir.

Anahtar Kelimeler: Hesaplama yöntemleri, konsolidasyon hızı, konsolidasyon katsayısı.

Abstract

In the design of structures built on fine-grained, water-saturated soils, the estimation of consolidation settlement duration is of vital importance. The consolidation settlement duration is calculated using the coefficient of consolidation (cv), which is obtained from one-dimensional consolidation tests. In geotechnical site investigations, the rate of settlement and the dissipation time of excess pore water pressure are also estimated with the help of cv. In recent years, numerous numerical and graphical methods have been developed to determine cv values from laboratory-based one-dimensional consolidation tests. In this study, one-dimensional consolidation tests were conducted on remolded specimens of a highly plastic clay soil. A total of six different methods, both graphical and numerical, were employed to determine the coefficient of consolidation from the test results. Among the methods used were the Casagrande Method and the Taylor Method, as recommended by ASTM D2435 and TS 1900-2 standards, along with the Maximum Slope Method, Rectangular Hyperbola Method, Early Stage Log-t Method, and Computational Method. By comparing the deformation-time relationships obtained using cv values and average degree of consolidation from these six methods with the experimental deformation-time data, an attempt was made to identify the most accurate estimation method. Among these methods, the classical Casagrande Method yielded cv values that were closest to the experimental data, with minimum and maximum error rates of 2.51% and 18.88%, respectively. Based on these results, the Casagrande Method is considered the most effective method for estimating the coefficient of consolidation (cv).

Keywords: Calculation methods, consolidation rate, consolidation coefficient.

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: dcansu.turhan@beun.edu.tr

Dilek Cansu Bozacıoğlu orcid.org/0000-0001-7579-6494

Ömer Faruk Çapar orcid.org/0000-0002-6325-8223

Ertan Bol orcid.org/0000-0002-3903-0384



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

1. Giriş

Zemin mekaniği ve geoteknik mühendisliği alanlarında, zeminlerin zaman içindeki oturma davranışının belirlenmesi kritik bir öneme sahiptir. Bu kapsamda, c_v , zeminlerin zamana bağlı hacimsel değişikliklerini ve oturma davranışlarını anlamak için yaygın olarak kullanılan bir parametredir. c_v 'nin doğru bir şekilde belirlenmesi, temellerin oturma tahminleri, baraj ve dolgu yapılarının stabilitesi, yol ve demiryolu inşaatları gibi çeşitli mühendislik uygulamalarında kritik bir rol oynar (Lambe ve Whitman 1969).

Konsolidasyon, özellikle temel alanlarında, yapılara uygulanan yüklerden kaynaklanan gelecekteki oturmaya tahmin etmek/değerlendirmek için büyük bir önem taşımaktadır (Kumar ve Darga Kumar, 2016). İnce daneli sıkışabilir zemin üzerine kurulan bir yapının oturma davranışları genellikle Terzaghi'nin bir boyutlu konsolidasyon teorisi ile analiz edilir. Bu teoriye göre oturma hızını etkileyen en önemli faktör c_v 'dir (Terzaghi 1943).

Konsolidasyon, su doygunluğu yüksek olan ince daneli zeminlerin, zamanla su kaybederek hacim değişimine uğramaları olarak tanımlanabilir. Bu sürecin anlaşılması için c_v kritik bir parametredir. c_v , zeminin permeabilitesi ve sıkışabilirlik özelliklerine bağlı olarak değişim gösterir. c_v 'nin doğru hesaplanması, tasarım yükleri altındaki zeminlerin oturma miktarının ve sürelerinin tahmin edilmesine yardımcı olur (Holtz ve Kovacs 2015, Mesri ve Feng 2019).

Terzaghi'nin bir boyutlu konsolidasyon teorisine dayanarak, laboratuvar konsolidasyon testinden c_v 'yi değerlendirmek için çeşitli eğri uydurma yöntemleri bulunmaktadır. Bu eğri uydurma yöntemlerine göre; c_v esas olarak sıfır konsolidasyona karşılık gelen ilk kadran okumasının seçimine bağlıdır ve bu da büyük ölçüde öznellik içeren bir eğri ailesinden değerler gerektirir (Scott 1961). Bazen, ilk veya son deformasyon okumaları hatalara yol açabilir veya uygun olmayan c_v değerleri üretebilir. Bu nedenle c_v hesaplarında yöntem seçimi büyük bir önem taşımaktadır (Muntohar 2009). c_v 'nin doğru bir şekilde hesaplanması, mühendislik projelerinde oturma tahminlerinin güvenilirliğini ve zemin davranışına yönelik analizlerin doğruluğunu artırır. Dolayısıyla, c_v 'nin doğru bir şekilde belirlenmesi, zemin davranışına yönelik tahminlerin güvenilirliğini artırır ve tasarım hatalarını en aza indirir (Kumar ve Darga Kumar 2016).

Literatürde c_v 'nin belirlenmesi için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler, konsolidasyon deneylerinden elde edilen verilerin farklı teorik yaklaşımlar kullanılarak değerlendirilmesine dayanır. En yaygın kullanılan yöntemler ASTM

D 2435 ve TS 1900-2'nin de önermiş olduğu Casagrande Logaritma-Zaman (Casagrande ve Fadum 1940) ve Taylor Karekök-Zaman (Taylor 1942) yöntemleridir. Ancak literatür araştırmalarında bu yöntemlerden farklı olarak Maksimum Eğim Yöntemi (Su 1958), Dikdörtgen Hiperbol Yöntemi (Sridharan ve Parakash, 1985) Erken Kademe Log-t Yöntemi (Robinson ve Allam 1996), ve Hesaplamalı Yöntemler (Swaram ve Prabhata 1997) de yer almaktadır.

Literatürde, c_v 'nin belirlenmesiyle ilgili çok sayıda araştırma yapılmış olup, farklı hesaplama yöntemlerinin etkinliği tartışılmıştır. Bazı çalışmalar, kil mineralojisinin c_v üzerindeki etkisini inceleyerek montmorillonit ve kaolinit gibi minerallerin farklı konsolidasyon davranışları sergilediğini göstermiştir (Mishra vd. 2010). Farklı çalışmalar, Atterberg limitlerinin (likit limit, plastik limit) c_v ile olan ilişkisini araştırmış ve bu limitlerin c_v değerinin tahmininde önemli bir gösterge olduğunu ortaya koymuştur (Dehghanian ve İpek 2022). Bazı araştırmalar, geoteknik indeks parametreleri (boşluk oranı, plastisite indisi, özgül ağırlık) ile c_v arasında anlamlı korelasyonlar bulunduğunu belirtmiştir (Kok Shien vd. 2018, Bello vd. 2019). Ancak bu çalışmaların birçoğu özel zemin türlerine odaklanmış olup, farklı hesaplama yöntemlerinin gerçek deney verileriyle ne kadar uyumlu olduğu konusunda eksiklikler mevcuttur (Jayalekshmi ve Elamathi 2023).

Bu çalışmada, yüksek plastisiteli killi bir zemin örneği olan bentonit üzerinde gerçekleştirilen konsolidasyon deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak c_v 'nin altı farklı yöntemle hesaplanması ve bu yöntemlerin deneysel ölçümlerle uyumunun karşılaştırılması amaçlanmıştır. Böylece, mühendislik uygulamalarında hangi yöntemin daha doğru ve güvenilir sonuçlar sağladığı belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmanın sonucunda, farklı yöntemlerin c_v değerleri üzerindeki etkileri değerlendirilerek, mühendislik projelerinde kullanılacak en güvenilir hesaplama yöntemleri belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuçların, c_v 'nin belirlenmesinde kullanılan yöntemlerin doğruluklarını test etmek ve pratik uygulamalara katkı sağlamak adına faydalı olacağı düşünülmektedir. Bu çalışma, farklı hesaplama yöntemlerinin deneysel verilerle geri hesaplamasını yaparak mühendislik uygulamalarında kullanılacak en güvenilir yaklaşımı belirlemeyi hedeflemektedir.

2. Teori

Bu bölümde, konsolidasyon deneyleri sonucunda c_v 'nin belirlenmesine yönelik kullanılan yöntemler ele alınacaktır. Literatürde c_v hesaplanmasına yönelik birçok farklı yaklaşım

geliştirilmiştir. Ancak, bu çalışmada değerlendirilen grafiksel ve ampirik yöntemler açıklanacaktır. ASTM D2435 ve TS 1900-2 standartlarında önerilen Taylor Karekök-Zaman ve Casagrande Logaritma-Zaman Yöntemlerinin yanı sıra Dikdörtgen Hiperbol, Maksimum Eğim, Erken Kademe Log-t ve Hesaplamalı Yöntemler bu kapsamda incelenmiştir.

2.1. Casagrande Yöntemi

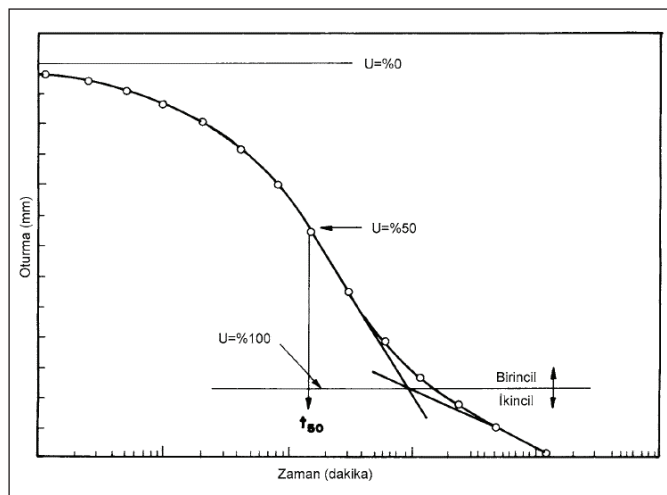
Çasagrande yönteminde, c_v değerini değerlendirmek için Şekil 1'deki gibi yarı logaritmik eksenle zaman-oturma (deformasyon) ilişkisi çizilir ve bu ilişkiden %0 ve %100 birincil konsolidasyonu temsil eden noktaların belirlenmesi gereklidir. Konsolidasyonun ilk aşamalarındaki zaman-çökme ilişkisi parabolik bir yapıya sahiptir. Bu nedenle, düzeltilmiş başlangıç oturma (%0 konsolidasyon), eğrinin başlangıç kısmında t_1 ve $t_2=4t_1$ zamanlarının seçilmesiyle elde edilir. Oturma-zaman eğrisinin birincil konsolidasyonu ifade eden doğrusal kısmın teğeti ile ikincil konsolidasyon teğetinin kesişimi, birincil konsolidasyonun %100'ünü gösterir. %0 ile %100 konsolidasyona denk gelen oturma değerlerinin ortalaması (%50) elde edilir. Bu oturmaya denk gelen zaman t_{50} olarak kabul edilir. Deney sırasında ortalama zemin numunesinin drenaj boyu kullanılarak c_v aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$c_v = \frac{0.197Hdr^2}{t_{50}} \quad (1)$$

H_{dr} : zemin örneklerinin drenaj yüksekliği ve t_{50} : %50 konsolidasyona karşılık gelen zaman okumasıdır.

2.2. Taylor Yöntemi

Karekök zaman yöntemi olarak da adlandırılan Taylor yöntemi, oturma veya sıkışma ile zamanın karekökü arasında-



Şekil 1. Casagrande Yöntemi ile cv hesaplaması (TS 1900-2).

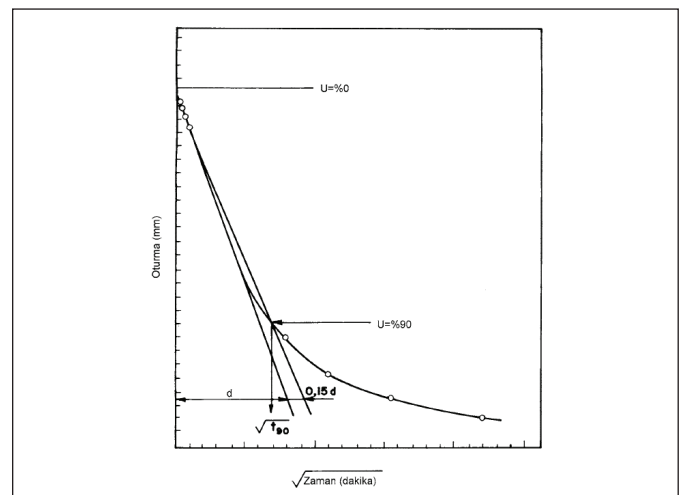
ki bilışıkiyi içeren grafik ekil 2’de sunulmuştur. Bu yöntem, konsolidasyonun %90’ının ($U_v = 90$) tamamlanmasına kadar filtreleme sürecinin baskın olduğu varsayımına dayanır ve teorik konsolidasyon eğrisinin başlangıç kısmının parabolik olduğunu bilmekten faydalanır. Grafiksel işlemde, $d - \sqrt{t}$ eğrisinin başlangıcına bir doğru çizilir. bu doğrunun $t=0$ noktasına geri uzatılmasıyla birincil konsolidasyonun %0’ını gösteren düzeltilmiş başlangıç deformasyonu (d_0) belirlenir. Eğrinin başlangıçtaki doğrusal kısmı bir eğime sahiptir. Belirli bir $U_v = 90$ için, eğim, d_{90} ve t_{90} cinsinden şu şekilde ifade edilebilir: Burada d_{90} , birincil konsolidasyonun %90’ındaki deformasyon okumasını ve t_{90} , buna karşılık gelen zamanı temsil eder. Konsolidasyonun %90’ında c_v ’yi hesaplamak için 1.153 faktörü, oturma-zaman eğrisinin başlangıçtaki doğrusal kısmı ile kullanılır. Taylor yöntemi, $d - \sqrt{t}$ eğrisinin başlangıçtaki düz çizgi kısmının belirlenmesine de bağlıdır; bu nedenle, başlangıç eğrisinin sürekli bir eğrilik gösterdiği zeminler için bu yöntem uygulanamaz. Bu yöntem, düz çizginin ilk birkaç noktadan mı yoksa daha fazla noktadan geçen bir “ortalama çizgi” olarak mı çizildiğine bağlı olarak yorumlayıcının takdirine açık bir şekilde hassastır. Taylor yönteminde c_v değerini veren formül aşağıdaki gibidir:

$$C_v = \frac{0.848Hdr^2}{t_{90}} \quad (2)$$

H_{dr} : zemin örneklerinin drenaj yüksekliği ve t_{90} : %90 konsolidasyona karşılık gelen zaman okumasıdır.

2.3. Maksimum Eğim Yöntemi

Su (1958) tarafından önerilen ve en dik eğim yöntemi olarak da bilinen maksimum eğim yöntemi Casagrande yöntemi gibi yarı logaritmik eksenle çizilen zaman-deformasyon



Şekil 2. Taylor Yöntemi ile cv hesaplaması (TS 1900-2).

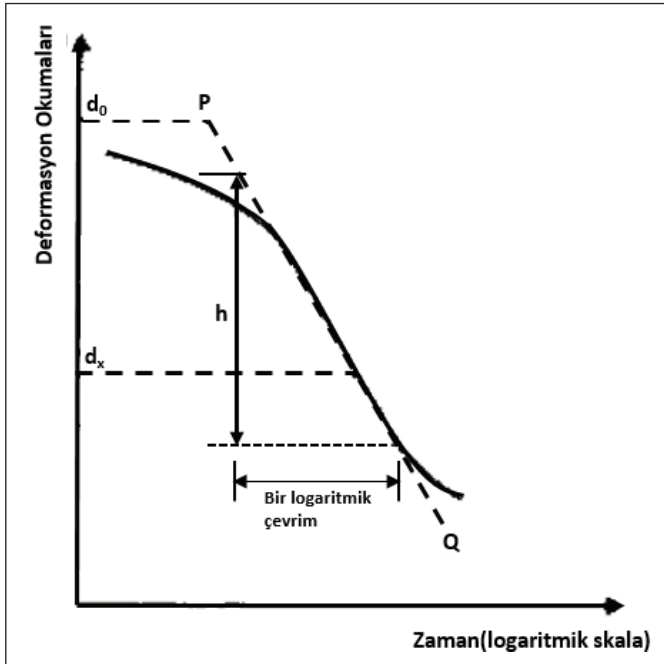
ilişkisini içermektedir (Şekil 3). Bu yöntemde c_v 'yi elde etmek için Casagrande yöntemiyle aynı adımlar izlenerek d_0 bulunur. Bir logaritmik çevrim arındaki fark (h) elde edilir. Eşitlik 3 kullanılarak d_u elde edilir. d_u değerine karşılık gelen zaman değeri t_u elde edilir ve eşitlik 4 ile c_v hesaplanır. Maksimum eğim yöntemi Casagrande yönteminde açıklanan eğrinin uç kısmının net bir şekilde ayırt edilemediği durumlarda kullanılabilir. Bu yöntem tipik S şeklini sergilemeyen konsolidasyon eğrileri için daha uygulanabilir olarak önerilmiştir.

$$d_u = d_0 + \frac{h}{0.688} U_{av} \quad (3)$$

d_0 : Casagrande Yöntemi ile belirlenen $t=0$ anındaki deformasyon okuması, h : bir logaritmik çevrimdeki deformasyon farkı ve U_{av} : ortalama konsolidasyon yüzdesidir.

$$c_v = \frac{T_v H_{dr}^2}{t_u} \quad (4)$$

H_{dr} : zemin örneklerinin drenaj yüksekliği, T_v : boyutsuz zaman faktörü ve t_u : d_u deformasyonuna gelen zaman okumasıdır.



Şekil 3. Maksimum Eğim Yöntemi ile c_v hesaplaması (Su 1958).

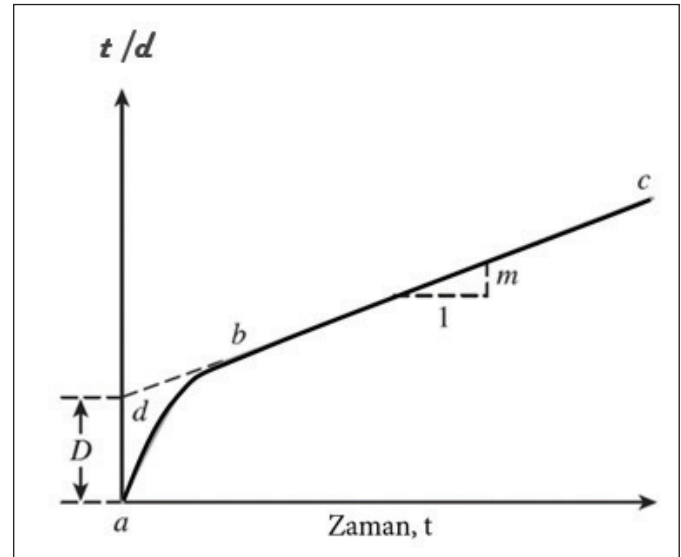
2.4. Dikdörtgen Hiperbol Yöntemi

Dikdörtgen hiperbol yöntemi ilk olarak Sridharan ve Rao (1981) tarafından geliştirilmiş ve Sridharan ve Prakash (1985) tarafından iyileştirilmiştir. Bu yöntemde U_v - T_v (Za-

man Faktörü) ilişkisi $\%60 < U_v < \%90$ üzerinde dikdörtgen bir hiperbol ile yaklaştırılır. Bu yöntemde c_v hesaplanırken; zaman (t) ve laboratuvar deneylerinden elde edilen deformasyon okumaları (d) değerleri kaydedilir. t/d değerine karşılık t grafiği çizilir (Şekil 4). Grafiğin lineer olan b-c doğrusu kısmı ve bu doğrunun eğimi (m) belirlenir. b noktasından d noktasına kadar uzatılır ve D uzunluğu ölçülür. Bu yöntemde, aritmetik ölçeklerde T_v 'ye karşı T_v/U_v şeklinde normalleştirilmiş bir teorik grafik kullanılmaktadır. Bu grafikten elde edilen değerler ile c_v Eşitlik 5 ile hesaplanır.

$$c_v = 0.3 \left(\frac{m H_{dr}^2}{D} \right) \quad (5)$$

m : bc doğrusunun eğimi, D : bc doğrusunun y eksenini kestiği noktanın değeri ve H_{dr} : zemin örneklerinin drenaj yüksekliğidir.



Şekil 4. Dikdörtgen Hiperbol Yöntemi ile c_v hesaplaması (Sridharan ve Prakash 1985).

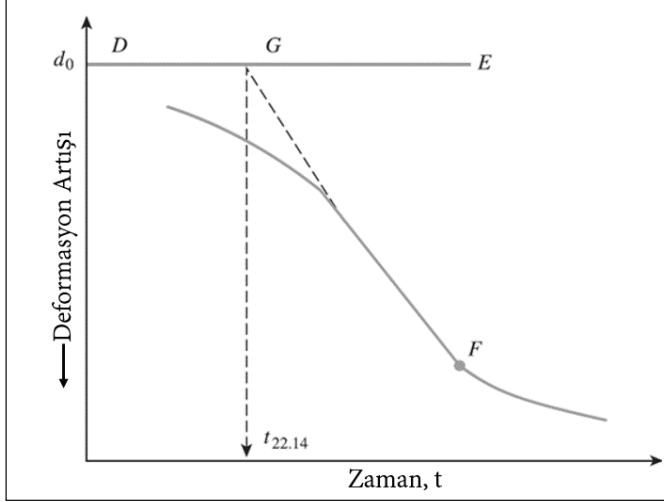
2.5. Erken Kademe Log-t Yöntemi

Robinson ve Allam (1996), yarı logaritmik grafikteki (Şekil 5) zaman sıkıştırma verilerinin erken aşamasının c_v 'yi belirlemek için kullanıldığı revize edilmiş bir Casagrande Yöntemi önermiştir. Bu yöntemde $\%0$ konsolidasyonu ($U_v=0$) belirleme prosedürü Casagrande Yöntemi ile aynıdır. Teorik varsayımlar açısından bu yöntem, $U_v = 0$ doğrusunu kesecek şekilde uzatılan bükülme noktasından ($U_v = \%70.52$ ve $T_v = 0.41$) geçen teğeti kullanılmaktadır. Kesişme noktası $U_v = \%22.14$ ve $T_v = 0.0385$ 'e karşılık gelmektedir. U_v -log T_v ilişkisinin bu özelliği, konsolidasyonun $\%0$ 'ını temsil eden düzeltilmiş başlangıç kalınlığından geçen doğru ile bükülme

noktasından çizilen teğetin kesişim noktasının belirlenmesini sağlar. Bu kesişim noktasından elde edilen $t_{22.14}$ karakteristik zamanı, c_v 'yi hesaplamak için kullanılır ve c_v Eşitlik 6 ile hesaplanır:

$$c_v = \frac{0.0385xH_{dr}^2}{t_{22.14}} \quad (6)$$

H_{dr} : zemin örneklerinin drenaj yüksekliği ve $t_{22.14}$: %22.14 konsolidasyona karşılık gelen zaman okumasıdır.



Şekil 5. Erken Kademe Log-t Yöntemi ile c_v hesaplaması (Robinson ve Allam 1996).

2.6. Hesaplamalı Yöntem

Zamana bağlı oturma genellikle Terzaghi (1943)'nin bir boyutlu konsolidasyon teorisi kullanılarak hesaplanır. Bu teoriye dayanan teorik konsolidasyon eğrisi, basit bir cebirsel denklemle başarılı bir şekilde ifade edilmiştir. Seçilen üç konsolidasyon deney verisinden yola çıkarak c_v 'yi belirleyen bir denklem türetilmiş ve bu ifade genişletilmiştir. Swaram ve Prabhata tarafından 1997 yılında geliştirilen bu yöntem, grafik veya tablo kullanımına ihtiyaç duymadan dijital ortamda kolaylıkla uygulanabilir. Terzaghi'nin bir boyutlu konsolidasyon teorisini esas alan bu yöntem, cebirsel denklemler aracılığıyla c_v 'yi hesaplamayı mümkün kılar. Konsolidasyon deneylerinden elde edilen veriler doğrudan kullanılarak herhangi bir ek grafik ya da çizelgeye gerek kalmadan c_v değeri hesaplanır. Bu yöntemle c_v Eşitlik 7'de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$c_v = \frac{\pi}{4} \left[\frac{d_1 - d_2}{d_0 - d_{100}} \frac{H}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right]^2 \quad (7)$$

$$d_0 = \frac{d_1 - d_2 \sqrt{\frac{t_1}{t_2}}}{1 - \sqrt{\frac{t_1}{t_2}}} \text{ ve} \quad (8)$$

$$d_{100} = d_0 - \frac{d_0 - d_3}{\left\{ 1 - \left[\frac{(d_0 - d_3)(\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1})}{(d_1 - d_2)\sqrt{t_3}} \right]^{5.6} \right\}^{0.179}}$$

Ayrıca d_1 ve d_2 (onlara karşılık gelen t_1 ve t_2) seçilirken konsolidasyonun erken safhasından yani, konsolidasyon derecesinin %53'ten az olduğu deformasyon okumalarından seçilmesi gerektiği anlamına gelir. d_3 ve ona karşılık gelen zaman t_3 seçilirken ise oturma'nın büyük ölçüde tamamlanmış olmasına dikkat edilmelidir.

3. Malzeme Özellikleri ve Yöntem

3.1. Malzeme Özellikleri

Bentonit gibi smektit grubu killerin yüksek şişme ve su tutma kapasitesi sebebi ile konsolidasyon deneyinin uygulanması oldukça zordur. Ancak saf ve homojen olarak piyasa da bulmak oldukça kolaydır. Böylelikle laboratuvar ortamında birbirine eş numune yapmak kolaylaşmaktadır. Bu çalışmada, konsolidasyon deneyleri 2017 yılında Çanbensan San. Tic. A.Ş. firmasından ticari olarak satın alınan ve Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi (ZBEÜ) Mühendislik Fakültesi Tekno Lab. Zemin Mekaniği Laboratuvarında bulunan yüksek plastisiteli bentonit kili (Şekil 6) kullanılarak ASTM D2435/D2435-11, TS 1900-2'e göre gerçekleştirilmiştir. Zemin örneklerinin TS 1900-1'e göre indeks özellikleri belirlendikten sonra, başlangıç su içerikleri likit limit değerlerine eşit olacak şekilde hazırlanan numuneler bir boyutlu konsolidasyon deneyine tabi tutulmuştur. Tanımlama deneyleri sonucunda elde edilen indeks özellikler Çizelge 1'de özetlenmiştir. Çizelge 1'de verilen deney sonuçlarına göre; bu zemin Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi ile sınıflandırıldığında yüksek plastisiteli kil zemin (CH) grubundadır. Ticari olarak satın alınan bu zeminin kimyasal yapısı firmadan temin edilemediği için Dağlı (2021) tarafından XRF analizi yapılmıştır ve bu analize ait sonuçlar Çizelge 2'de verilmiştir. XRF analizleri sonucunda, CH sınıfına giren bu zeminin büyük ölçüde SiO_2 (%65.748) ve Al_2O_3 (%17.418) içerdiği belirlenmiştir. Kalan %16.834'lük bölüm ise ağırlıklı olarak %7.783 Fe_2O_3 , %3.591 Na_2O ve %3.161 MgO 'dan oluşmakta; ayrıca eser miktarda K_2O , Cl , BaO , SO_3 , ZnO ve Rb_2O gibi diğer bileşikler de tespit edilmiştir (Dağlı, 2021). c_v 'nin, zemin boşluğundaki sıvının kimyasal özelliklerinden etkilendiği bilindiği için, tüm tanımlama ve konsolidasyon deneylerinde damıtılmış su ter-

Çizelge 1. Malzemenin indeks özellikleri.

Zemin Türü	Zemin Sınıfı	Kıl %	Silt %	Özgül Ağırlık, GS	Likit Limit, LL	Plstik Limit, PL	Plastisite İndisi, PI	Aktivite, ACT
B100	CH	81	19	2.627±0.050	278.475±4	46.4±0.6	232.058	2.865

Çizelge 2. B100 zeminine ait XRF analiz sonuçları (Dağlı, 2021).

Bileşik	Konsantrasyon (%)
SiO ₂	65.748
Al ₂ O ₃	17.418
Fe ₂ O ₃	7.783
Na ₂ O	3.591
MgO	3.161
K ₂ O	1.487
SO ₃	0.609
CaO	0.000

cih edilmiştir. Anlatım kolaylığı olması açısından tüm bulgu ve sonuçlarda bentonit örnekleri için B100 kısaltması kullanılmıştır.

**Şekil 6.** Deneyisel çalışmalarda kullanılan malzeme.

3.2. Konsolidasyon Deneyleri İçin Örneklerin Hazırlanması

B100 zeminin konsolidasyon deneylerinde kullanılan zemin

örnekleri başlangıç su içeriği kendi likit limitine eşit olacak şekilde hazırlanmıştır. Ağırlık kontrollü olarak ring içine yerleştirilecek numuneler için ilk aşamada gerekli numune ağırlıkları hesaplanmıştır. Likit limit su içeriği (%278.5) ile hazırlanan numunelerin likit limit boşluk oranında ($e_L=7.316$) olması için ringe yerleştirilecek toplam doygun malzeme miktarı 46.929 gram olarak belirlenmiştir. Her bir ring için 20 gram kuru numune alınmış (Şekil 7 a) ve yaklaşık 45.5 gram su ile karıştırılmıştır (Şekil 7 b). Yüksek plastisiteli killer, kohezyonlu olduğu için, su ile karıştırırken su hemen homojen olarak dağılamamaktadır. Bu nedenle su içeriğinin eşit şekilde dağılması amacıyla, Raju ve arkadaşlarının (1995) yüksek plastisiteli killer için önerdiği yöntem takip edilerek, numuneler 48 saat boyunca desikatörde bekletilmiştir. Ardından, ring içine yerleştirilmesi gereken ağırlık sağlanmaya çalışılarak ve zemin örnekleri içinde hava kalmamasını sağlamak için şişleme işlemi uygulanarak numuneler konsolidasyon ringlerine yerleştirilmiştir (Şekil 7 c). Geriye kalan yaş numuneler, su içeriği kontrolü için kullanılmıştır (Şekil 7 d) ve 24 saat etüvde kurutulduktan sonra gerekli ölçümler tamamlanmıştır. Konsolidasyon deney numunelerinin hazırlanma aşamasında ortaya çıkabilecek hatalar deney sonuçlarında farklılıklara yol açabilmektedir. Bu farklılıkları minimum ve kabul edilebilir sınırlar içerisinde tutmak amacıyla B100 zeminine ait özdeş zeminler üzerinde 5 adet konsolidasyon deneyi gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3'te B100 zemininin 5 örneği için konsolidasyon deneyleri öncesindeki başlangıç su içeriği, boşluk oranı ve ring içindeki yaş kütle bilgileri verilmiştir.

Çizelge 3. B100 zeminin deney başındaki bilgileri.

Deney No	Ring İçi Yaş Kütle (g)	Başlangıç Su İçeriği (%)	Başlangıç Boşluk Oranı
1	46.260	282.7	7.733
2	44.658	281.8	7.958
3	45.119	282.4	7.879
4	46.045	285.2	7.830
5	45.804	282.3	7.745

Bu çalışmada konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilirken ASTM D2435/D2435-11 standardı kullanılmıştır. Deney-



Şekil 7. B100 zemin örneklerinin hazırlanması.

ler için hazırlanan örnekler 50 mm çapında 20 mm yüksekliğindeki konsolidasyon ringine yukarıda anlatıldığı gibi ağırlık kontrollü olarak yerleştirilmiştir. Konsolidasyon deneylerinde yükleme adımları 25 kPa'dan başlayıp yük artış oranı (LIR) bire eşit olacak şekilde 3200 kPa değerine kadar yükseltilmiştir. ASTM D2435/D2435-11 standardındaki prosedürlere göre her bir yük kademesinde 24 saat süre beklendikten sonra bir sonraki yükleme geçilmelidir. Ancak aynı standartta "Bazı zeminler için, birincil konsolidasyonun sonuna ulaşmak için 24 saatten fazla bir süre gerekebilir. Bu gibi durumlarda, 24 saatten daha uzun yük artış süreleri gereklidir. Bu testler için yük artış süresi genellikle 24 saatin bazı katlarında alınır ve testin tüm yük artışları için standart süre olmalıdır. 24 saatten daha uzun bir yük artırma süresi kullanma kararı, genellikle belirli zemin türleriyle ilgili deneyime dayanır. Bununla birlikte, 24 saatlik bir sürenin yeterli olup olmadığı konusunda bir soru varsa, 24 saatlik bir sürenin yeterliliğini doğrulamak için ilk yük artışları için zamanla birlikte eksenel deformasyon kaydı yapılmalıdır. 24 saat dışındaki yük artırma süreleri raporda belirtilecektir. Zamana karşı deformasyon verilerinin gerekli olmadığı yük artışları için, zamana karşı deformasyon okumalarının alındığı zamanla yaklaşık aynı süre boyunca yükü numune üzerinde bırakın." ifadesi yer almakta-

dır. Bu nedenle konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilirken her bir yük kademesi, 24 saat yerine 72 saat zemin örnekleri üzerinde uygulanmıştır.

3.3. Konsolidasyon Katsayısının Hesaplanması

Bu çalışmada, c_v 'nin hesaplanması için teori bölümünde açıklanan altı farklı yöntem kullanılmıştır. Her bir yöntemin, zemin numunesinin sıkışma davranışları ve su içeriği değişimlerini analiz etmek için farklı teorik yaklaşımları ve hesaplama teknikleri teori bölümünde detaylandırılmıştır. Bu yöntemler, konsolidasyon sürecinin farklı aşamalarına odaklanarak c_v değerini belirler ve zeminin farklı basınç seviyeleri altındaki davranışını değerlendirir. Bu çalışmada bu yöntemler ile c_v hesaplanması için Microsoft Office-Excel Macroları yazılmıştır. Zemin örneklerinin her bir yükleme başındaki yüksekliği, deformasyon okumaları ve zaman bilgileri girilerek c_v değerleri hesaplanmıştır. Bu Excel hesaplamaları kullanılarak tüm yöntemler ile aynı konsolidasyon verilerini kullanarak farklı yaklaşımlarla c_v değerini belirlenmeye çalışılmıştır.

Verilerde belirli bir eğilim gözlenmekle birlikte, her yöntemin kendine özgü kriterleri bulunmaktadır. Örneğin, eğim veya başlangıç noktası gibi parametrelerin tanımlanmasındaki farklılıklar, sonuçlar arasında sapmalara neden olmaktadır. Özellikle Taylor ve Casagrande yöntemlerinin eğim temelli çalıştığı, Dikdörtgen Hiperbol Yöntemi'nin ise farklı bir eğri tipini kullanarak hesaplamaları gerçekleştirdiği görülmektedir. Bununla birlikte, dikdörtgen hiperbol yöntemindeki doğrusal kısmın, Casagrande yöntemindeki doğrusal kısma denk gelmesi gerektiği belirtilmektedir. Bu durum, sonuçların genelde birbirine yakın olmasını sağlasa da küçük farklılıkların oluşmasına yol açabilmektedir.

4. Bulgular ve Tartışma

Bu analiz kapsamında, yöntemlerden elde edilen c_v değerleri ile deneysel okumalar yarı logaritmik skala kullanılarak karşılaştırılmış ve her yöntemin doğruluğu ile tutarlılığı incelenmiştir. Bu bölümde, 5 farklı konsolidasyon deneylerinden elde edilen bulgular detaylı olarak sunulmaktadır. Gerçekleştirilen 5 adet konsolidasyon deneylerinde aynı deneysel basınç altında elde edilen deformasyon-zaman ilişkileri birbirlerine oldukça yakındır. Buna rağmen tüm deneylerin yükleme aşamasındaki basınçlardaki c_v hesaplamaları deneysel okumalar ile karşılaştırılmıştır. Deformasyon-zaman ilişkilerinin benzerliği nedeniyle, gerçek deney okumaları ile elde edilen karşılaştırma grafikleri de birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Bu nedenle, bu çalışmada örnek olarak 1 numaralı deneye ait grafikler ve hata analizleri sunulmuş-

tur. Ayrıca c_v hesaplama yöntemlerinin karşılaştırılması için yaklaşımlardan elde edilen deformasyon-zaman ilişkisi ile deney okumalarından elde edilen deformasyon-zaman ilişkilerinin birbirlerine sırasıyla en uzak ve en yakın oldukları konsolidasyon basıncı $s'_{con} = 50$ ve 200 kPa altında elde edilen grafikler kullanılmıştır.

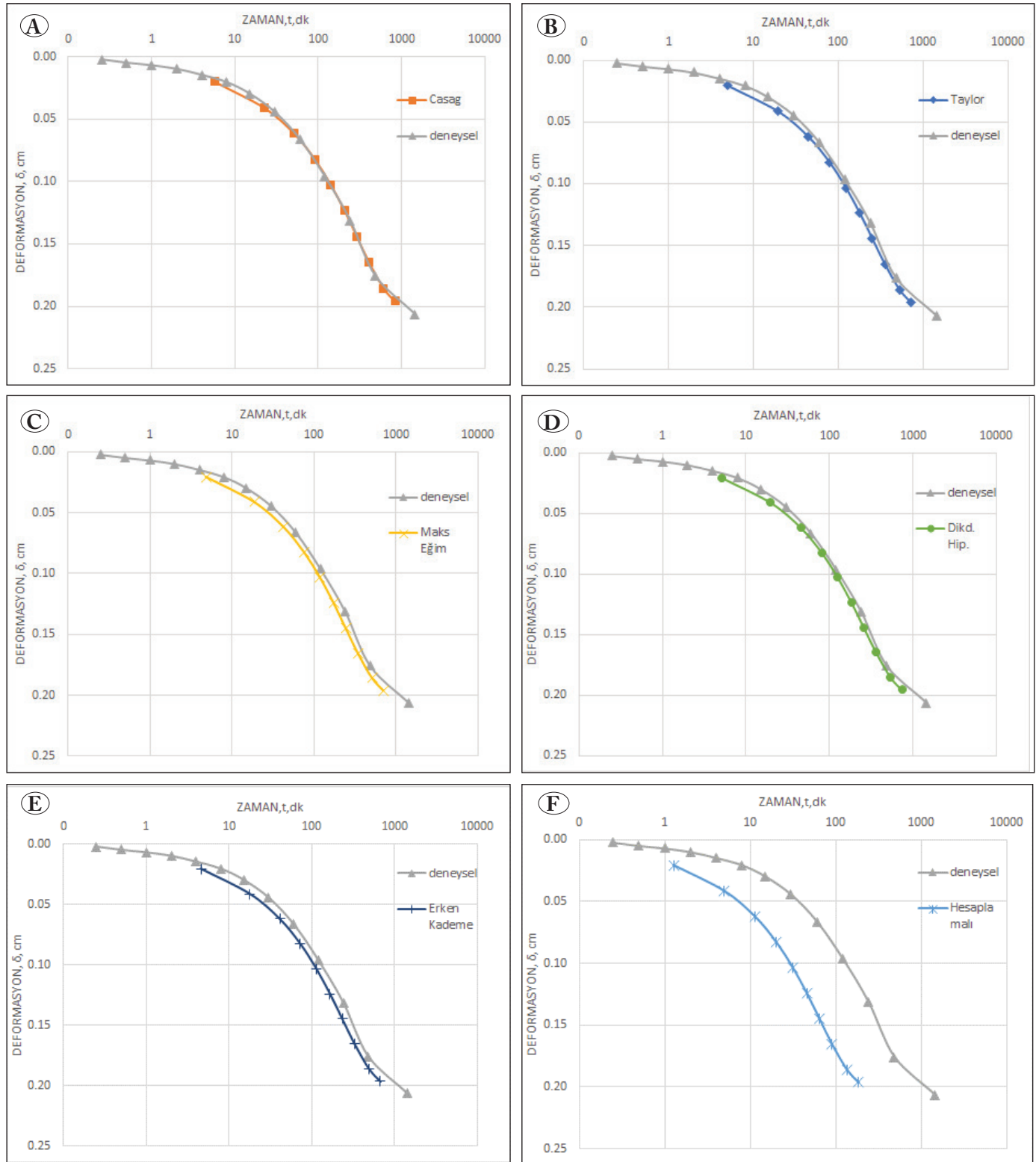
Bilindiği üzere konsolidasyon deneyinde okuma zaman aralıkları 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 15.0, ..., 1440 dk olarak ($t_n \gg 2 \cdot t_{n-1}$) sıralanmaktadır. Her bir zaman aralığında okunan oturma değerleri bütün mevcut yöntemlerde giriş verisi olarak kullanılmaktadır. Ancak c_v değerleri belirlendikten sonra, karşılaştırma ve tahminlerde yalnızca birincil konsolidasyon bölgesine karşılık gelen, Log t-Deformasyon grafiğinin doğrusal kısmındaki zaman aralığı geçerlidir. Bundan dolayı zaman aralığı 8 ile 1440 dakika arası seçilmiştir.

Şekil 8'de B100 zemininin 1. deneyinin 50 kPa basınçta c_v 'yi hesaplama yöntemlerinin gerçek deney okumalarından elde edilen veriler ile karşılaştırma grafikleri bulunmaktadır. Şekil 8 detaylı incelendiğinde; genel olarak, deformasyon-zaman ilişkilerinde yöntemlerin güvenilirliği ve deneysel verilerle uyumluluğu değerlendirilmiş, her bir yöntemin güçlü ve zayıf yönleri analiz edilmiştir. Bu analizler, yöntemlerin deneysel verilere dayalı güvenilirliklerini belirlemek için önemli bir temel sunmaktadır. Bununla beraber; Casagrande yöntemi ile elde edilen deformasyon değerlerinin, deneysel verilere oldukça yakın bir uyum gösterdiği tespit edilmiştir. Özellikle eğrinin doğrusal olduğu kısımda birebir örtüşme sağlanmıştır. Taylor yöntemiyle hesaplanan değerlerin, deformasyonun tüm zaman aralıklarında deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Ancak, yöntemin çoğu zaman dilimlerinde deneysel verilerle hafif sapmalar gösterdiği tespit edilmiştir. Maksimum eğim yöntemi ile elde edilen sonuçların, erken deformasyon aşamalarında deneysel verilerle daha düşük bir uyum sergilediği, ancak ilerleyen zaman dilimlerinde uyumun arttığı gözlemlenmiştir. Ancak hiçbir zaman diliminde birebir örtüşme söz konusu değildir. Dikdörtgen hiperbol yöntemi ile hesaplanan deformasyon değerlerinin, tüm zaman aralıklarında deneysel verilerle iyi bir uyum sağladığı belirlenmiştir. Yöntemin deneysel sonuçlarla örtüşen tutarlı bir eğilim sunduğu tespit edilmiştir. Ancak deformasyonun erken aşamalarında deneysel okumaların biraz altında kalmıştır. Erken kademe yöntemi ile hesaplanan deformasyon değerlerinin, özellikle deformasyonun başlangıç aşamalarında deneysel verilerle daha yüksek bir uyum sağladığı, ancak zamanla sapmaların arttığı gözlenmiştir. Hesaplamalı yöntemle elde edilen sonuçların, deformasyonun başlangıç ve ileri aşamalarında deneysel ve-

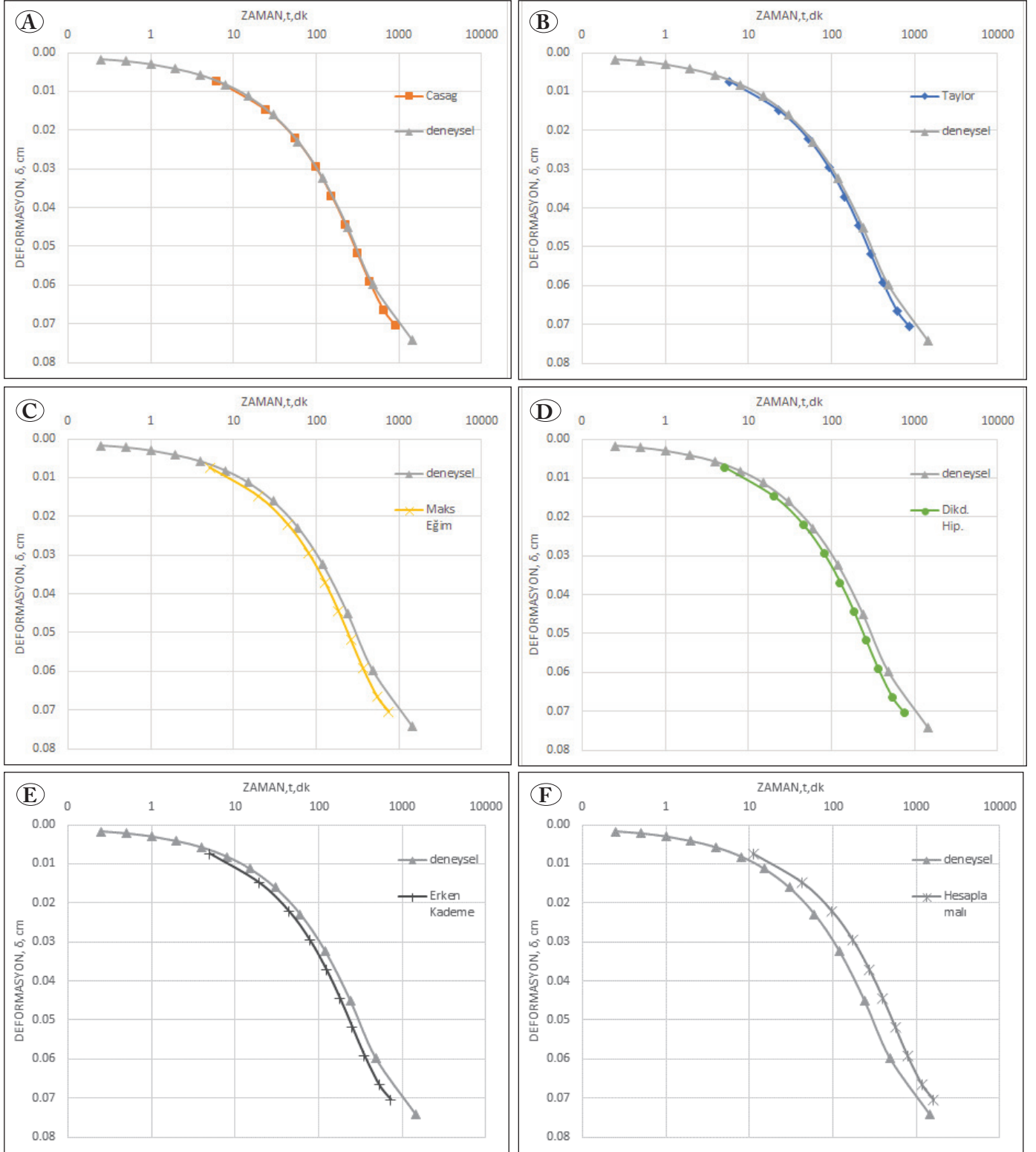
rilerden belirgin şekilde sapma gösterdiği saptanmıştır. Bu yöntemin diğer yöntemlere kıyasla daha az uyum sağladığı belirtilmiştir.

Şekil 9'da B100 zemininin 1. deneyinin 200 kPa basınçta c_v hesaplama yöntemlerinin gerçek deney okumalarından elde edilen veriler ile karşılaştırma grafikleri bulunmaktadır. Şekil 9 detaylı incelendiğinde; Casagrande yöntemi ile hesaplanan deformasyon değerlerinin, deneysel verilerle deformasyonun tüm aşamalarında oldukça yakın bir uyum gösterdiği gözlemlenmiştir. Yöntem, hem erken hem de ileri deformasyon aşamalarında deneysel eğriyle neredeyse birebir örtüşmüş ve yalnızca çok küçük sapmalar sergilemiştir. Bu durum, Casagrande yönteminin deformasyon-zaman ilişkisini güvenilir bir şekilde temsil ettiğini ortaya koymaktadır. Taylor yöntemiyle elde edilen deformasyon değerlerinin, deneysel verilerle özellikle erken ve orta deformasyon aşamalarında oldukça uyumlu bir eğilim izlediği tespit edilmiştir. Ancak deformasyon ilerledikçe, yöntemin deneysel eğriden hafif sapmalar gösterdiği fark edilmiştir. Bu sapmaların minimal düzeyde olduğu ve yöntemin genel olarak kabul edilebilir bir doğruluk sunduğu belirlenmiştir. Maksimum eğim yöntemiyle hesaplanan sonuçların, deformasyonun erken safhalarında deneysel eğriye yakın olduğu, ancak deformasyon ilerledikçe yöntemin deneysel verilerden sapma göstermeye başladığı saptanmıştır. Sapmalar özellikle deformasyonun ileri aşamalarında belirgin hale gelmiş ve yöntemin doğruluğunda azalma gözlemlenmiştir. Dikdörtgen hiperbol yöntemi ile hesaplanan deformasyon eğrilerinin, eğilim olarak deneysel eğriyle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Ancak deformasyon ilerledikçe, yöntemin deneysel verilerden küçük sapmalar gösterdiği kaydedilmiştir. Yine de, yöntemin genel eğilim açısından kabul edilebilir bir performans sunduğu değerlendirilmiştir. Erken kademe yöntemiyle elde edilen deformasyon değerlerinin, deformasyonun erken ve orta aşamalarında deneysel eğriye yakın olduğu, ancak deformasyonun ileri aşamalarında daha belirgin sapmaların ortaya çıktığı fark edilmiştir. Bu sapmalar, yöntemin doğruluğunu sınırlandırmış ve performansını diğer yöntemlere kıyasla daha düşük bir seviyeye çekmiştir. Hesaplamalı yöntemle elde edilen deformasyon değerlerinin, yalnızca deformasyonun erken aşamalarında deneysel verilere yakın olduğu, ancak deformasyon ilerledikçe yöntem ile deneysel eğri arasında belirgin sapmaların olduğu gözlemlenmiştir. Yöntemin deneysel verilerle düşük uyum göstermesi, genel doğruluğunu ve güvenilirliğini sınırlandırmıştır.

Şekiller 8 ve 9'a göre; Casagrande yöntemi, deneysel verilerle en yüksek uyumu sağlamış ve deformasyon sürecini en



Şekil 8. Konsolidasyon katsayısı hesaplama yöntemleri ile gerçek deney verilerinin karşılaştırılması (50 kPa) **A)** Casagrande yöntemi **B)** Taylor yöntemi **C)** Maksimum eğim yöntemi **D)** Dikdörtgen hiperbol yöntemi **E)** Erken kademe log-t yöntemi **F)** Hesaplamalı yöntem.



Şekil 9. Konsolidasyon katsayısı hesaplama yöntemleri ile gerçek deney verilerinin karşılaştırılması (200 kPa) **A)** Casagrande Yöntemi **B)** Taylor yöntemi **C)** Maksimum Eğim Yöntemi **D)** Dikdörtgen Hiperbol yöntemi **E)** Erken Kademe Log-t Yöntemi **F)** Hesaplamalı Yöntem.

iyi temsil eden yöntem olarak öne çıkmıştır. Taylor yöntemi de genel olarak kabul edilebilir bir doğruluk sunmuş, ancak deformasyonun ileri aşamalarında sapmalar göstermiştir. Hesaplamalı yöntem ise diğer yöntemlere kıyasla deneysel verilerle en düşük uyumu sergilemiş ve en az güvenilir yöntem olarak değerlendirilmiştir.

Yukarıda bahsedilen mevcut yöntemlerin c_v 'nin tahmin doğruluğunu ölçmek için kullanılan en yaygın ölçütlerden biri, ortalama mutlak yüzde hata anlamına gelen (Mean Absolute Percentage Error) MAPE'dir (Lewis 1982). Konsolidasyon deney sonuçlarından elde edilen deformasyon zaman grafikleri birbiri ile istatistiksel olarak karşılaştırmak için zaman serilerine uygun yapısı olan MAPE'in formülü aşağıda verilmektedir.

$$MAPE(\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|deneysel_i - tahmin_i|}{deneysel_i} \times 100 \quad (9)$$

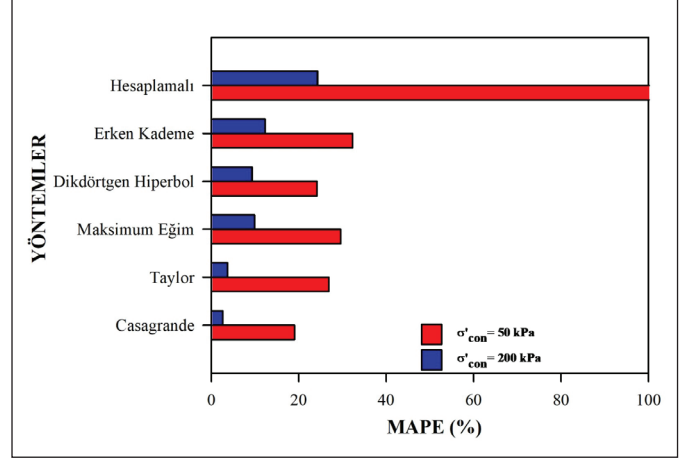
Burada **deneysel_i**, konsolidasyon deneyinde bir zaman aralığındaki deformasyon okuması, **tahmin_i** ise mevcut yöntemler ile bulunan c_v değerleri kullanılarak elde edilen deformasyon değerleri, n ise toplam deney veri sayısıdır. Çizelge 4'te MAPE sonuçlarının yorumlanması için Lewis (Lewis 1982) tarafından oluşturulan çizelge verilmiştir.

Çizelge 4. Genel MAPE değerlerinin yorumlanması.

MAPE (%)	Yorum
<10	Yüksek doğruluk
10-20	İyi
20-50	Kabul edilebilir
>50	Kusurlu

MAPE değerlerinin %10 dan küçük olması, tahminlerin deneysel veri setini yüksek doğrulukla temsil ettiğini göstermektedir. Bununla beraber %35'e kadar tahmin veri setinin yakınsaması kabul edilebilir. Şekil 10'da bu çalışma da elde edilen MAPE değerleri sunulmaktadır. Özellikle konsolidasyon yükleme basıncı 50 kPa'da Hesaplamalı ve Erken Kademe yöntemi hariç, diğer tüm yöntemler %10'un altına kalarak yüksek doğruluk verdikleri gözlenmektedir. Hesaplamalı ve Erken Kademe yöntemi ise %30'un altında kabul edilebilir seviyede kalmıştır. Konsolidasyon yükleme basıncı 200 kPa'da ise Hesaplamalı yöntem %100 üstüne çıkmış ve kesinlikle kusurlu bir yakınsama göstermiştir. Erken Kademe yöntemi de en yüksek %32 hata oranı ile kusurlu olmamaktadır. Bununla birlikte kabul edilebilir seviyesinin üstünde çok yakın değer vermiştir. Bu kusurlu tahminlerin sebebi bu iki yöntemde başlangıç değerine göre hata oranının dramatik

bir şekilde değişmesidir. Özellikle yüksek plastisiteli killerde birincil konsolidasyonun başlangıç zamanı ile bitiş zamanı diğer zemin örneklerine göre çok büyüktür. Hesaplamalı yöntemde d_1 ve d_2 okumaları deneye özel seçilmez ise hata oranı çok artmaktadır. Erken kademedeki ise $t_{22.4}$ değerinin seçilmesi zorluğu bu ıraksamaya sebep olmaktadır.



Şekil 10. Hesaplama yöntemlerine ait MAPE değerleri.

5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada yüksek plastisiteli killi zemin grubunda yer alan B100 zemininin gerçekleştirilen konsolidasyon deneyleri sonucunda literatürde verilen Casagrande, Taylor, Maksimum Eğim, Dikdörtgen hiperbol, Erken Kademe Log-t ve Hesaplamalı yöntemler ile c_v değerleri hesaplanmıştır. Sayısal değerlere bakıldığında her bir yöntemle hesaplanan c_v değerleri **çok dar bir aralıkta** kalmaktadır. Ancak yapılan geri hesaplama ile deneylerden elde edilen deformasyon-zaman ilişkisi karşılaştırma grafikleri göz önüne alındığında her bir yöntemin farklı tutarlılık seviyelerine sahip olduğu görülmüştür.

Bu karşılaştırmalardan;

- Casagrande yöntemi tüm deformasyon aşamalarında deneysel verilerle neredeyse birebir uyum sağlamıştır. Sapmalar yalnızca son birkaç noktada ortaya çıkmıştır ve bu durum yöntemin genel doğruluğunu etkilemeyecek düzeydedir. Birebir uyum açısından en güvenilir yöntemdir.
- Taylor Yöntemi erken, orta ve ileri deformasyon aşamalarında deneysel verilerle genellikle iyi bir uyum sağlamıştır. Ancak belirli aşamalarda küçük sapmalar göstermiştir. Genel doğruluk ve güvenilirlik açısından Casagrande yönteminin ardından üst sıralarda yer almaktadır.

- Dikdörtgen Hiperbol Yöntemi, erken ve orta deformasyon süreçlerinde deneysel verilere uyum sağlamış, ancak deformasyonun ilerleyen safhalarında sapmalar gözlenmiştir. Yine de, genel eğilim açısından kabul edilebilir bir performans sunmuştur.
- Maksimum Eğim Yöntemi, deformasyonun başlangıç aşamalarında deneysel verilere iyi bir uyum göstermiştir. Ancak deformasyon ilerledikçe yöntemin doğruluğu azalmış ve sapmalar daha belirgin hale gelmiştir.
- Erken Kademe Yöntemi, başlangıç aşamalarında deneysel verilerle uyumlu sonuçlar üretmiş, ancak deformasyon ilerledikçe belirgin sapmalar ortaya çıkmıştır. Bu durum yöntemin güvenilirliğini sınırlamaktadır.
- Hesaplamalı Yöntem, çoğu deneyde deneysel verilerle yalnızca ilk noktalarda uyum göstermiş, ancak deformasyonun orta ve ileri aşamalarında belirgin sapmalar sergilemiştir. Bu durum, yöntemin diğer yöntemlere kıyasla en düşük güvenilirlik derecesine sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada yapılan analizlere göre B100 zemini için, c_v hesaplamalarında doğruya en yakın sonucu veren yöntem Casagrande yöntemi olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada değerlendirilen yöntemlere ek olarak, farklı yöntemlerin de ilerleyen çalışmalarda değerlendirilmesi ve karşılaştırmalı olarak incelenmesi önerilmektedir. Ayrıca tüm deneysel ve matematiksel çalışmalar farklı plastik özelliklere sahip zeminler için de tekrar edilmelidir.

Bu çalışma yazar Dilek Cansu Bozacioğlu'nun doktora tez çalışması kapsamında yapılmıştır.

Yazar katkısı: Yazar Ömer Faruk Çapar: Çalışmayı planlamış ve tasarlamıştır, Yazar Dilek Cansu Bozacioğlu: Deneysel çalışmaları yapmıştır. Deneysel verilerin işlenmesini ve analizlerini gerçekleştirmiştir. Yazar Ertan Bol: Çalışmanın analizlerini yorumlamıştır. Bütün yazarlar makalenin yazımına katkıda bulunmuşlardır.

6. Kaynaklar

- ASTM D 2435/D2435-11 2020.** Standard test method for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading. Doi:10.1520/D2435_D2435M-11R20.
- Bello, AA., Owoseni, JO., Fatoyinbo, IO. 2019.** Evaluation of plasticity and consolidation characteristics of migmatite-gneiss-derived laterite soils, SN Applied Sciences. 1 Doi:10.1007/s42452-019-0859-8.
- Casagrande, A., Fadum, RE. 1940.** Notes on soil testing for engineering purposes. Harvard University, Graduate School of Engineering. Cambridge. 74. ISBN: 0598986995, 9780598986993.
- Dağlı, E (2021)** Uçucu kül stabilizasyonunun killi zeminlerin dayanım ve durabilite özelliklerine etkisi, Doktora Tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 281.
- Dehghanian, K., İpek, ŞÖ. 2022.** A survey on the relationships between compression index, coefficient of consolidation, and atterberg limits, Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies, 7(4), 302-315. Doi: 10.47481/jscmt.1161504.
- Holtz, RD., Kovacs, WD., Sheahan, TC. 2015.** An introduction to geotechnical engineering. Pearson Higher Education, New Jersey, ISBN 978-0-13-031721-6.
- Jayalekshmi, V., Elamathi, S. 2023.** Effect of mineralogical composition and chemical properties on the consolidation behaviour of clay soils, International Journal of Geotechnical Engineering, 17(7-10): 726-737. DOI: 10.1080/19386362.2023.2254135.
- Kok Shien, N., Yee Ming, C., Nur Izzati, AL. 2018.** Prediction of consolidation characteristics from index properties, International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICCEE 2018), October 2-5, Malaysia, Kuala Lumpur, 1-5. Doi:10.1051/e3sconf/20186506004.
- Kumar, KSP., Darga Kumar, N. 2016.** Evaluation of coefficient of consolidation in CH soils. Jordan Journal of Civil Engineering, 10(4):515-528.
- Lambe, TW., Whitman, RV. 1969.** Soil mechanics, John Wiley & Sons, New York.
- Lewis, C.D. 1982.** Industrial and Business Forecasting Methods, Butterworths Publishing, London, 40. ISBN 10: 0408005599.
- Mesri, G., Feng, TW. 2019.** Constant rate of strain consolidation testing of soft clays and fibrous peats, Canadian Geotechnical Journal, 56(10), 1526-1533. Doi:10.1139/cgj-2018-0259.
- Mishra, AK., Ohtsubo, M., Li, YT., Higashi, T. 2010.** Influence of the bentonite on the consolidation behaviour of soil-bentonite mixtures, Carbonates Evaporites, 25:43-49. Doi: 10.1007/s13146-010-0006-5.
- Muntohar, AS. 2009.** Reliability of the method for determination of coefficient of consolidation (Cv), 13rd Annual Scientific Meeting Denpasar, Bali, 5-6 November 2009.
- Raju, PSRN., Pandian, NS., Nagaraj, TS. 1995.** Analysis and estimation of the coefficient of consolidation, Geotechnical Testing Journal. ASTM. 18:252-258. Doi:10.1520/GTJ10325J.
- Robinson, RG., Allam, MM. 1996.** Determination of coefficient of consolidation from early stage of log T plot, Geotechnical Testing Journal, ASTM, 19(3):316-320. Doi:10.1520/GTJ10358J.

- Scott, RF. 1961.** New method for consolidation coefficient evaluation, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, 87 (1), 29-41.
- Sridharan, A., Prakash, K. 1985.** Improved rectangular hyperbola method for the determination of coefficient of consolidation, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 8(1): 37-40.
- Sridharan, A., Rao, SN. 1981.** Rectangular hyperbola fitting - method for one dimensional consolidation, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 4(4):161-168, Doi:10.1520/GTJ10785J.
- Su, HL. 1958.** Procedure for rapid consolidation test, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 1729. Doi:10.1061/jsfeaq.0000130.
- Swaram, B., Prabhata, K. S. 1997.** A computational method for consolidation-coefficient, *Soils and Foundations*, 17: 48-51.
- Taylor, DW. 1942.** Research on consolidation of clays, Report No. 82. Department of Civil and Sanitary Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA.
- Terzaghi, K. 1943.** Theory of consolidation, theoretical soil mechanics. 1th printing, John Wiley & Sons Inc, New York, ISBN:9780471853053, 265-297.
- TSE 1900-1 2006.** İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri bölüm 1: fiziksel özelliklerin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TSE 1900-2 2006.** İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - bölüm 2: mekanik özelliklerin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.